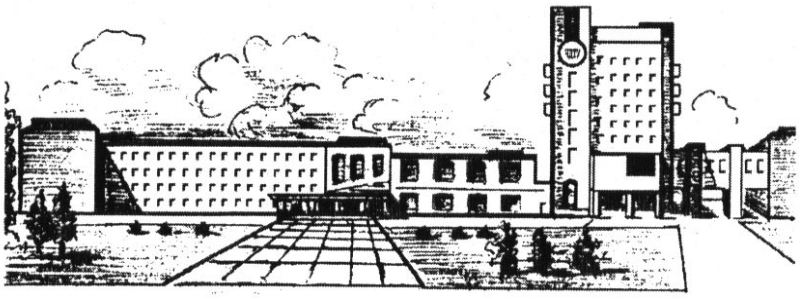
ISSN 2225-7551

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



В І С Н И К

ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

СЕРІЯ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ»

НАУКОВИЙ ЗБІРНИК

№ 1 (71)

Чернігів 2014

УДК 62/69+004
ББК 30/35
В53

Друкується за рішенням вченої ради університету (протокол № 3 від 31.03.2014 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 / Чер-
В53 ніг. нац. технол. ун-т. – Чернігів : Черніг. нац. технол. ун-т, 2014. – № 1 (71). – 247 с.

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 харчопереробної 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.

© Чернігівський національний технологічний університет, 2014

ISSN 2225-7551

ISSN 2225-7551

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

VISNYK

CHERNIHIV STATE TECHNOLOGICAL UNIVERSITY

SERIES "TECHNICAL SCIENCES"

SET OF SCIENTIFIC WORKS

ISSUE № 1 (71)

Chernihiv 2014

UDC 62/69+004
LBC 30/35

Published by the decision of the Academic Council of the University (protocol № 3 of 31.03.2014) Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series "Technical sciences" is included in the new list of academic editions of Ukraine, approved by the Resolution of the Presidium of the HAC of Ukraine of 01.07.2010 № 1-05/5 (Bulletin of HAC of Ukraine № 7, 2010).

Since 2013 Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series "Technical sciences" has been included in the international scientometric database eLIBRARY.RU (license agreement № 246-04\2013 of April 29, 2013).

Visnyk of Chernihiv State Technological University. Series "Technical sciences": scientific collection / Chernihiv National Technological University. – Chernihiv : Chernihiv National Technological University, 2014. – № 1 (71). – 247 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, technologies of food-processing industry. 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.

UDC 62/69+004
LBC 30/35

Editor in chief:
Kazymyr V.V., Vice-rector of scientific work, Doctor of Technical Sciences, Professor.
Deputy Editor in chief:
Pilipenko O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor.
Members of the Editorial Board:
Bolotov H.P., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Volkov I.V., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Denysov Yu.A., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Dubenets V.H., Doctor of Technical Sciences, Professor;
Dudla I.O., 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 H.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 registration KV № 14994-3966 PR of 27.02.2009.

© Chernihiv National Technological University, 2014

ISSN 2225-7551

ЗМІСТ

РОЗДІЛ І. МЕХАНІКА

Іскович-Лотоцький Р.Д., Обертюх Р.Р., Міськов В.П., Слабкий А.В. Вимірювальний комплекс вібропрес-молота з електрогідравлічним керуванням 9
Грицюк В.Ю. Нерівномірний рух тіла по балці....14
Колесник Є.В., Федін Д.О., Жезняковський І.М. Визначення залишкових напружень в електроосаджених покриттях з використанням модельного зразка....20
Барбаш М.І. Оптимізація архітектурного проектування....25
Ігнатенко А.С. Метод визначення реакції конструкцій із в'язкопружних матеріалів на дію теплових імпульсів....30
Макатьора Д.А., Панасюк І.В. Визначення погонного зусилля різання монолітної гуми ножем з односторонньою заточкою....36
Dubenets V., Savchenko O., Derkach O. Active damping of nonstationary vibrations in a beam with electro-viscoelastic patches....43

РОЗДІЛ ІІ. МЕХАНОХІМІЯ

Гомеля М.Д., Трус І.М., Шаблій Т.О. Електродіалізне опріснення розчинів з високим вмістом іонів жорсткості....50
Денисенко Т.М. Дослідження сучасних технологій переробки пластикових виробів....55
Денисова Н.М., Буяльська Н.П. Розрахунок соціально-економічної ефективності рішень щодо поліпшення умов праці під час формування поліамідних ниток....64
Космач О.П. Спектральний аналіз модельних сигналів акустичної емісії під час зміни навантаження пари тертя із композиційних матеріалів....70
Таірова Т.М. Математична модель коефіцієнта тяжкості виробничого травматизму на підприємствах хімічного комплексу....80
Воробйова В.І., Чигиринець О.Е., Фатєєв Ю.Ф., Татарченко Г.О. Особливості формування захисної плівки на поверхні металу із парової фази екстракту шишок хмелю....85

РОЗДІЛ ІІІ. ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА АВТОТРАНСПОРТУ

Кальченко В.І., Кальченко В.В., Єрошенко А.М., Кологойда А.В. 3D моделювання процесу заточування голчастої гарнітури барабанів та валиків текстильних машин....93
Федориненко Д.Ю. Тиск у карманах радіальних гідростатичних опор з урахуванням неідеальної геометрії проточної частини....99
Венжега В.І., Рудик А.В., Пасов Г.В. Вплив технології оброблення торцевих поверхонь пружин стиску автомобілів на їх надійність та довговічність....107
Тарандушка Л. А., Тарандушка І. П. Технологія моніторингу показників якості технічного обслуговування та ремонту автомобілів....116
Ткачук В.В. Безпечність біодизельного палива....123
Веремей Г.А. Математическое моделирование формообразования восстанавливаемых поверхностей седла клапана в газораспределительном механизме....127
Бойко І.А., Солоха В.В., Івщенко Л.Й. Динамічний аналіз поворотного стола 5-координатного обробного центру....134

РОЗДІЛ ІV. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

Болотов Г.П., Болотов М.Г., Руденко М.М. Керування енергетичними характеристиками тліючого розряду в умовах дифузійного зварювання....144
Пентегов И.В., Рымар С.В., Сидорец В.Н., Жерносеков А.М. Эффективность расплавления электрода при различных видах дуговой сварки....149

Березін Л.Я., Ганєєв Т.Р. Особливості технології зварювання вузлів мідь-алюміній-ситал.....158
Лаврова Е.В. Разработка устройства для наплавки под флюсом ленточным электродом с управляемым переносом электродного металла 164
Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Анализ предельного состояния трубопроводного элемента при сварочной наплавке дефекта утончения 168

РОЗДІЛ V. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Кузовик В.Д., Гордєєв А.Д. Методика планування експериментальних досліджень психофізіологічного стану головного мозку 174
Мошель М.В., Рогоза О.В., Ковтун А.О. Термодіелектричний ефект у рідких кристалах 181
Маргасов Д. В. Інформаційні технології у моніторингу енергоощадності бюджетних будівель м. Чернігова.....186
Новохатская Е.А., Кунгурцев А.Б. Формирование лексем при группировке запросов в методе инкрементального обновления МП 193

РОЗДІЛ VI. ЕНЕРГЕТИКА

Сенько В.І., Михайленко В.В. Аналіз електромагнітних процесів у колах з напівпровідниковими перетворювачами трифазної напруги у постійну з п'ятизонним регулюванням вихідної напруги 200
Лапа М.В., Моспан И.В., Терещенко И.А. Прогнозирование остаточного ресурса технических средств физической защиты атомных электростанций 207
Косенко Р.А. Моделювання системи векторного керування асинхронним двигуном 215

РОЗДІЛ VII. ТЕХНОЛОГІЇ ХАРЧОПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Дітріх І.В., Марченко Ю.І. Дослідження споживчих властивостей нових рибних пресервів в апельсиновому соусі «Нептун» 224
Молоканова Л.В., Квасніков А.А. Характеристика натуральних барвників з кизилу і терну для ковбасного виробництва 228
Ткаченко Т.І. Система моніторингу забезпечення безпечності та якості комбікормової продукції 234

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО «ВІСНИКА ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ. СЕРІЯ "ТЕХНІЧНІ НАУКИ"» 240

CONTENTS

SECTION I. MECHANICS

Iskovych-Lototskyi R., Obertiukh R., Miskov V., Slabkyi A. Measuring complex of vibro-hammers with elektrohydraulic control 9

Hrytsiuk V. Unequal motion of a body along a beam....14

Kolesnyk Ye., Fedin D., Zhezniakovskyi I. *D*etermination of resudual stresses in electrodeposited coatings with the use of a model sample....20

Barbash M. Architectural design optimization....25

Ignatenko A. *M*ethod for determining of viscoelastic structure reaction to thermal impulses 30

Makatora D., Panasiuk I. Determination of linear force of monolithic rubber cutting by the knife with one-sided grinding....36

Dubenets V., ***Savchenko O.***, ***Derkach O.*** Active damping of nonstationary vibrations in a beam with electro-viscoelastic patches....43

SECTION II. MECHANOCHEMISTRY

Gomelia M., Trus I., Shabliy T. Electrodialysis desalination of high-hardness solutions 50

Denysenko T. Research of modern technologies of plastics products processing....55

Denysova N., Buialska N. The calculation of social and economic efficiency of decisions on improvement of working conditions during formation of polyamide yarns 64

Kosmach A. Spectral analysis of acoustic emission model signals under load changes of friction units from composite materials 70

Tairova T. The mathematical model of gravity coefficient of occupational injuries in chemical industry....80

Vorobyova V., Chyhyrynets O., Fatieiev Yu., Tatarchenko H. Features of formation of protective films on the metal surface from the vapor phase of the hop cones extract....85

SECTION III. INTEGRATED TECHNOLOGIES OF MACHINEBUILDING AND MOTOR TRANSPORT

Kalchenko V., Kalchenko V., Yaroshenko A., Kolohoida A. 3D modeling of grinding of needle sets of drums and rollers of textile machines....93

Fedorynenko D. The pressure in the chambers of radial hydrostatic bearings with regard to non-ideal geometry of the flow part....99

Venzheha V., Rudyk A., Pasov H. Influence of processing of end surfaces of car compression springs on their reliablity and durability 107

Tarandushka L., Tarandushka I. The technolodgy monitoring of guality indexes of cars technical main tenance and repair guality 116

Tkachuk V. Safety of biodiesel fuel 123

Veremei H. The mathematical model of formation of the overhauled valve-seat surfaces in the valve timing gear....127

Boiko I., Solokha V., Ivshchenko L. *D*ynamic analysis of 5-axis milling centre turntable....134

SECTION IV. WELDING TECHNOLOGIES

Bolotov G., Bolotov M., Rudenko M. Control of energy characteristics of a glow discharge in terms of diffusion welding 144

Pentegov I., ***Rymar S.***, ***Sydorets V.***, ***Zhernosiekov A.*** Efficiency of electrode melting in different types of the arc welding....149

Berezin L.*, *Hanieiev T. Features of welding technology of copper-aluminum-sitall units.....158

Lavrova O. Development of the device for submerged arc welding with strip electrode with controlled electrode metal transfer.....164

Milenin A., Velikoivanenko E., Rozynka G., Pivtorak N. Analysis of pipeline element limit state at welding surfacing of local thinning defect.....168

SECTION V. INFORMATION COMPUTER TECHNOLOGIES

Kuzovyk V., Hordieiev A. Planning methodology of experimental researchers of psychophysiological state of the brain.....174

Moshel M.*, *Rohoza A.*, *Kovtun A. Termodielektryk effect in liquid crystals.....181

Marhasov D. The information technologies in the monitoring of energy saving of Chernihiv municipal buildings.....186

Novokhatska K. , Kunhurtsev O. Formation of tokens in query grouping in the method of incremental maintenance of materialized views.....193

SECTION VI. POWER ENGINEER

Senko V., Myhailenko V. Analysis of the electromagnetic processes in circuits with semiconductor converters of the three-phase voltage in constant with five zoned regulations of the output voltage.....200

Lapa M., Mospan I., Tereshchenko I. Prognostication of the residual life of technical means of physical protection of nuclear power plants.....207

Kosenko R. *M*odeling of induction motor vector control.....215

SECTION VII. TECHNOLOGIES OF FOOD-PROCESSING INDUSTRY

Ditrikh I., Marchenko I. The study of consumer properties of new fish preserves in orange sauce «Neptune».....224

Molokanova L., Kvasnikov A. Characteristics of natural dyes from dogwood and blackthorn for sausage manufacturing.....228

Tkachenko T. The system of monitoring of the security and quality assurance of mixed feed production.....234

BASIC REQUIREMENTS FOR SUBMITTING MANUSCRIPTS AND SCIENTIFIC ARTICLES 240

РОЗДІЛ І. МЕХАНІКА

УДК 621.74

Р.Д. Іскович-Лотоцький, д-р техн. наук
Р.Р. Обертюх, канд. техн. наук
В.П. Міськов, аспірант
А.В. Слабкий, канд. техн. наук
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ВІБРОПРЕС-МОЛОТА З ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИМ КЕРУВАННЯМ

Р.Д. Искович-Лотоцкий, д-р техн. наук
Р.Р. Обертюх, канд. техн. наук
В.П. Миськов, аспирант
А.В. Слабкий, канд. техн. наук
Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ВИБРОПРЕСС-МОЛОТА С ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Rostyslav Iskovych-Lototskyi, Doctor of Technical Sciences
Roman Obertiuh, PhD in Technical Sciences
Vadym Miskov, PhD student
Andrii Slabkyi, PhD inTechnical Sciences
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsa, Ukraine

MEASURING COMPLEX OF VIBRO-HAMMERS WITH ELEKTROHYDRAULIC CONTROL

Представлено експериментальний стенд вібропрес-молота з електрогідравлічним керуванням. Обґрунтовано вибір електричної схеми та схеми підключення давачів тиску та переміщення з АЦП та персональним комп'ютером. Наведено основні вимоги, що ставляться перед давачами, які використовуються у режимі вимушених вібрацій. Також описано поетапний процес встановлення та налагодження вимірювального стенда в комплексі з реєструвальним обладнанням.

Ключові слова: *вібропрес-молот, давач, вібрація, вимірювальний комплекс.*

Представлен экспериментальный стенд вибропресс-молота с электрогидравлическим управлением. Обосновано выбор электрической схемы и схемы подключения датчиков давления и перемещения с АЦП и персональным компьютером. Приведено основные требования, которые ставятся перед датчиками, которые используются в режиме вынужденных вибраций. Также описано поэтапный процесс установки и настройки измерительного стенда в комплексе с регистрирующим оборудованием.

Ключевые слова: *вибропресс-молот, датчик, вибрация, измерительный комплекс.*

The article presents an experimentalst and vibro-hammer with electrohydraulic control. Justified the selection of electrical scheme and scheme of connecting pressuresensor and ADC and movementofpk. The basic requirement imposed on sensors used in the mode offorced vibrations. Also describes the process step by step installation and configuration of the measuring stand together with the registration equipment.

Key words: *vibro-hammer, sensor, vibration, measuringsystem.*

Використання корисних вібрацій у таких технологічних процесах, як пресування, формоутворення, витягування, розкочування дозволяє підвищити їх продуктивність, зменшити потужність обладнання та покращити якість виготовленої продукції. Проте сучасні вимоги технічного прогресу вимагають подальшої автоматизації виробничих процесів, зокрема відомого вібраційного обладнання. Одним із етапів модернізації обладнання є відслідковування робочих параметрів вібраційної машини (амплітуди і частоти робочого органу (стола, пуансона і т. ін.) та їх корегування у процесі роботи. Такого типу питання вирішуються на кафедрі металорізальних верстатів та обладнання автоматизованих виробництв Вінницького національного технічного університету, виконуючи теоретичні та експериментальні дослідження нових технічних рішень на базі вібропрес-молота (ІВПМ-16), принципова гідрокінематична схема якого наведена на рис. 1 [3; 1].

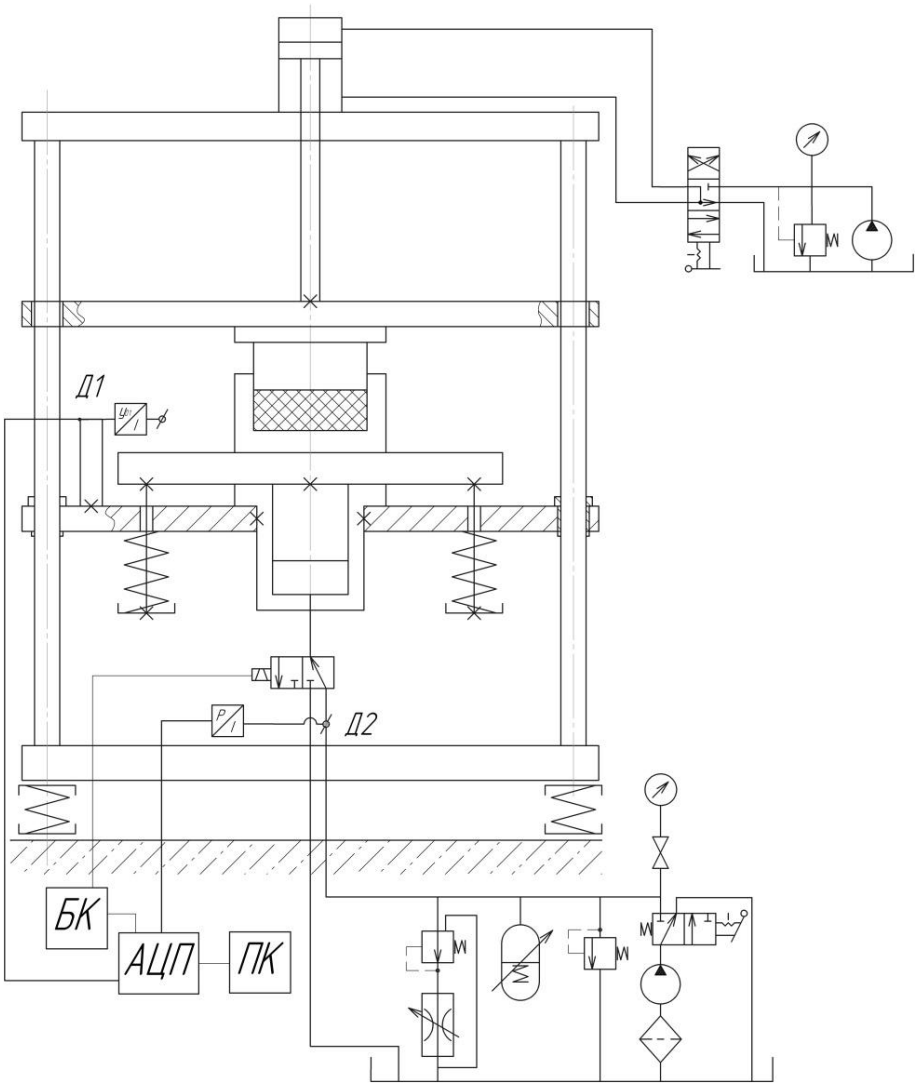


Рис. 1. Гідрокінематична схема вібропрес-молота з електрогідравлічним керуванням: ПК – персональний комп'ютер; БК – блок керування; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; Д2 – давач тиску; Д1 – давач переміщення

Під час проведення науково-дослідних робіт на вказаному обладнанні необхідно контролювати та реєструвати такі параметри, як тиск у напірній гідролінії та переміщення вібростола. Причому реєстрація вищевказаних параметрів повинна виконуватись одночасно по всім каналам давачів для можливості подальшого аналізу отриманих даних щодо взаємного перебігу динамічних процесів роботи обладнання [2; 4].

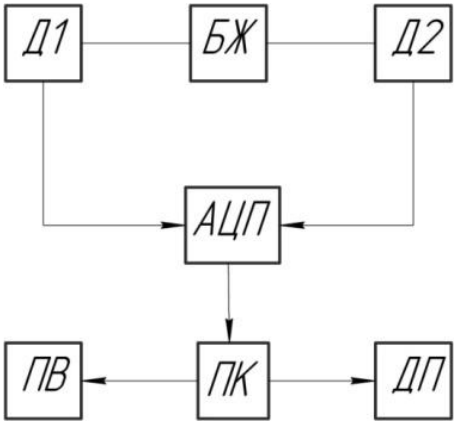
Практика експлуатації та дослідження наявного вібраційного обладнання сформувала певні вимоги щодо дослідного обладнання, а саме [4]:

– швидкодія всієї апаратної частини (АЦП, давачів) повинна бути достатньою для відслідкування параметрів вібрації;

– необхідно використовувати давачі тиску з металевим чутливим елементом, оскільки через крихкість чутливих елементів, що виготовляються з керамічних сплавів (наприклад, оксиду алюмінію чи кремнію і т. ін.), швидко руйнуються під дією вібраційних чи віброударних режимів;

– схема під'єднання давачів повинна будуватись на основі поєднання цифрової та загальної землі (використання однієї загальної землі приводить до накладання сигналів, що спотворює реальну картину).

Такий підхід забезпечує надійну експлуатацію вимірювального комплексу в режимі вимушених вібрацій, мінімізує похибку вимірювання, підвищує точність отриманих даних, які в подальшому будуть порівнюватись з теоретичними даними. Враховуючи вищевказані вимоги, яким повинен відповідати вимірювальний комплекс, для дослідження робочих параметрів вібропрес-молота з електрогідравлічним керуванням було розроблено та скомплектовано вимірювальний комплекс, блок-схема якого представлена на рис. 2 та електрична схема представлена на рис. 3.



Д1 – давач переміщення;
Д2 – давач тиску;
БЖ – блок живлення;
АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;
ПК – персональний комп'ютер;
ПВ – пристрій візуалізації (дисплей);
ДП – друкуючий пристрій (принтер)

Рис. 2. Блок-схема вимірювально-реєструвального комплексу для експериментальних досліджень

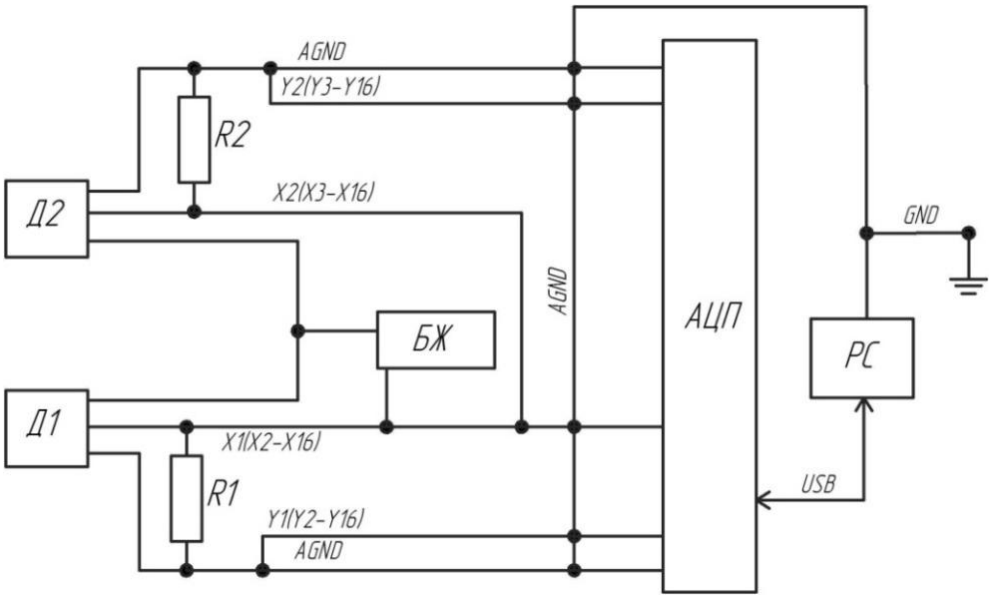


Рис. 3. Електрична схема вимірювально-реєструвального комплексу для експериментальних досліджень: PC – персональний комп'ютер; AGND – аналогова земля; GND – корпус PC

Принцип роботи вимірювального комплексу такий. Живлення давачів забезпечується від джерела постійного струму з робочою напругою 24 В, розміщеного в корпусі блоку живлення *БЖ,* в якому також розташована розподільна плата, на якій змонтовані схеми підключення давачів вимірювально-реєструвального комплексу таким способом, щоб унеможливити проходження наскрізних струмів по ланцюгах GND–AGND. Сигнал, що поступає від давачів тиску та переміщення, надходить у вигляді змінної напруги чи сили струму на АЦП, де він обробляється, і на виході з АЦП має цифровий формат і далі передається на персональний комп'ютер (ПК). У ПК вхідний сигнал, за допомогою спеціальної програмної утиліти обробляється і за допомогою пристрою візуалізації представляється у вигляді змінних графіків, які відображають змінну робочих параметрів вібропрес-молота з електрогідравлічним керуванням у реальному часі. Для

більш зручного використання отриманих результатів їх можливо роздрукувати через друкуючий пристрій, що під'єднаний до ПК.

Як АЦП використовується малогабаритний багатофункціональний вимірювальний модуль Е14-140 компанії L-Card. Е14-140 дозволяє швидко з достатньою точністю організувати процес реєстрації даних. Цей модуль має у своєму складі 14-розрядний АЦП, що працює з шістнадцятьма диференційними або тридцяти двома каналами із загальною землею. Такий модуль забезпечує неперервний збір аналогових даних на частотах АЦП від 0,122 до 100 кГц. Цифровий вхід/вихід представлений у вигляді шістнадцяти вхідних та шістнадцяти вихідних цифрових ТТЛ-сумісних ліній.

Програмною утилітою для оброблення даних на комп'ютері служить продукт L-GRAPH компанії L-Card, що працює з модулем Е14-140. Фактично, утиліта L-GRAPH – це багатоканальний осцилоскоп-спектроскоп-реєстратор-візуалізатор. L-GRAPH дозволяє в режимі реального часу бачити на моніторі ПК до чотирьох каналів реєстрації даних.

До такої системи збору даних входять давачі з високими показниками точності, які відповідають основним вимогам щодо сумісності роботи з модулем Е14-140 та відповідають технологічним вимогам для роботи на вібраційному обладнанні. А саме на основі теоретичного дослідження вібропрес-молота з електрогідравлічним керуванням та його керуючої апаратури встановлено, що очікувана максимальна частота проходження імпульсів тиску та амплітуди вібростола не перевищують відповідно 70 Гц і 2 мм, тому метрологічні параметри давача тиску та переміщення повинні забезпечувати частотний діапазон не менше ніж 100 Гц і діапазон переміщення 0…5 мм.

Із врахуванням вищевказаних технічних параметрів та конструктивних особливостей досліджуваного обладнання, після аналізу та деяких порівнянь вимог щодо експлуатації як давач переміщення було обрано давач переміщення TURK Ni8-M18-LiU (рис. 4, *в*) [6], а як давач тиску – давач ADZ-SML-10 (рис. 4, *а, б*) [5], технічні характеристики яких наведені відповідно в табл.

Таблиця

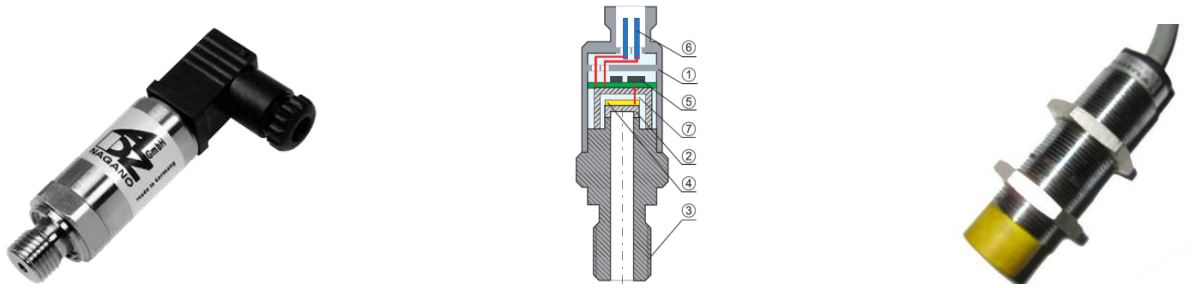
Технічна характеристика давача переміщення TURK Ni8-M18-LiU

ПАРАМЕТРИ	ADZ-SML-10	TURK Ni8-M18-LiU
Тип давача	Перетворювач тиску	Індуктивний з аналоговим виходом
Діапазон вимірювання	0-60 МПа	0-5 мм
Вихідний сигнал	4…20 мА	0…20 мА, 0…10 В
Діапазон напруги живлення, В	12…32	15…30
Похибка при +25 ºС (від повної шкали)	±0,5 %	±0,5 %
Час реакції	<1 мс	<1 мс
– допустиме ударне навантаження – допустиме вібраційне навантаження – ступінь захисту	30 g до14 мс 20 g у діапазоні 20…2 кГц IP68	30 g IEC 68-2-6 55 g IP67

Конструкція давача тиску є класичною і забезпечує всі вимоги роботоздатності, що пред'являються до давачів, які застосовуються під час дослідження вібраційних і віброударних машин. Конструктивна схема давача тиску ADZ-SML-10 представлена на рис. 4, *б*.

Як чутливий елемент у давачі тиску ADZ-SML-10.0 (рис. 4, *а, б*) використано поліровану з нержавіючої сталі мембрану, на яку методом тонкоплівкової технології нанесена вимірювальна схема із полікристалічного кремнія. В результаті дії тиску на мембрану порушується рівновага в тензомістку, що приводить до появи вихідного сигналу. Оброблення сигналу здійснюється за допомогою інтегральної мікросхеми

спеціального призначення ASIC (Applicati-on Specific Integrated Circuit) і схеми перетворення напруги (струму).

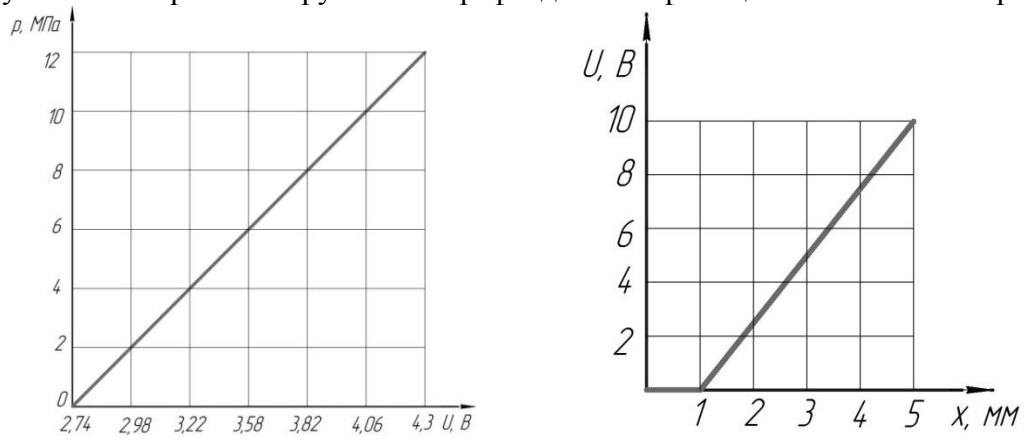


а *б* *в*

Рис. 4. Давачі вимірювального комплексу: а – зовнішній вигляд давача тиску ADZ-SML-10.0; б – конструктивна схема давача тиску ADZ-SML-10.0, де 1 – нержавіюча сталь, 2 – сталева діафрагма, 3 – різь, 4 – сенсорний елемент, 5 – плата з електронними компонентами, 6 – роз'єми; в – зовнішній вигляд давача переміщення TURK Ni8-M18-LiU

Індуктивний давач переміщення TURK Ni8-M18-LiU з аналоговим виходом забезпечує сигнал у вигляді зміни сили струму або напруги, що пропорційно відстані від активної поверхні давача до вібростола (рис. 1).

Тарування давача переміщення виконано за допомогою розробленого вимірювально-реєструвального комплексу під час переміщення стола прецизійного координатно-розточувального верстата. Тарувальний графік давача переміщення показаний на рис. 5, *б*.



а *б*

Рис. 5. Тарувальні графіки давачів вимірювального комплексу: а – тиску ADZ-SML-10.0; б – переміщення TURK Ni8-M18-LiU

Вимірювальний комплекс з використанням вищевказаного обладнання та схемою його підключення дозволяє уникнути викривлення сигналу у процесі реєстрування даних та мінімізувати похибку вимірювання робочих параметрів вібропрес-молота з електрогідравлічним керуванням.

Обладнання, що використовується у вимірювальному комплексі, за винятком давачів тиску та переміщення, знаходиться на значній відстані від вібраційного обладнання, що дозволяє уникнути негативних явищ, пов'язаних з поширенням вібраційних хвиль по підлозі лабораторії. Давачі, що використовуються у вимірювальному комплексі, відповідають усім вимогам, що пред'являються до вібраційного обладнання. Точність цього комплексу попередньо перевірялась на високоточному обладнанні за допомогою тарування давачів, що стверджує адекватність отриманих даних.

Використання такого комплексу є можливим на будь-якому вібраційному обладнанні завдяки використанню спеціальних перехідників та пристосування, що значно розширює можливості його експлуатації.

Список використаних джерел

1. *Баранов В. Н.* Электрогидравлические и гидравлические вибрационные машины / В. Н. Баранов, Ю. Е. Захаров. – М. : Машиностроение, 1977. – 326 с.

2. *Іскович-Лотоцький Р. Д.* Основи теорії розрахунку процесів і обладнання для віброударного пресування : монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2006. – 338 с.

3. *Іскович-Лотоцький Р. Д.* Процеси та машини вібраційних і віброударних технологій : монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Р. Р. Обертюх, І. В. Севостьянов. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2006. – 291 с.

4. *Слабкий А. В.* Дослідження гідроімпульсного привода пристрою для радіального віброточіння / А. В. Слабкий, Р. Р. Обертюх, О. В. Дерібо // Промислова гідравліка і пневматика. – 2013. – № 2 (40). – С. 84–90.

5. *Характеристики* робочих параметрів давачів фірми ADZ [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.adz.de/pressure-transmitter.html.

6. *Характеристики* робочих параметрів давачів фірми TURCK [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.turck.by/.

УДК 539.3:539.4

В.Ю. Грицюк, канд. техн. наук
Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

НЕРІВНОМІРНИЙ РУХ ТІЛА ПО БАЛЦІ

В.Е. Грицюк, канд. техн. наук
Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА ПО БАЛКЕ

Vitalii Hrytsiuk, PhD in Technical Sciences
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

UNEQUAL MOTION OF A BODY ALONG A BEAM

Наведений у довідковій літературі розрахунок рівнозмінного руху тіла по балці без урахування контактних деформацій узагальнюється за допомогою врахування контактних деформацій.

Ключові слова: *балка, тіло, рух.*

Представленный в справочной литературе расчёт равнопеременного движения тела по балке без учёта контактных деформаций обобщается путём учёта контактных деформаций.

Ключевые слова: *балка, тело, движение.*

The calculation of motion with the permanent acceleration of body along a beam without taking into account of contact deformations cited in reference books is generalized taking into account the contact deformations.

Key words: *beam, body, moving.*

Постановка проблеми, аналіз останніх досліджень і публікацій, мета статті. На стержневі системи можуть діяти різні види динамічного навантаження: вібраційне, рухоме, ударне, сейсмічне. Звичайно, при розрахунку тіла по балці розглядається рівномірний рух тіла по балці [1]. У довіднику [2] наведений розрахунок рівнозмінного руху тіла по балці без урахування контактних деформацій. У [3] досліджується рівномірний рух тіла по балці з урахуванням контактних деформацій, а у представленій роботі – рівнозмінний рух з урахуванням контактних деформацій.

Математична модель

Розглянемо рух тіла по шарнірно опертій балці (рис. 1).

Силу контактної взаємодії $F(t)$ тіла і балки можна знайти з рівняння

$$d(F) = \alpha(F) + w_F(x_F, F), \quad (1)$$

де d – вертикальні переміщення тіла;

α – вертикальні переміщення тіла, викликані контактними деформаціями у місці взаємодії тіл (тіла і балки);

w_F – вертикальні переміщення балки у місці знаходження тіла;

x_F – горизонтальна координата цього місця.

Рівняння (1) є узагальненням відомого рівняння поперечного удару тілом по балці, запропонованого С.П. Тимошенком [1].

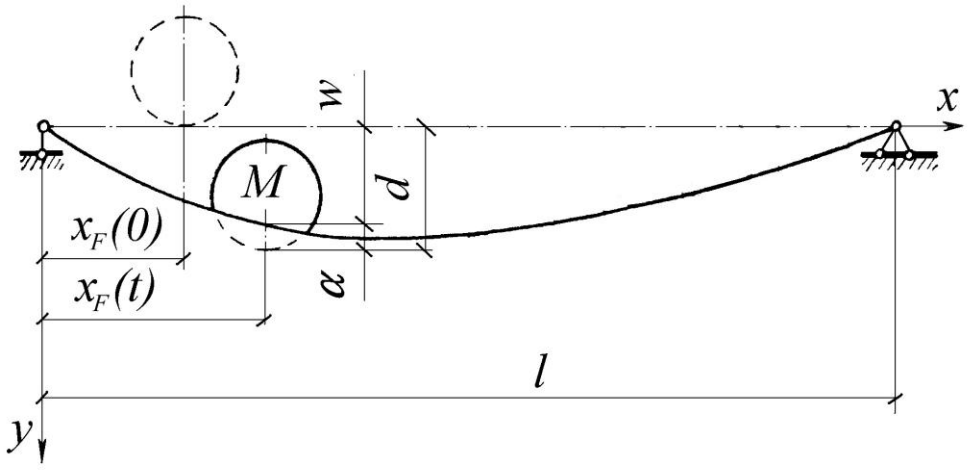


Рис. 1. Розрахункова схема

Вертикальні переміщення тіла d можна визначити за допомогою формули

$$d(t) = d_0 + \dot{d}_0 t + g\frac{t^2}{2} - \frac{1}{M}\int_0^t F(t - t_1)\,dt_1, \tag{2}$$

де d_0, $\dot{d}_0$ – початкові вертикальні переміщення і швидкість тіла;

g – прискорення земного тяжіння;

M – маса тіла;

t – час.

Якщо горизонтальна швидкість руху тіла v рівнозмінна, то

$$x_F(t) = x(0) + v(0)t + a\frac{t^2}{2}, \tag{3}$$

де $x(0)$ – початкова координата положення тіла на балці;

$v(0)$ – початкова горизонтальна швидкість руху тіла;

a – стале прискорення горизонтального руху тіла.

Переміщення α можна визначити за допомогою відомої статичної контактної задачі Герца.

Для врахування розсіювання енергії у матеріалі балки пружні характеристики її матеріалу запишемо у комплексній формі

$$E = E(1 \pm i\beta), \tag{4}$$

де E – модуль Юнга матеріалу балки;

β – коефіцієнт розсіювання енергії у матеріалі балки;

i – уявна одиниця.

Розкладаючи переміщення балки і навантаження у тригонометричні ряди, одержуємо вертикальні переміщення балки

$$w(x,t)=\sum_{j=1}^{\infty}X_j(x)\cdot T_j(t). \qquad (5)$$

Для шарнірно опертої по кінцях балки довжиною l власні форми коливань балки

$$X_j(x)=\sin(\alpha_j x), \qquad \alpha_j=\frac{j\pi}{l}. \qquad (6)$$

Функції часу

$$T_j(t)=e^{-\mu_j t}\left[T(0)\left(\frac{\mu_j}{\omega_j}\sin\omega_j t+\cos\omega_j t\right)+\frac{\dot{T}_j}{\omega_j}\sin\omega_j t\right]+$$

$$+\frac{1}{m\cdot\int_0^l X_j(x)^2\,dx\cdot\omega_j}\int_0^t F(t)\sin\alpha_j x_F(t)\cdot e^{-\mu_j(t-t_1)}\cdot\sin\omega_j(t-t_1)dt_1, \qquad (7)$$

$$\omega_j=\alpha_j^2\sqrt{\frac{E\cdot I_z}{m}}, \qquad \mu_j=\frac{\beta}{2}\omega_j=\frac{\psi}{4\pi}\omega_j, \qquad (8)$$

де ω_j – частоти власних коливань балки;

m – маса одиниці довжини балки;

I_z – осьовий момент інерції поперечного перерізу балки.

Для шарнірно опертої по кінцях балки найбільші нормальні напруження у довільному поперечному перерізі балки визначаються таким способом

$$\sigma(x,t)=\frac{EI_z}{W_z}\sum_{j=1}^{\infty}\alpha_j^2\sin(\alpha_j x_F(t))\cdot T_j(t), \qquad (9)$$

де W_z – осьовий момент опору поперечного перерізу балки.

Реалізація задачі

Рівняння (1) дозволяє визначити силу $F(t)$. Це робиться чисельно на послідовних малих кроках часу τ. Є різні алгоритми чисельної реалізації [4]. У цій роботі застосовувалася ступінчаста апроксимація ядра інтегралу $F(t)\sin\alpha_j x_F(t)$ у формулі (7).

Реалізація задачі виконувалася за допомогою математичного пакета MathCAD.

Приклад розрахунку

Були виконані розрахунки, які дозволяють проаналізувати вплив нерівномірності руху тіла по балці на поведінку системи. Результати розрахунків наведені на рис. 2, 3, 4. На цих рисунках вертикальною переривчастою лінією позначена мить сходу тіла з балки, горизонтальною штрихпунктирною лінією – статичні значення параметрів, що досліджуються.

Розглянемо рух сталевого тіла по сталевій балці. Довжина балки дорівнює 50 см, ширина – 1 см, висота – 1 см. Маса тіла становить 0,25 маси балки, радіус поверхні тіла дорівнює 1 см. Поверхня балки плоска.

Розсіювання енергії не враховується.

Рух тіла починається з лівого кінця балки. Горизонтальна середня швидкість дорівнює

$$v=\alpha_v\frac{l}{\pi}\omega_1, \qquad (10)$$

де α_v – коефіцієнт горизонтальної швидкості;

ω_1 – частота першої форми власних коливань балки.

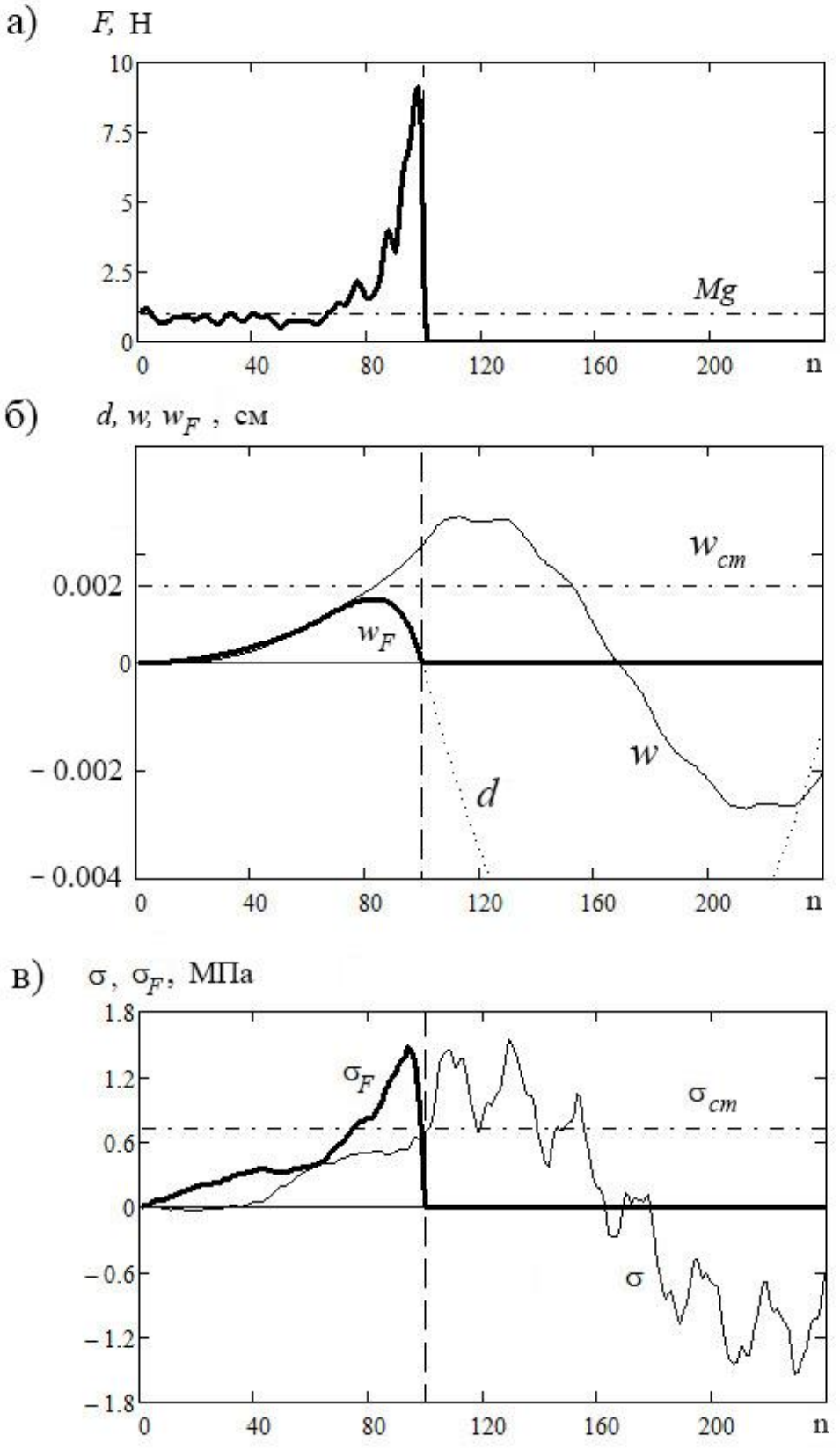


Рис. 2. Рівноприскорений рух тіла по балці

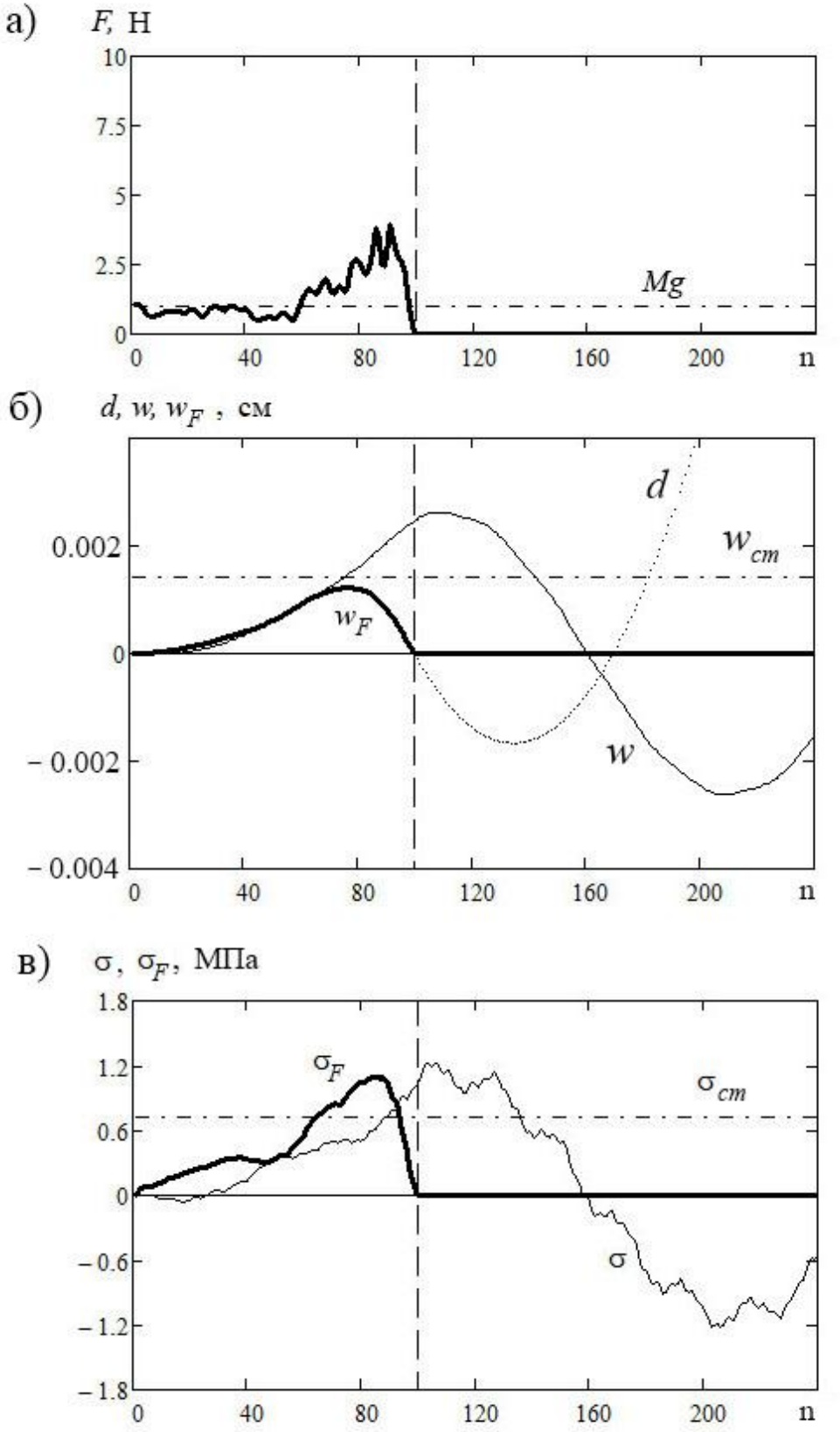


Рис. 3. Рівномірний рух тіла по балці

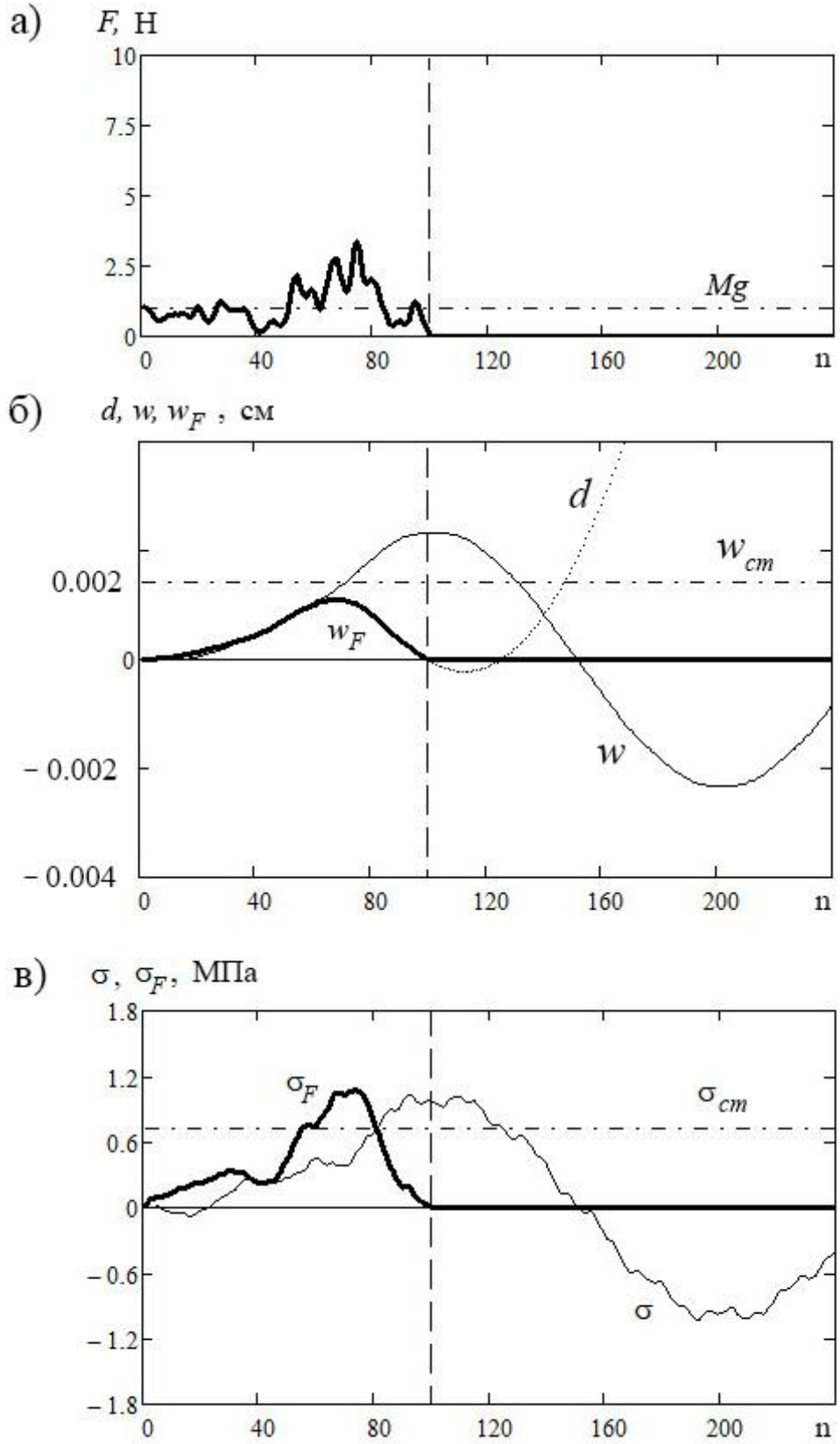


Рис. 4. Рівноуповільнений рух тіла по балці

Крок часу τ вибирається такий, що тіло проходить балку за 100 кроків.

Для опису коливань балки враховано 20 гармонік. Сила контактної взаємодії визначалася методом послідовних наближень з точністю до 2 % .

Переміщення і швидкості, спрямовані униз, вважалися додатними.

На рис. 2, 3, 4 наведені результати розрахунків при $\alpha_v = 1$ для відповідно рівноприскореному ($v(0) = 0{,}5v$, $v(100\tau) = 1{,}5v$), рівномірному ($v(t) = v$), рівноуповільненому ($v(0) = 1{,}5v$, $v(100\tau) = 0{,}5v$) проходженні тіла по балці.

Висновки. Динамічні ефекти сильніші при прискореному проходженні тіла по балці, ніж при рівномірному або уповільненому рухах.

Вони більше впливають на напружений стан, ніж на деформований стан.

Список використаних джерел

1. *Тимошенко С. П.* Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко. – М. : Наука, 1967. – 444 с.

2. *Справочник* по динамике сооружений / под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. – М. : Стройиздат, 1972. – 511 с.

3. *Филиппов А. П.* Воздействие динамических нагрузок на элементы конструкций / А. П. Филиппов, С. С. Кохманюк, Ю. С. Воробьёв ; под ред. А. П. Филиппова. – К. : Наукова думка, 1974. – 110 с.

4. *Грицюк В. Ю.* Алгоритм чисельного розрахунку малих коливань механічних систем / В. Ю. Грицюк // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту. – 2001. – № 12. – С. 43–46.

УДК620.17

Є.В. Колесник, канд. техн. наук
Д.О. Федін, канд. техн. наук
І.М. Жезняковський, магістрант
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпропетровськ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ЕЛЕКТРООСАДЖЕНИХ ПОКРИТТЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЬНОГО ЗРАЗКА

Е.В. Колесник, канд. техн. наук
Д.А. Федин, канд. техн. наук
И.М. Жезняковский, магистрант
ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепропетровск, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРООСАЖДЕННЫХ ПОКРЫТИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНОГО ОБРАЗЦА

Yevhen Kolesnyk, PhD in Technical Sciences
Dmytro Fedin, PhD in Technical Sciences
Ivan Zhezniakovskyi, Master's Degree student
SHEI «Ukrainian State University of Chemical Technology», Dnipropetrovsk, Ukraine

DETERMINATION OF RESUDUAL STRESSES IN ELECTRODEPOSITED COATINGS WITH THE USE OF A MODEL SAMPLE

Запропоновано простий за реалізацією метод визначення залишкових напружень в електроосаджених покриттях з використанням модельного зразка, в якому наявність ізолюючого шару на зворотному боці зразка не має негативного впливу на точність одержуваного результату. Метод застосовано для визначення залишкових напружень в електроосаджених залізних покриттях.

Ключові слова: *залишкові напруження, електроосаджені покриття, модельний зразок.*

Предложен простой в реализации метод определения остаточных напряжений в электроосажденных покрытиях с использованием модельного образца, в котором наличие изолирующего материала на обратной стороне образца не имеет негативного влияния на точность получаемого результата. Метод использован для определения остаточных напряжений в электроосажденных железных покрытиях.

Ключевые слова: *остаточные напряжения, электроосажденные покрытия, модельный образец.*

It is suggested a simply realizable method for determination of residual stresses in electrodeposited coatings with the use of model sample, in which presence of insulating layer on the opposite side of a sample doesn't have negative influence

on the accuracy of the result being obtained. This method was used for determination of residual stresses in electrodeposited iron coating.

Key words: *residual stresses, electrodeposited coatings, model sample.*

Постановка проблеми. У сучасному машинобудуванні постійно набувають розповсюдження деталі машин та елементи конструкцій, виготовлені з матеріалів, вкритих різними видами захисних покриттів, зокрема електроосадженими металевими покриттями, що зменшують тертя, підвищують зносостійкість та корозійну стійкість, а також додатково виконують декоративну функцію з покращення зовнішнього вигляду виробів.

Істотний вплив на технологічні та експлуатаційні властивості металевих покриттів має наявність залишкових напружень, які виникають у процесі нанесення або деяких видів оброблення покриттів. Так, для покриттів, які отримані способом електроосадження, переважно характерний високий рівень залишкових напружень, що зумовлено наявністю спрямованої дії на матеріал, який формується, потоку іонів металу в електроліті в напрямі катода (виробу, що покривається). В результаті такого впливу відбувається спотворення кристалічної решітки покриттів і в матеріалі виникають макронапруженя, які підпорядковуються закону Гука та врівноважуються в об’ємі всього виробу або більшої його частини.

Наявність залишкових напружень може негативно впливати на конструкційну міцність покриттів, викликати зміну розмірів при подальшому обробленні, змінювати електрохімічний потенціал, прискорюючи корозію. У зв’язку з цим експериментальне дослідження залишкових напружень в електроосаджених покриттях та розроблення відповідних методів дослідження є досить актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел показав, що методи експериментальних досліджень залишкових напружень в електроосаджених покриттях відрізняються різноманітністю. Огляд основних методів, устаткування та методів розрахунку величини напружень наведено в роботах [1–4]. Найбільш розповсюдженими є механічні методи визначення напружень, характерними та достатньо простими представниками яких є метод гнучкого катода та метод спірального катода [2].

За методом гнучкого катода (Хоур, Ероусміт) у нижній частині кювети з електролітом розміщується затискач, до якого кріпиться катод у вигляді тонкої пластини, ізольований із зворотного боку лаком. Верхній кінець катодної пластини виступає на 3–4 см над рівнем електроліту та за допомогою освітлювача через об’єктив проекціюється на шкалу. Під час осадження покриттів із внутрішніми напруженнями розтягнення катодна пластина разом із покриттям вигинається у сторону анода, а при стисканні – у протилежному напрямку. За вимірюваною величиною прогину в подальшому розраховують внутрішні напруження за формулою [2]

(1)

де E_K – модуль пружності катода;

S_K – товщина катода;

S – товщина покриття;

l – довжина катода;

y – відхилення вільного кінця катода від початкового положення.

За методом спірального катода (Бренер та Сендерофф) метал осаджується на зовнішню сторону катода у вигляді стрічки, яка завита у спіраль та поміщена у циліндричний анод, а внутрішня сторона катода ізолюється лаком. Залежно від знаку внутрішніх напружень спіраль закручується або розкручується на певний кут φ. Вимірювану кутову деформацію спіралі використовують для розрахунку внутрішніх напружень за формулою [2]

(2)

де φ – кут закручування спіралі;

R – радіус спіралі;

n – кількість витків спіралі.

Слід зазначити, що подібні методи, згідно з якими вимірюють деформацію зразка після нанесення покриттів і за її рівнем, враховуючи константи пружності основи, обчислюють величину напружень, використовують також для інших видів покриттів. Такі методи, наприклад [5–7], дещо відрізняються методиками розрахунку, які постійно вдосконалюються, але, звичайно, також можуть бути використані і для електроосаджених покриттів.

У розглянутих методах гнучкого і спірального катода у випадку набухання ізолюючого лаку виникає паразитна деформація. Використання інших методів розрахунку напружень за величиною деформації зразка також потребує нанесення лаку з одного боку, що зменшує точність одержуваних результатів. Спроба обійтись без лаку привела до розроблення інших методів визначення залишкових напружень [1; 2]. Деякі з них дають відносно велику похибку через зміну геометрії катоду, інші дозволяють одержати достатню точність, але потребують використання досить складного допоміжного обладнання у складі експериментальних установок – важільно-оптичних систем, високочутливих датчиків-механотронів, тензорезисторів [2] або застосування принципово інших методів вимірювання залишкових напружень – лазерної інтерферометрії [2] або рентгенівських методів [8; 9], які відрізняються високими капітальними та експлуатаційними витратами.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Недолік багатьох відомих механічних методів визначення залишкових напружень в електроосаджених покриттях полягає в недостатній достовірності результатів, що зумовлене наступним. Під час одержання зразків покриттів, призначених для визначення залишкових напружень, осадження здійснюється з одного боку основи, що приводить до її деформації після нанесення покриття, за величиною якої розраховують залишкові напруження. При цьому інший бік основи ізолюється від контакту з електролітом за допомогою лаку, полімерної стрічки або інших матеріалів, які не проводять електричний струм. Безумовно, наявність ізолюючого матеріалу впливає на пружні властивості зразків, особливо при електроосадженні на тонку жерсть або фольгу. Однак у відомих методах не передбачене врахування наявності ізолюючого матеріалу, яким нехтують у розрахунках, використовуючи лише пружні константи матеріалу основи, що приводить до зменшення достовірності одержуваних результатів визначення залишкових напружень.

Мета статті. Метою роботи стало розроблення простого за реалізацією та достовірного методу визначення залишкових напружень в електроосаджених покриттях, в якому наявність ізолюючого шару на зворотному боці зразка не впливала би на результат, або впливала би мінімально.

Виклад основного матеріалу. Спираючись на результати попередників, як первинну інформацію щодо залишкових напружень в електроосаджених покриттях у методі, що розроблявся, використано вимірюваний прогин зразка, тобто відхилення кінця гнучкого катода від його прямолінійного положення, що утворюється в результаті електроосадження металу.

Для підвищення достовірності результатів визначення напружень та запобігання впливу ізолюючого шару на зворотному боці зразка запропоновано використання додаткового модельного зразка, а метод визначення залишкових напружень у цьому випадку полягає в наступному.

На стрічковий металевий зразок (катод) з одного боку наклеюють ізолюючу полімерну стрічку або ізолюють захисним шаром лаку, а з іншого боку осаджують покриття на ділянці довжиною l, яку вимірюють від краю зразка. Після нанесення покриття вимірюють його прогин y_1 відносно початкового прямолінійного положення. Потім допоміжний (модельний) зразок без покриття, ідентичний за розмірами та ізолюючим шаром одержаному зразку з покриттям, у горизонтальному положенні жорстко закріплюють одним кінцем таким способом, щоб за межі кріплення виходила ділянка довжиною l. До іншого кінця зразка прикладають вантаж, масу якого підбирають так, щоб величина прогину модельного зразка y_2, що утворюється при такому навантаженні, дорівнювала би величині прогину y_1 (рис.). Далі, виходячи з маси, що утворює прогин $y_2=y_1$, розраховують величину напружень у модельному зразку та приймають їх значення як величину залишкових напружень в одержаному покритті.

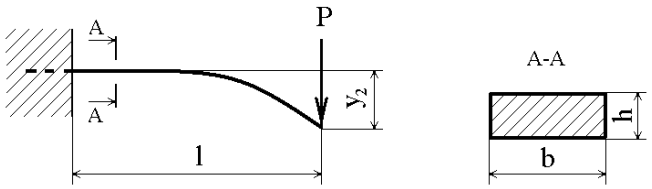


Рис. Схема навантаження модельного зразка

При відносно невеликому прогині визначення величини напружень зводиться до відомого з опору матеріалів розв'язання задачі розрахунку на міцність під час згинання балки із защемленим кінцем [10].

У цьому випадку максимальні напруження у зразку обчислюють за формулою

(3)

де M_{max} – максимальний згинальний момент;

W – осьовий момент опору поперечного перерізу.

Для обраної схеми максимальний згинальний момент обчислюють, як

(4)

де P – вага вантажу;

m – маса вантажу;

g – прискорення вільного падіння;

l – довжина робочої ділянки.

Для обраного зразка із прямокутним перерізом осьовий момент опору розраховують за формулою

(5)

де b – ширина зразка;

h – товщина зразка.

Тоді, підставляючи формули (4) та (5) в (3), отримуємо остаточний вираз для розрахунку максимальних напружень:

(6)

За результатами роботи одержано патент [11] на спосіб визначення залишкових напружень в електроосаджених покриттях.

Застосування запропонованого методу для визначення залишкових напружень в електроосаджених залізних покриттях завтовшки 150 мкм на сталевій основі (сталь 08 кп) з розмірами робочої ділянки 20×0, 25×50 мм показало, що величина напружень становить близько 170 МПа. Детальний склад електроліту та параметри процесу електроосадження, а також характеристики залізних покриттів наведено в роботах [12–14]. Для порівняння було виконано традиційні розрахунки залишкових напружень за методом гнучкого катода [2] за формулою (1) та за методом визначення залишкових напружень у полосових заготовках з покриттям за кривизною зразка [5], які не враховують наявність ізолюючого шару на зворотному боці зразка. Одержані значення напружень становлять близько 135 та 95 МПа відповідно. На думку авторів, застосування запропонованого методу дозволяє одержати більш достовірний результат через відсутність впливу на нього ізолюючого шару, що зумовлене використанням модельного зразка.

Висновки і пропозиції. Розроблено простий за реалізацією метод визначення залишкових напружень в електроосаджених покриттях з використанням модельного зразка, в якому наявність ізолюючого шару на зворотному боці зразка не має негативного впливу на точність одержуваного результату. Метод включає вимірювання прогину зразка після електроосадження покриття, навантаження вантажем ідентичного модельного зразка без покриття до забезпечення такого ж прогину і подальше обчислення напружень як відношення максимального згинального моменту до осьового моменту опору зразка без покриття.

Список використаних джерел

1. *Dini J. W.* Electrodeposition: the materials science of coatings and substrates / J. W. Dini. – Westwood, NJ, USA : Noyes Publications, 1993. – 367 p.

2. *Ковенский И. М.* Металловедение покрытий / И. М. Ковенский, В. В. Поветкин. – М., 1999. – 211 с.

3. *Perakh M.* Determination of spontaneous macrostress in deposits by means of restraining/ restoring force version of strip-bending and spiral-twisting / M. Perakh // Surface Technology. – 1976. – № 4. – P. 565–588.

4. *Perakh M.* Calculation of spontaneous macrostress in deposits from deformation of substrates and from restoring (or restraining) force factors / M. Perakh // Surface Technology. – 1979. – № 8. – P. 265–309.

5. *А.с. 1805307.* Способ определения остаточных напряжений в полосовых заготовках / Колмогоров Г. Л. ; опубл. 30.03.1993, Бюл. № 12. – 2 с.

6. *Пат. UA28383.* Спосіб визначення структурних і температурних складових залишкових напружень в покриттях / В. С. Антонюк, О. Б. Сорока, С. А. Клименко, М. Ю. Копейкіна ; опубл. 10.12.07, Бюл. № 20. – 3 с.

7. *Пат. CN101477030.* Measuring method for residual stress in coating / Binshi Xu, Xiancheng Zhang, Haidou Wang; Yixiong Wu. ; опубл. 08.07.2009. – 12 p.

8. *Горелик С. С.* Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – М. : МИСИС, 2002. – 358 с.

9. *Пат. RU2349907.* Рентгеновский способ прямого измерения упругих макронапряжений в поверхностном слое поликристаллических материалов и измерительный образец для его реализации / Кочаров Э. А. ; опубл. 20.03.2009, Бюл. № 8. – 8 с.

10. *Писаренко Г. С.* Сопротивление материалов / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський. – К. : Вища школа, 1979. – 696 с.

11. *Пат. UA80584.* Спосіб визначення залишкових напружень в електроосаджених покриттях / Колесник Є. В., Федін Д. О. ; опубл. 10.06.13, Бюл. № 11. – 3 с.

12. *Колесник Е. В.* Морфология поверхности железа, электроосажденного из сульфатного электролита / Е. В. Колесник, В. И. Овчаренко // Теория и практика металлургии. – 2011. – № 5–6, ч. 2. – С. 99–102.

13. *Колесник Е. В.* Влияние плотности тока на кристаллографическую текстуру электроосажденного железа / Е. В. Колесник, М. Т. Величко // Металознавство та термічна обробка металів. – 2011. – № 3. – С. 26–30.

14. *Колесник Е. В.* Изменение совершенства кристаллографической текстуры по толщине электроосажденных железных покрытий / Е. В. Колесник // Металлофизика и новейшие технологии. Спецвыпуск. – 2011. – С. 401–406.

УДК 515.2

М.І. Барбаш, ст. викладач
Чернігівський національний технологічний університет, м.Чернігів, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ АРХІТЕКТУРНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

М.И. Барбаш, ст. преподаватель
Черниговский национальный технологический университет, г.Чернигов, Украина

ОПТИМИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Maryna Barbash, senior teacher
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

ARCHITECTURAL DESIGN OPTIMIZATION

Запропоновано метод побудови комплексних об'єктів із простих елементів в AutoCAD® Architecture, версії AutoCAD, яка створена для проектування будівельних об'єктів. Інструменти архітектурного креслення дозволяють більш ефективно проектувати і створювати документацію у звичному програмному середовищі.

***Ключові слова**: комп'ютерна графіка, інструменти моделювання, система автоматизованого проектування.*

Предложен метод построения комплексных объектов из простых элементов в AutoCAD® Architecture, версии AutoCAD, созданной для проектирования строительных объектов. Инструменты архитектурного черчения позволяют более эффективно проектировать и создавать документацию в привычной программной среде.

***Ключевые слова**: компьютерная графика, инструменты моделирования, система автоматизированного проектирования.*

The method of construction of complex objects is offered from simple elements in AutoCAD® Architecture software is the version of AutoCAD specifically for architectural design. Architectural drafting tools enable you to design and document more efficiently in the familiar AutoCAD environment.

***Key words**: computer graphics, modeling tools, computer-aided design system.*

Постановка проблеми. Переважно під час застосування САД-систем конструктор отримує параметричну модель та сукупність креслень та специфікацій, достатню для виготовлення об'єкта. В основі створення будь-якого проекту лежить основна ідея, фундамент майбутнього проекту. На її основі розробляється план. Наступним етапом є визначення цілей та основних моментів розроблення проекту та його особливостей. Звичайно, потрібно розташувати основні етапи майбутнього розроблення за зменшенням їх важливості. І останнім перед розбиттям основних моментів на менші частини (розподіл ролей між розробниками) є визначення приблизного терміну розроблення. Основні концепції створення планувань та їх оптимізації полягають в адаптації раніше розроблених варіантів під нові потреби або розроблення «з нуля», починаючи з координаційного масиву осей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З появою нових будівельних матеріалів змінюються і конструкції, що сприяє появі нових архітектурних форм. Такі важливі показники споруди, як функціональна досконалість об'ємно-планувального рішення, ефективність конструкцій не менш важливі, ніж гармонія форми. Досягнення максимального ефекту при мінімальній витраті матеріалів і праці – це принцип, яким керуються архітектори [1]. Нині розповсюджені просторові конструкції криволінійної форми: тонкостінні просторові оболонки із залізобетону, стальні мембрани, дерев'яні і пластмасові оболонки, пневматичні і тентові конструкції, висячі системи. Ці просторові конструкції дозволяють перекриття великих площ без проміжних опор, що відкриває широкі можливості архітектурного формоутворення та забезпечує ефективне застосування матеріалу.

Напрямки пошуків оптимальних архітектурних форм – це вдосконалення наявних на основі математичних чи експериментальних методів та створення принципово нових форм та конструкцій, що відзначається необмеженими творчими можливостями.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Є три рівні моделювання: графічний, математичний та машинний. Перший об’єднує способи графічного зображення форми при різних способах її моделювання, на другому рівні графічні зображення апроксимуються аналітичними залежностями за допомогою формул чи таблиць. Остаточним є машинний рівень, що є основою автоматизованого моделювання природних утворень. Одна з найбільш розповсюджених архітектурних САПР – AutoCAD Architecture оптимізує завдання проектування та уможливлює випуск пакету робочої документації. Розроблена спеціально для архітекторів AutoCAD Architecture має нові функції, що автоматизують рутинні архітектурні креслярські операції, скорочують кількість помилок і підвищують продуктивність; процес створення архітектурних креслень, випуску документації та розроблення специфікацій значно спрощений.

Метою статті є дослідження використання елементарних графічних примітивів для отримання більш складних об'єктів та можливості роботи з шарами й анотативними об'єктами під час проектування будівельних об’єктів на універсальній платформі AutoCAD та спеціалізованому прикладному пакеті компанії Autodesk AutoCAD Architecture.

Головною метою цієї роботи є розроблення оптимальної концепції створення планувань, що пришвидшить процес проектування та створення проектів реконструкцій для архітекторів, знайомих з AutoCAD.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо послідовність створення плану 1-го поверху двоповерхового котеджу з використанням засобів допоміжних побудов «Вид», «Шар», «Локальна система координат» та модуля СПДБ (система проектної документації для будівництва) в пакеті AutoCAD (рис. 1).

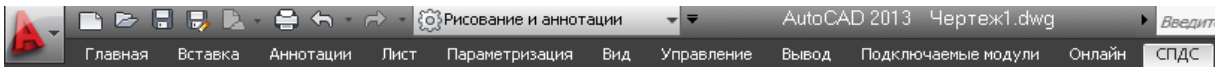


Рис. 1. Панель модуля СПДБ

Такий модуль дозволяє уникнути багатьох рутинних операцій. Від визначення достатньої та необхідної кількості та площі приміщень до побудови стін достатньо введення кроку до таблиці масиву координаційних осей (піктограма , рис. 2), масштабування маркерів для зручності (введення масштабу анотацій 1:100 для адекватного вигляду розмірів) та задання точки вставки, щоб отримати за один крок побудови повний масив координатних осей, враховуючи, що початок відліку – ліва нижня вісь (рис. 3).

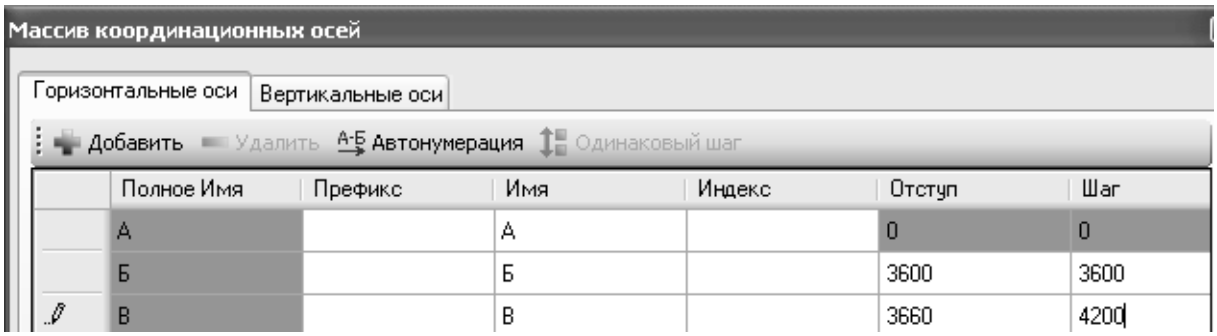


Рис. 2. Таблиця масиву координаційних осей

Сітку осей доцільно заблокувати та за потреби вказати відсоток затемнення блоку і переходити до побудови стін за допомогою мультиліній .

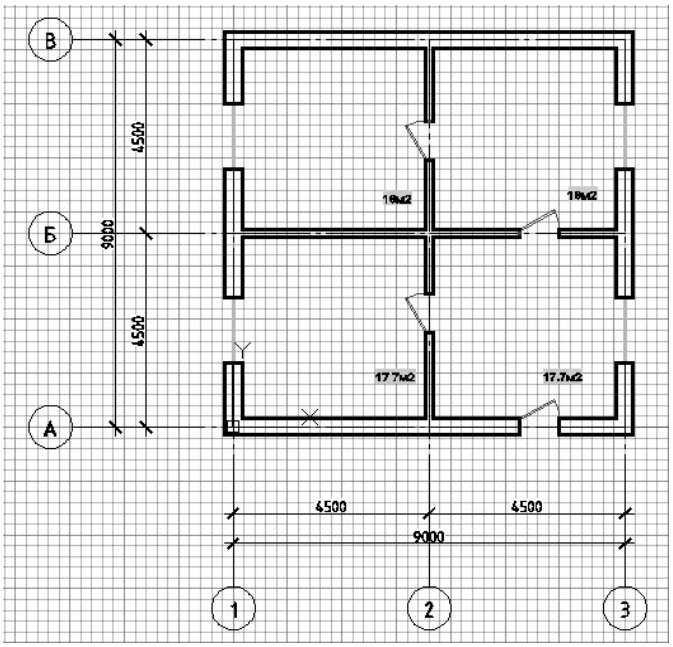


Рис. 3. Сітка осей

Основною концепцією в AutoCAD є розташування споріднених елементів та споріднених об'єктів на окремих шарах [2]. Важливість шарів побудов важко переоцінити. Наприклад, у випадку з генпланом дороги та вулиці, будівлі та споруди, інженерні мережі доцільно розташувати на окремому шарі. Можливі маніпуляції стосовно обраного шару: зміна кольору, типу ліній, їх ваги, замороження, блокування шару (неможливість видалення чи випадкового зсуву при збереженні можливості користування прив'язками, що досить важливо для сітки координаційних осей). Таким чином ми структуруємо об'єкти, які належать окремому шару та надаємо їм однакові властивості.

Перший етап створення планування – вибір оптимального шаблона.

AutoCAD дозволяє обрати шаблон з попередньо встановленими налаштуваннями для файлу (acadiso.dwt: метрична система вимірювання, налаштування стилів анотацій). Шаблон відповідає за такі властивості файлу:

1) метрична система вимірювання;

2) налаштування стилів анотацій (тексту, розмірів (ISO-25), таблиць та виносок);

3) створення шару для кожного об'єкта, для кожного виду характерних конструкцій значно прискорить подальшу роботу, особливо за необхідності внесення змін до проекту;

4) налаштування графічного простору (режимів побудов: необхідності сітки, режиму орто-, полярних та об'єктних прив'язок);

5) обрання чи створення власного робочого простору (класичний AutoCAD, 3D моделювання тощо);

6) налаштування аркушів (кількість, формат, основний напис креслення, видовий екран, логотип фірми);

7) налаштування для друку кожного з аркушів.

Обрання типу файлу – шаблон креслення AutoCAD.dwt додасть файл до папки Template та збереже всі вищеназвані налаштування у новому власноруч створеному шаблоні, що дозволить виконувати всі проекти з однаковим графічним оформленням та суттєво прискорить подальшу роботу над проектом при грамотно організованих шарах побудов.

Перехід до другого етапу – створення безпосередньо геометрії – повинен супроводжуватись побічним використанням шарів та роботою з блоками за допомогою інструментальних палітр (рис. 4).

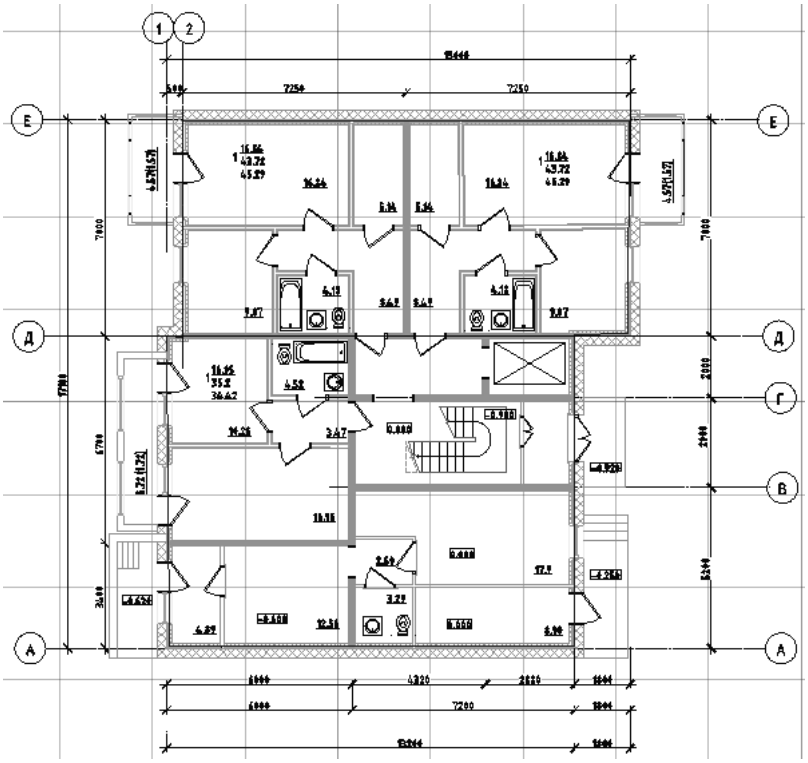


Рис. 4. Робота з блоками з інструментальних палітр

Третій етап – оформлення проекту, який включає в себе нанесення розмірів, тексту, таблиць, тобто перехід на вкладку Анотації. З появою анотативних розмірів їх зручно наносити як на аркуші, так і на моделі, тому виникає необхідність завчасно продумати, які з розмірів і на яких аркушах будуть відображені, та відповідно розбити їх за групами для розміщення на різних шарах. Текстові написи, наприклад, назви приміщень, краще виконувати у форматі аркуша (рис. 5).

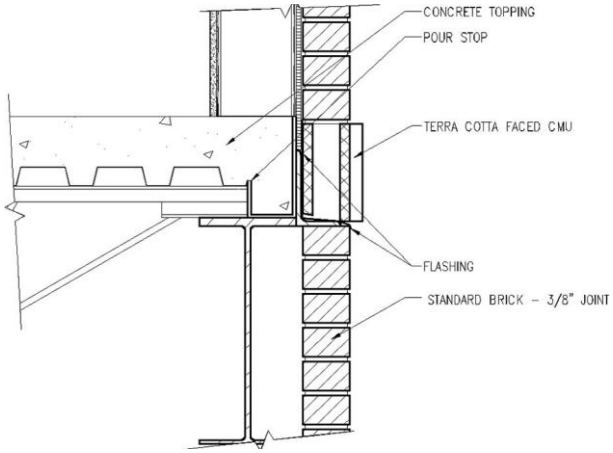


Рис. 5. Анотування креслень

Четвертий етап: перевірка форматів аркушів креслення, створення видових екранів та остаточне редагування перед друком. Подвійний клік дозволяє перейти в простір моделі в окремому аркуші креслення для встановлення потрібного масштабу креслення (наприклад, 1:100) та розміщення видового екрану на шарі, для якого заборонений друк (no print). Решта зображень виводиться на друк через Диспетчер параметрів аркушів та потребує уважного налаштування всіх параметрів друку: від встановлення імені принтера чи плотера до попереднього перегляду.

Послідовне використання вищеназваних етапів дозволить максимальне використання можливостей програми при подальшій роботі над проектом, а саме, оптимальне формування розрізів, фасадів, робочої документації та створення візуалізації (рис. 6).

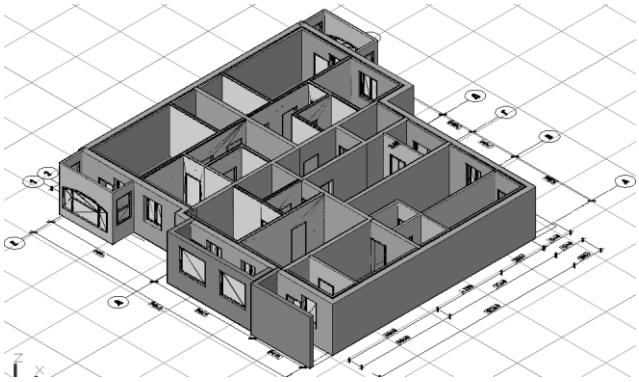


Рис. 6. Розташування плану в ізометрії

Двовимірні розрізи і фасади формуються безпосередньо з планів. Під внесення змін до проекту AutoCAD Architecture оновлює розрізи і фасади. При цьому зберігаються задані шари, кольори, типи ліній та інші властивості [3].

Робоча документація створюється з використанням стін, дверей і вікон, які імітують реальні архітектурні об'єкти. Стіни та їх властивості редагуються на рівні компонентів, що дозволяє вдосконалити роботу з такими типами стін, як похилі, кутові і пересічні вогнестійкі. У разі переміщення стіни автоматично оновлюються всі примикання до неї інших стін.

За допомогою вбудованих засобів візуалізації можна підготувати для замовника ефектну презентацію на будь-якій стадії архітектурного проектування. Можливості візуалізації повністю інтегровані в середовище AutoCAD Architecture. Програма дозволяє швидко передавати проекти на перевірку і затвердження завдяки публікації у формати DWF.

У AutoCAD Architecture для стін і всіх їх компонентів застосовуються AEC-розміри. Під час нанесення розмірів враховуються різноманітні варіанти прив’язки: до осьових ліній стін, їх зовнішніх поверхонь тощо. При змінах у проекті не вимагається ручного оновлення асоціативних розмірів [4], тому що вони перераховуються автоматично.

Висновки і пропозиції. Використання інструментів для задання властивостей двомірним примітивам в AutoCAD, встановлення модуля СПДБ оптимізує роботу щодо створення проекту. Формулювання етапів створення проекту дозволило побудувати цілісну картину створення планування, що прискорить та полегшить внесення змін та коригування креслення за необхідності.

Перспективи подальших досліджень полягають у вивченні професійного підходу до розроблення креслення і тим самим створення своєрідного почерку користувача.

Список використаних джерел

1. *Прикладна* геометрія та інженерна графіка / С. М. Ковальов, М. С. Гумен, С. І. Пустюльга та ін. – К. – Луцьк : Редакційно-видавничий відділ ЛДТУ, 2006. – Вип. 1. – 256 с.

2. *Барбаш М. І.* Базові операції комп’ютерної графіки. Засоби допоміжних побудов / М. І. Барбаш // Вісн. Черніг. держ. технол. ун-ту. – 2009. – № 37. – С. 50–54.

3. *Жарков Н.* AutoCAD 2012 [Электронный ресурс] : полное руководство / Н. Жарков, Р. Прокди, М. Финков. – Режим доступа : http://bankknig.org/knigi/229662-autocad-2012-polnoe-rukovodstvo.html.

4. *AutoCAD* Architecture features [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.autodesk.com/products/autodesk-autocad-architecture/.

УДК 539.3:534.1

А.С. Ігнатенко, асистент
Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ РЕАКЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ В'ЯЗКОПРУЖНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ДІЮ ТЕПЛОВИХ ІМПУЛЬСІВ

А.С. Игнатенко, ассистент
Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕАКЦИИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ НА ДЕЙСТВИЕ ТЕПЛОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

Andrii Ihnatenko, assistant
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

METHOD FOR DETERMINING OF VISCOELASTIC STRUCTURE REACTION TO THERMAL IMPULSES

Показано можливість використання методу скінченно-елементного моделювання у просторі інтегральних перетворень Фур'є для визначення реакції тонкостінних конструкцій із в'язкопружних матеріалів на дію теплових імпульсів.

Ключові слова: *в'язкопружні матеріали, нестаціонарні коливання, імпульс температури.*

Показана возможность использования метода конечно-элементного моделирования в пространстве преобразований Фурье для определения реакции тонкостенных конструкций из вязкоупругих материалов при действии тепловых импульсов.

Ключевые слова: *вязкоупругие материалы, нестационарные колебания, импульс температуры.*

A method of finite-element modeling in Fourier transform space for determining of thin viscoelastic structures reaction to thermal impulses is considered.

Key words: *viscoelastic materials, non-stationary vibrations, thermal impulses.*

Вступ. Динамічні ефекти під час дії нестаціонарних теплових навантажень привертають увагу вчених уже декілька десятиріч. З часу першої публікації В.І. Кублановської (1950 р.) за цією тематикою було опубліковано деякі фундаментальні монографії і величезна кількість статей. Вичерпний аналіз публікацій з цієї проблеми наведено в огляді [1]. У зв'язку з широким використанням конструкцій із в'язкопружних матеріалів, виникають нові завдання, які потребують дослідження. До них, зокрема, відносяться завдання визначення реакції в'язкопружних конструкцій на дію нестаціонарних теплових навантажень.

У цій роботі пропонується метод визначення реакції елементів конструкцій із в'язкопружного матеріалу на дію короткочасного теплового імпульсу. Для вирішення завдання використовується метод скінченно-елементного моделювання у просторі інтегральних перетворень Фур'є [2]. Метод дає можливість використати експериментальні дані про властивості в'язкопружних матеріалів, зокрема частотно-залежні комплексні модулі, і врахувати демпфірування коливань. Розглядається незв'язана задача, тобто не враховується залежність механічних властивостей матеріалу від температури.

Метод розрахунку. Короткочасні температурні збурення приводять до нерівномірного розподілення температури за об'ємом і появою напружень, обумовлених нерівномірною тепловою деформацією. Задачі розподілення температур і напружень у конструкціях із в'язкопружних матеріалів розглядаються у теорії термов'язкопружності. Фізичні рівняння зв'язаної лінійної теорії в'язкопружності мають вигляд [3]

$$\sigma = \int_0^t G(t-\tau)\frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau}d\tau - \int_0^t \varphi(t-\tau)\frac{\partial \theta}{\partial \tau}d\tau, \qquad (1)$$

$$k^T\theta'' = \frac{\partial}{\partial t}\int_0^t m(t-\tau)\frac{\partial \theta}{\partial \tau}d\tau + \frac{\partial}{\partial t}\int_0^t \varphi(t-\tau)\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau}d\tau, \qquad (2)$$

де $G(t-\tau), \varphi(t-\tau)$, $m(t-\tau)$ – матриці функцій релаксації, σ, ε – вектори напружень і деформацій, θ – приріст температури, k, θ'' – вектори коефіцієнтів теплопровідності і других похідних від температури відносно координат *x*, *y*.

Рівняння рівноваги (динаміки) і геометричні рівняння не відрізняються від таких для пружних матеріалів, тільки вектор деформацій доповнюється компонентами, які пов'язані зі зміною температури:

$$\varepsilon_0 = (\alpha\theta \;\; \alpha\theta \;\; \alpha\theta \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0)^T, \tag{3}$$

де α – коефіцієнт температурного розширення.

Якщо нехтувати другими доданками у правих частинах наведених вище двох рівнянь, рівняння стають незалежними. Тоді, визначивши температурне поле як функцію координат і часу, можна знайти розподілення напружень за об'ємом тіла.

Рівняння в'язкопружності (1) і нестаціонарної теплопровідності (2) можна записати у просторі інтегральних перетворень Фур'є:

$$\tilde{\sigma} = \tilde{C}(\tilde{\varepsilon} - \tilde{\varepsilon}_0), \; \tilde{k}^T \tilde{\theta}'' = \tilde{\lambda}\tilde{\theta}, \quad (\tilde{\lambda} = i\omega\tilde{m}), \tag{4}$$

де $\tilde{C}, \tilde{m}$ – матриці комплексних модулів, які є результатом інтегрального перетворення Фур'є інтегральних залежностей (1), (2) при нехтуванні зв'язуючими доданками, ω – частота.

Знайшовши розв'язок відносно зображення температури з другого рівняння (4), можна визначити зображення напружень з урахуванням першого рівняння (4).

Під час використання методу скінченних елементів усі розрахунки відносно зображень температури, деформацій, напружень доцільно виконувати у просторі перетворень Фур'є і тільки на останньому етапі переходити до часового простору.

Скінченно-елементний варіант рівняння нестаціонарної теплопровідності можна одержати в результаті мінімізації відповідного функціонала [4, с. 202] і переходу до простору інтегральних перетворень Фур'є:

$$i\omega\tilde{C}_\theta\tilde{\theta} + K_\theta\tilde{\theta} + \tilde{F}_\theta = 0, \tag{5}$$

де матриці $\tilde{C}, \tilde{K}, \tilde{F}$ визначаються інтегралами

$$\begin{aligned} \tilde{C}_\theta &= \int_V \tilde{\lambda} N^T N dV, \quad K_\theta = \int_V B^T D B dV + \int_{S2} h N^T N dS, \\ \tilde{F}_\theta &= -\int_V Q N^T dV + \int_{S1} q N^T dS - \int_{S2} h\theta_\infty N^T dS. \end{aligned} \tag{6}$$

($\tilde{h}$ – зображення Фур'є коефіцієнта теплообміну, θ_∞ – температура навколишнього середовища, $\tilde{Q}$ – внутрішні джерела тепла, $\tilde{q}$ – потік тепла, $\tilde{\lambda} = \tilde{c}\rho$).

Знайдені у результаті розв'язання рівняння (5) значення зображень вузлових температур можна використати для визначення поля вузлових температур у часовому просторі, а за необхідності визначення полів переміщень, деформацій і напружень використати як вузлові навантаження механічної скінченно-елементної моделі безпосередньо у просторі перетворень Фур'є, одержавши після застосування швидкого перетворення Фур'є переміщення, напруження і деформації у часовому просторі.

Запишемо рівняння варіаційного принципу Лагранжа у частотному просторі з урахуванням доданка з температурними деформаціями:

$$\int_V \delta\tilde{\varepsilon}^T \tilde{C}\tilde{\varepsilon} dV = (i\omega)^2 \int_V \delta\tilde{u}^T \rho\tilde{u} dV + \int_S \delta\tilde{u}^T \tilde{q} dS + \int_V \delta\tilde{\varepsilon}^T \tilde{C}\tilde{\varepsilon}_0 dV. \tag{7}$$

За наявності тільки неоднорідного температурного поля та інерційних сил рівняння матиме вигляд

$$\int_V \delta\tilde{\varepsilon}^T \tilde{C}\tilde{\varepsilon} dV + (i\omega)^2 \int_V \delta\tilde{u}\rho\tilde{u} dV = \int_V \delta\tilde{\varepsilon}^T \tilde{C}\tilde{\varepsilon}_0 dV. \quad (8)$$

Використовуючи далі скінченно-елементні співвідношення для апроксимації деформацій і переміщень вузловими переміщеннями $\tilde{\varepsilon} = AN\tilde{q}$, одержимо

$$Z(i\omega)\tilde{q} = \tilde{F}_\theta, \quad (9)$$

де $Z(i\omega)$ – комплексна матриця жорсткості, $\tilde{q}$ – зображення узагальнених переміщень вузлів скінченно-елементної моделі, $\tilde{F}_\theta$ – вузлові навантаження, пов'язані з наявністю температурного поля:

$$\tilde{F}_\theta = \int_V (AN)^T \tilde{C}\tilde{\varepsilon}_0 dV. \quad (10)$$

Значення інтеграла $\tilde{F}_\theta$ одержується у результаті визначення температурного поля.

Приклад розрахунку. Розглянемо приклад розрахунку напружень і переміщень у перерізах стержня при дії імпульсу температури у крайньому лівому перерізі (рис. 1).

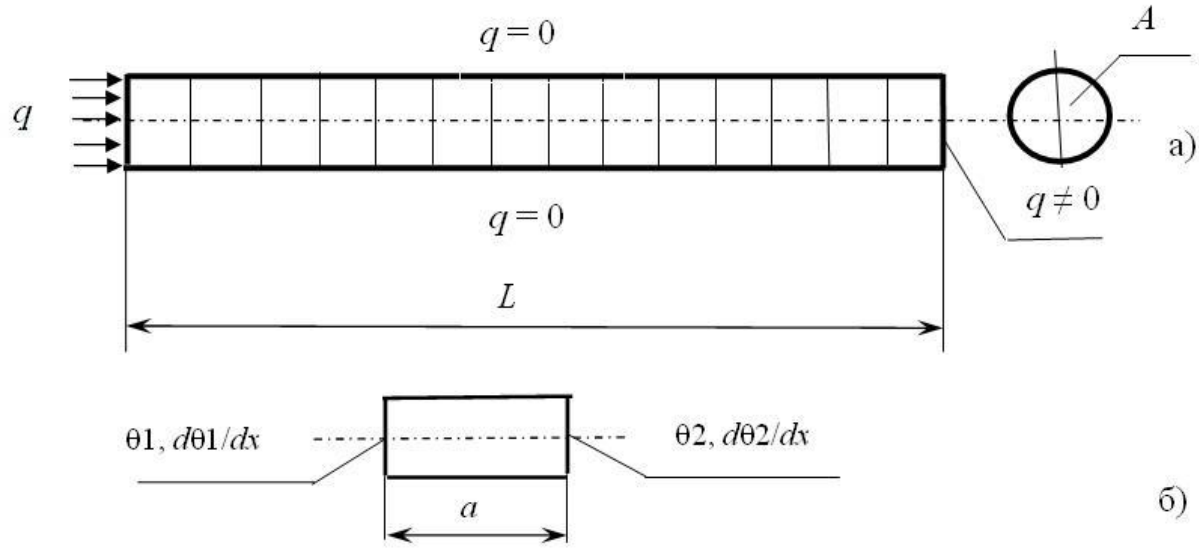


Рис.1. Схема теплового навантаження (а) і скінченний елемент стержня (б)

Вхідні параметри для стержня: модуль пружності матеріалу $\tilde{E} = 10^4(1 + i \cdot 0{,}1)\ кН/см^2$, коефіцієнт теплообміну $h = 10 Вт/(см^2 \cdot К)$, питома теплоємність $\tilde{\lambda} = 15(1 + i \cdot 0{,}1) Дж/(см \cdot К)$, коефіцієнт теплопровідності $kx = 72\ Вт/(см \cdot К)$, коефіцієнт теплового розширення $\alpha = 5 \cdot 10^{-5}\ град^{-1}$, густина матеріалу $\rho = 2{,}8 \cdot 10^{-3}\ кг/см^3$, площа поперечного перерізу стержня $A = 2\ см^2$, довжина скінченного елемента: $a = 1{,}5\ см$, кількість скінченних елементів $j = 50$, максимум імпульсу температури $T_{\max} = 1000\ град$, час вимірювання процесу $TT = 1{,}2\ с$, кількість поділок часового інтервалу $N = 4096$.

Синтез матриць для скінченно-елементної моделі конструкції проводиться традиційним способом [4].

Для побудови матриці жорсткості скінченного елемента використаємо функції інтерполяції Ерміта:

$$N_1 = 1 - 3\frac{x^2}{a^2} + 2\frac{x^3}{a^3},\ N_2 = x - 2\frac{x^2}{a} + \frac{x^3}{a^2},\ N_3 = 3\frac{x^2}{a^2} - 2\frac{x^3}{a^3},\ N_4 = -\frac{x^2}{a} + \frac{x^3}{a^2}. \quad (11)$$

Матриця жорсткості елемента має вигляд

$$Kel = \frac{\tilde{E}A}{30a}\begin{bmatrix} 36 & 3a & -36 & 3a \\ 3a & 4a^2 & -3a & -a^2 \\ -36 & -3a & 36 & -3a \\ 3a & -a^2 & -3a & 4a^2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Матриця мас:

$$Mel = \rho A\begin{bmatrix} \frac{13a}{35} & \frac{11a^2}{210} & \frac{9a}{70} & \frac{13a^2}{420} \\ \frac{11a^2}{210} & \frac{a^3}{105} & \frac{13a^2}{420} & \frac{-a^3}{140} \\ \frac{9a}{70} & \frac{13a^2}{420} & \frac{13a}{35} & \frac{-11a^2}{210} \\ \frac{13a^2}{420} & \frac{-a^3}{140} & \frac{-11a^2}{210} & \frac{a^3}{105} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Матриця теплоємності:

$$\tilde{C}el = \tilde{\lambda}A\begin{bmatrix} \frac{13a}{35} & \frac{11a^2}{210} & \frac{9a}{70} & \frac{13a^2}{420} \\ \frac{11a^2}{210} & \frac{a^3}{105} & \frac{13a^2}{420} & \frac{-a^3}{140} \\ \frac{9a}{70} & \frac{13a^2}{420} & \frac{13a}{35} & \frac{-11a^2}{210} \\ \frac{13a^2}{420} & \frac{-a^3}{140} & \frac{-11a^2}{210} & \frac{a^3}{105} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Матриця теплопровідності:

$$K_{xel} = k_x A\begin{bmatrix} \frac{6}{5a} & \frac{1}{10} & \frac{-6}{5a} & \frac{1}{10} \\ \frac{1}{10} & \frac{2a}{15} & \frac{-1}{10} & \frac{-a}{30} \\ \frac{-6}{5a} & \frac{-1}{10} & \frac{6}{5a} & \frac{-1}{10} \\ \frac{-a}{30} & \frac{-a}{30} & \frac{-1}{10} & \frac{2a}{15} \end{bmatrix} + Ah\begin{bmatrix} \frac{13a}{35} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Матриця теплового навантаження:

$$F_h = hA\theta_{\max}\begin{bmatrix} a/2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Форма теплового навантаження на торець стрижня (рис. 2):

$$F1(s) = \sin\left(\pi \cdot \frac{s}{T1 \cdot 2}\right) \cdot h \cdot T_{\max} \cdot A \cdot \frac{a_{20}}{2},$$

$$T1 = 0,01\,c, \quad T_{\max} = 1000\ ^{\circ}C.$$

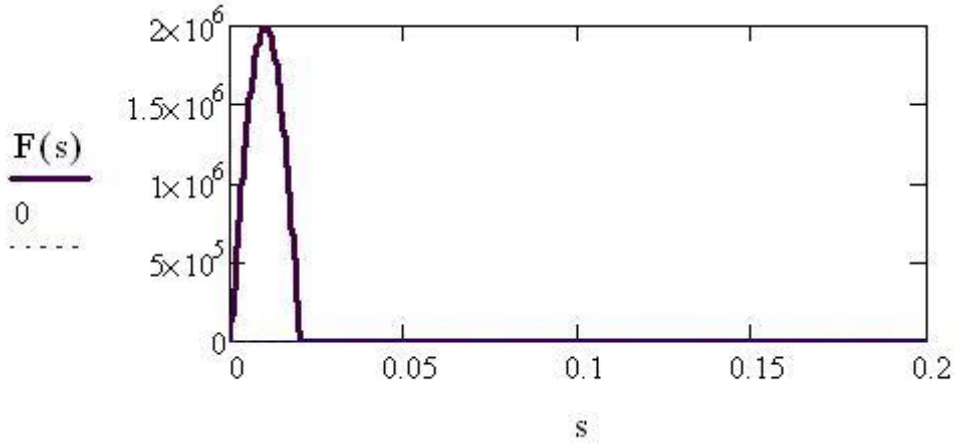


Рис. 2. Форма теплового імпульсу

Після прямого перетворення Фур'є теплового навантаження і підстановки у рівняння нестаціонарного нагріву (5) одержимо рівняння для визначення зображень температурного поля у вузлових точках стержня.

$$\tilde{\theta} = (i\omega \tilde{C}_{\theta} + K_{\theta})^{-1} \tilde{F}_{\theta}. \tag{17}$$

Застосовуючи до одержаного розв'язку операцію оберненого перетворення Фур'є, одержимо розподілення температури у перерізах стержня залежно від часу (рис. 3).

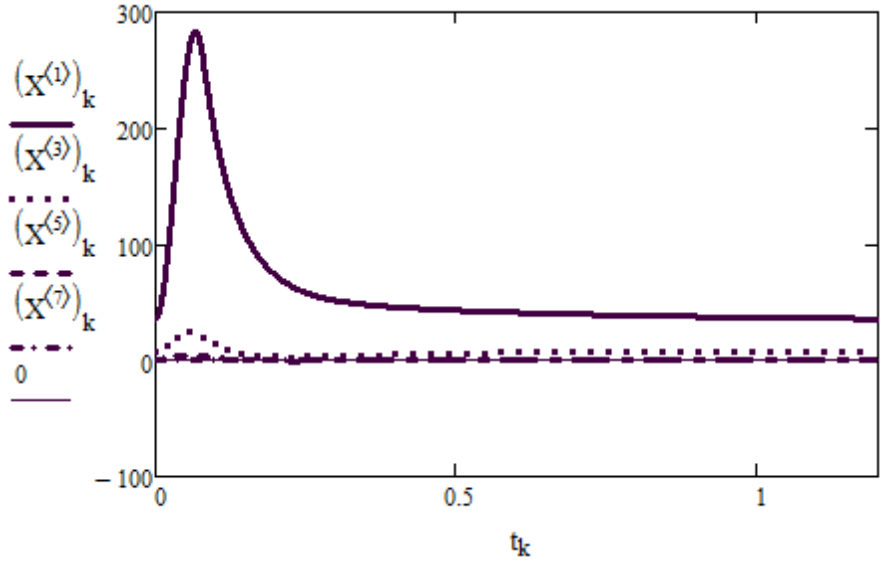


Рис. 3. Розподілення температури у 1, 3, 5, 7 перерізах у початкові моменти часу

Силові навантаження, які виникають при цьому, пов'язані з появою температурних деформацій, знаходимо за формулою

$$\tilde{F}_{\theta} = \int_{V} (AN)^{T} \tilde{C}(i\omega)\varepsilon_0 dV \tag{18}$$

після підстановки деформації ε_0 як функції температури у кожному елементі та інтегрування за об'ємом кожного елемента.

Якщо кінцевою метою є визначення переміщень і сил у поперечних перерізах стрижня, далі використовується скінченно-елементна модель стержня, побудована під час аналізу теплового поля у просторі інтегральних перетворень Фур'є за звичною методикою МСЕ, тобто складаються глобальні матриці жорсткості та мас, і шукається розв'язок рівняння

$$(\tilde{K}(i\omega)-(i\omega)^2 M)\tilde{q}=\tilde{F}_\theta, \qquad (19)$$

після чого за допомогою швидкого перетворення Фур'є визначаються вузлові сили і переміщення.

Нижче на рис. 4 наведено результати розрахунку поздовжніх переміщень декількох перших перерізів стрижня залежно від часу.

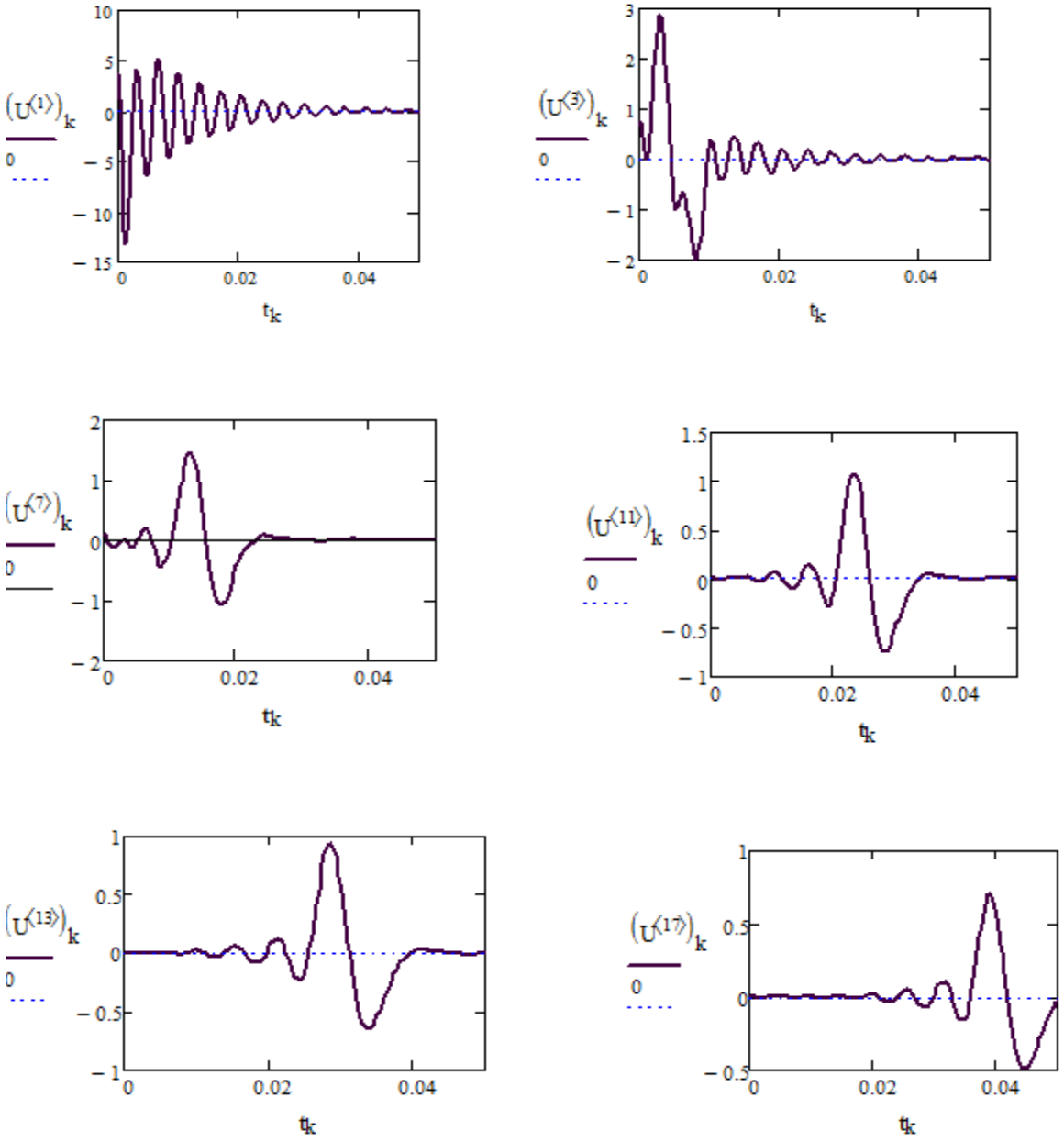


Рис. 4. Осцилограми поздовжніх переміщень 1, 3, 7, 11, 13, 17 перерізів

Як видно з осцилограм, під час прикладення теплового імпульсу відбувається хвильове переміщення перерізів з одночасним затуханням величини імпульсу при проходженні по стержню.

Висновки. Наведений приклад показує можливість аналізу за допомогою запропонованого методу переміщень і зусиль, пов'язаних із дією короткочасних температурних імпульсів. Можливо, що наведену методику можна застосувати і у випадках складного напруженого стану, зокрема для тонкостінних елементів конструкцій.

Алгоритм розрахунку в'язкопружних конструкцій на короткочасне теплове навантаження (тепловий удар) складається з таких кроків:

– побудова скінченно-елементної моделі конструкції для визначення нестаціонарного поля температур у просторі інтегральних перетворень Фур'є;

– визначення зображень температур у вузлових точках скінченно-елементної моделі;

– визначення зображень навантажень, пов'язаних з температурами у вузлових точках скінченно-елементної моделі;

– розв'язання задачі визначення зображень переміщень у вузлових точках скінченно-елементної моделі;

– визначення переміщень і зусиль у вузлових точках завдяки застосуванню оберненого чисельного перетворення Фур'є;

– за необхідності після другого етапу за допомогою оберненого перетворення Фур'є можна визначити розподілення температур.

Список використаних джерел

1. *Карнаухов В. Г.* Вынужденные гармонические колебания и диссипативный разогрев вязкоупругих тонкостенных элементов (обзор) / В. Г. Карнаухов, И. Ф. Киричок // Прикл. механика. – 2000. – № 2. – С. 39–63.

2. *Дубенец В. Г.* Колебания демпфированных композитных конструкций / В. Г. Дубенец, В. В. Хильчевский. – К. : Вища школа, 1995. – Т. 1. – 210 с.

3. *Кристенсен Р.* Введение в теорию вязкоупругости / Р. Кристенсен. – М. : Мир, 1974. – 338 с.

4. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 392 с.

УДК 685.34.05

Д.А. Макатьора, асистент
І.В. Панасюк, д-р техн. наук
Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ПОГОННОГО ЗУСИЛЛЯ РІЗАННЯ МОНОЛІТНОЇ ГУМИ НОЖЕМ З ОДНОСТОРОННЬОЮ ЗАТОЧКОЮ

Д.А. Макатёра, ассистент
И.В. Панасюк, д-р техн. наук
Киевский национальный университет технологий и дизайну, г. Киев, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГОННОГО УСИЛИЯ РЕЗАНИЯ МОНОЛИТНОЙ РЕЗИНЫ НОЖОМ С ОДНОСТОРОННЕЙ ЗАТОЧКОЙ

Dmytro Makatora, assistant
Ihor Panasyuk, Doctor of Technical Sciences
Kyiv National University of Technological and Design, Kyiv, Ukraine

DETERMINATION OF LINEAR FORCE OF MONOLITHIC RUBBER CUTTING BY THE KNIFE WITH ONE-SIDED GRINDING

Метою цього дослідження є розроблення більш простого та ефективного методу аналізу впливу величини зазору між валиками і величиною відстані від вертикальної осі обертання валиків до кромки леза ножа на погонне зусилля різання монолітної гуми за допомогою використання рівнянь регресії. Дослідження проведені на прикладі експериментальної установки машини для повздовжнього різання при використанні ножа з односторонньою заточкою. Одержані рівняння регресії описують сумарну величину втрат при поздовжньому різанні матеріалу та величину втрат на тертя матеріалу об грані нерухомого ножа з односторонньою заточкою.

Ключові слова: *погонне зусилля, сумарна величина втрат, втрати на тертя матеріалу, валики, кромка леза ножа.*

Целью данного исследования является разработка более простого и эффективного метода анализа влияния величины зазора между валиками и величиной расстояния от вертикальной оси вращения валиков до кромки лезвия ножа на погонное усилие резания монолитной резины путем использования уравнений регрессии. Исследования проведены на примере экспериментальной установки машины для продольного резания при использовании ножа с односторонней заточкой. Полученные уравнения регрессии описывают суммарную величину потерь при продольном резании материала и величину потерь на трение материала о грани неподвижного ножа с односторонней заточкой.

Ключевые слова: *погонное усилие, суммарная величина потерь, потери на трение материала, валики, кромка лезвия ножа.*

The purpose of this study is to develop a simple and effective evaluation method of the impact the gap between the rollers and the value of the distance from the vertical axis of rollers rotation to the edge of the knife blade have on linear force of monolithic rubber cutting by using regression equations. The research has been conducted by the example of the experimental setup of the cutting machine for longitudinal using a knife with one-sided grinding. The received results of regression equation describeboth the total value of loss during the longitudinal cut of the material and the value of loss due to material friction on the brink of a motionless knife with one-sided grinding.

Key words: *linear force, the total value of losses, the loss due to material friction, rollers, knife blade edge.*

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку машинобудування, коли увага все більше приділяється підвищенню якості оброблення деталі і зниженню енергетичних витрат, питання дослідження взаємодії валкового механізму леза ножа з матеріалом деталі при процесі повздовжнього різання займають першочергове значення [1]. При цьому особливої уваги заслуговують питання визначення погонного зусилля різання монолітної гуми під час використання ножа з односторонньою та двосторонньою заточками, а також порівняння сумарної величини втрат при поздовжньому різанні матеріалу під час використання ножів різних геометричних форм. Однак вирішення цієї проблеми є складним. Доцільніше поставлене завдання вирішувати з використанням обчислювальної техніки, застосовуючи експериментальний шлях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Порівняння ножів різної геометричної форми, яке було проведено в роботі [2], показало, що використання леза ножа з односторонньою заточкою дозволяє знизити силу опору просування розділених деталей у порівнянні з двостороннім заточуванням, що, у свою чергу, знизить енергетичні витрати на процес поздовжнього різання при двоїнні і вирівнюванні матеріалу. Автори робіт [3–6] дослідили взаємодію валкового механізму і леза ножа з двосторонньою заточкою та в роботі [3] визначили погонне зусилля монолітної гуми під час використання ножа з двосторонньою заточкою.

Виділення не вирішеної раніше частини загальної проблеми. Актуальним питанням залишається визначення погонного зусилля різання монолітної гуми під час використання ножа з односторонньою заточкою та порівняння сумарної величини втрат при поздовжньому різанні матеріалу під час використання ножів різних геометричних форм.

Мета статті. Головною метою роботи є експериментальне визначення сумарних величин втрат та величини втрат на тертя матеріалу, розрахування погонного зусилля різання монолітної гуми ножем з односторонньою заточкою, а також порівняння сумарної величини втрат при поздовжньому різанні матеріалу під час використання ножів різних геометричних форм.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження як завершальна стадія проектування машин для поздовжнього різання проводяться для визначення сумарної величини витрат на оброблення матеріалу та величини витрат на тертя з метою визначення погонного зусилля різання монолітної гуми під час використання ножа з односторонньою заточкою.

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 якій у ході її розрізання визначається сумарна величина витрат на оброблення (P), а потім після розрізання матеріал складають разом, пропускають площиною з'єднання через ніж та визначають величину витрат на тертя (F). Таким чином, лише різниця цих значень, віднесена до величини ширини деталі (B), дає змогу визначити величину погонного зусилля різання монолітної гуми [7]:

$$q_p = \frac{P - F}{B}. \quad (1)$$

Планування експерименту проводилося з використанням ротатабельного плану Бокса для двофакторного експерименту ($k_{1,2} = 2$), який рекомендується при $k_{1,2} \le 5$ [8].

Загальна кількість дослідів визначається за формулою [8]:

$$N_{1,2} = 2^2 + 2 \cdot 2 + 5 = 13.$$

Кодування, іменування значення факторів та інтервали їх варіювання наведені в табл. 1, значення яких визначалися за допомогою співвідношень:

$$x_1 = \frac{x_i - 4{,}35}{1}; \; x_2 = \frac{x_j - 5}{0{,}5}. \quad (2)$$

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	
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)	4,3	4,5	5	5,5	5,7	0,5

Проведемо оброблення даних експерименту з визначення сумарної величини втрат при поздовжньому різанні матеріалу. Матриця планування двофакторного експерименту представлена в табл. 2.

Таблиця 2

Матриця планування двофакторного експерименту визначення сумарної величини втрат при поздовжньому різанні матеріалу

Номер досліду	Матриця планування		Робоча матриця			Дані до розрахунку	
1	2	3	4	5	6	7	8
	x_1	x_2	h	a	y_u	y_u	$(y_u - y_u)^2$
1	1	1	5,35	5,5	572	571,28	0,5212
2	-1	1	3,35	5,5	748	746,89	1,2343
3	1	-1	5,35	4,5	824	824,48	0,2314
4	-1	-1	3,35	4,5	856	856,09	0,0085
5	-1,414	0	2,95	5	830	827,94	4,2522
6	1,414	0	5,75	5	684	681,43	6,5948
7	0	-1,414	4,35	4,3	876	872,80	10,2304
8	0	1,414	4,35	5,7	618	616,58	2,0151

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
9	0	0	4,35	5	756	759,38	11,4358
10	0	0	4,35	5	762	759,38	6,8556
11	0	0	4,35	5	758	759,38	1,9090
12	0	0	4,35	5	758	759,38	1,9090
13	0	0	4,35	5	762	759,38	6,8556
					$\sum_{1}^{13} = 9804$	$\sum_{1}^{13} (y_u - \bar{y}_u)^2 = 54,05$	

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) [8]: $S_p = 1{,}118$.

Розрахункове значення критерію Стьюдента в цьому випадку: $t_{розр(P)} = 4{,}0001$.

Порівняння табличного значення критерію Стьюдента для $\alpha_B = 0{,}95$ і $n_1 = 5$ [8] та розрахункового значення показало, що виконується умова: $t_{розр(P)} \geq t_{табл}$.

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) [8]:

$$y_u = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2. \quad (3)$$

Для визначення цих коефіцієнтів використовувалися рівняння (3.32)–(3.35) і дані табл. 3.32 [8] 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: $b_0 = 759{,}38$; $b_1 = -51{,}81$; $b_2 = -90{,}6$; $b_{12} = -36{,}0$; $b_{11} = -2{,}35$; $b_{22} = -7{,}35$.

Таким чином, рівняння (3) набуває вигляду:

$$y_u = 759{,}38 - 51{,}81 x_1 - 90{,}6 x_2 - 36 x_1 x_2 - 2{,}35 x_1^2 - 7{,}35 x_2^2. \quad (4)$$

Гіпотеза про адекватність рівняння (4) перевіряється в такій послідовності.

Оскільки досліди дублювалися тільки в нульовій точці, то дисперсія адекватності згідно з рівнянням (4.48) [8]:

$$S_{ад}^2 = \frac{54{,}05 - 28{,}96}{3} = 8{,}36.$$

Дисперсія відтворюваності для цього випадку визначається за формулою (4.13) [8]:

$$S^2 \{ \} = \frac{28{,}96}{4} = 7{,}24.$$

Знаючи число ступенів свободи для більшої ($f_{ад} = 3$) і меншої ($f_e = 4$) дисперсії [8], табличне значення критерію Фішера для 95%-ної довірчої ймовірності: $F_{табл} = 6{,}59$.

Розрахункове значення критерію Фішера згідно з формулою (4.35) [8]:

$$F_{розр(P)} = \frac{8{,}36}{7{,}24} = 1{,}54.$$

Порівняння табличного і розрахункового значень критерію Фішера показало, що рівняння (4) можна вважати адекватним з довірчою ймовірністю $\alpha_B = 0{,}95$, оскільки дотримується умова: $F_{табл} \geq F_{розр(P)}$.

Значущість коефіцієнтів регресії в рівнянні (4) перевіряється з урахуванням рівнянь (4.26)–(4.29) і (4.30)–(4.33) і даних табл. 4.3 [8] 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: $S^2_{b_0} = 0{,}2 \cdot 7{,}24 = 1{,}448$ і $S_{b_0} = 1{,}2$; $S^2_{b_i} = 0{,}125 \cdot 7{,}24 = 0{,}905$ і $S_{b_i} = 0{,}95$;

$S^2_{b_{ii}} = 0{,}1438 \cdot 7{,}24 = 1{,}04$ і $S_{b_{ii}} = 1{,}02$; $S^2_{b_{ij}} = 0{,}25 \cdot 7{,}24 = 1{,}81$ і $S_{b_{ij}} = 1{,}35$.

Звідси із співвідношень (4.26) – (4.29) [8]:

$$\Delta b_0 = \pm 2 \cdot 1{,}2 = \pm 2{,}4;\ \Delta b_i = \pm 2 \cdot 0{,}95 = \pm 1{,}9;\ \Delta b_{ii} = \pm 2 \cdot 1{,}02 = \pm 2{,}04;\ \Delta b_{ij} = \pm 2 \cdot 1{,}35 = \pm 2{,}7.$$

Порівняння абсолютних величин коефіцієнтів регресії рівняння (4) і відповідних похибок в їх оцінюванні показує, що з довірчою ймовірністю 0,95 можна вважати значущими всі коефіцієнти.

Рівняння (4) є рівнянням регресії, що описує сумарну величину втрат під час виконання поздовжнього різання матеріалу нерухомим ножем залежно від відстані між транспортуючими валиками (x_1) і відстані між вертикальною віссю обертання транспортуючих валиків та кромкою леза ножа (x_2).

Враховуючи вирази (2), перейдемо до іменованих величин:

$$y_u = 759{,}38 - 51{,}81(a - 4{,}35) - 90{,}6\left(\frac{a-5}{0{,}5}\right) - 36(a - 4{,}35)\left(\frac{a-5}{0{,}5}\right) - 2{,}35(a - 4{,}35)^2 - 7{,}35\left(\frac{a-5}{0{,}5}\right)^2.$$

Після спрощення рівняння набуває вигляду:

$$y_u = 328{,}64h - 455{,}1 + 426a - 72ah - 2{,}35h^2 - 29{,}4a^2. \quad (5)$$

Отриманий вираз (5) – експериментальна математична модель залежності величини сумарних втрат під час виконання поздовжнього 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 по 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	1	1	5,35	5,5	490	494,91	24,1359
2	-1	1	3,35	5,5	642	640,38	2,6120
3	1	-1	5,35	4,5	712	712,85	0,7307
4	-1	-1	3,35	4,5	736	730,33	32,1962
5	-1,414	0	2,95	5	708	710,71	7,3700
6	1,414	0	5,75	5	602	595,51	42,0580
7	0	-1,414	4,35	4,3	744	744,96	0,9255
8	0	1,414	4,35	5,7	532	527,29	22,2024
9	0	0	4,35	5	642	646,56	20,7589
10	0	0	4,35	5	648	646,56	2,0846
11	0	0	4,35	5	650	646,56	11,8598
12	0	0	4,35	5	646	646,56	0,3094
13	0	0	4,35	5	646	646,56	0,3094
					$\sum_1^{13} = 8398$		$\sum_1^{13}(y_u - \bar{y}_u)^2 = 167{,}55$

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) [8]: $S_p = 1{,}118$.

Розрахункове значення критерію Стьюдента в цьому випадку: $t_{розр(P)} = 4{,}0001$.

Порівняння табличного значення критерію Стьюдента для $\alpha_B = 0{,}95$ і $n_1 = 5$ [8] і розрахункового значення показало, що виконується умова: $t_{розр(P)} \geq t_{табл}$.

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 [8] для двофакторного експерименту: $b_0 = 646{,}56$; $b_1 = -40{,}74$; $b_2 = -76{,}97$; $b_{12} = -32$; $b_{11} = 3{,}28$; $b_{22} = -5{,}22$.

Таким чином, рівняння (3) набуває вигляду:

$$y_u = 646{,}56 - 40{,}74x_1 - 76{,}97x_2 - 32x_1x_2 + 3{,}28\chi_1^2 - 5{,}22x_2^2. \qquad (6)$$

Гіпотеза про адекватність рівняння (6) перевіряється відповідно до вищевикладеної методики.

Дисперсія адекватності:

$$S_{ad}^2 = \frac{167{,}55 - 35{,}32}{3} = 44{,}08.$$

Дисперсія відтворюваності для цього випадку:

$$S^2_{\{y\}} = \frac{35{,}32}{4} = 8{,}83.$$

Розрахункове значення критерію Фішера:

$$F_{розр(F)} = \frac{44{,}08}{8{,}83} = 4{,}99.$$

Порівняння табличного і розрахункового значень критерію Фішера показало, що рівняння (6) можна вважати адекватним з довірчою ймовірністю $\alpha_B = 0{,}95$, оскільки дотримується умова: $F_{табл} \geq F_{розр(P)}$.

Значущість коефіцієнтів регресії в рівнянні (6) перевіряли аналогічно викладеній методиці.

Отже: $S^2_{\{b_0\}} = 0{,}2 \cdot 8{,}83 = 1{,}766$ і $S_{\{b_0\}} = 1{,}33$; $S^2_{\{b_1\}} = 0{,}125 \cdot 8{,}83 = 1{,}104$ і $S_{\{b_1\}} = 1{,}05$; $S^2_{\{b_{12}\}} = 0{,}1438 \cdot 8{,}83 = 1{,}27$ і $S_{\{b_{12}\}} = 1{,}127$; $S^2_{\{b_{ij}\}} = 0{,}25 \cdot 8{,}83 = 2{,}208$ і $S_{\{b_{ij}\}} = 1{,}49$.

Звідси із співвідношень (4.26) – (4.29) [8]:

$$\Delta b_0 = \pm 2 \cdot 1{,}33 = \pm 2{,}66;\ \Delta b_i = \pm 2 \cdot 1{,}05 = \pm 2{,}1;\ \Delta b_{ii} = \pm 2 \cdot 1{,}127 = \pm 2{,}254;\ \Delta b_{ij} = \pm 2 \cdot 1{,}49 = \pm 2{,}98.$$

Порівняння абсолютних величин коефіцієнтів регресії рівняння (6) і відповідних похибок щодо їх оцінювання показує, що з довірчою ймовірністю 0,95 можна вважати значущими всі коефіцієнти.

Рівняння (6) є рівнянням регресії, що описує сумарну величину втрат під час виконання поздовжнього 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:

$$y_u = 646{,}56 - 40{,}74(h - 4{,}35) - 76{,}97\left(\frac{a-5}{0{,}5}\right) - 32(h - 4{,}35)\left(\frac{a-5}{0{,}5}\right) + 3{,}28(h - 4{,}35)^2 - 5{,}22\left(\frac{a-5}{0{,}5}\right)^2.$$

Після спрощення рівняння набуває вигляду:

$$y_u = 250{,}72h - 257{,}86 + 333{,}26a - 64ah + 3{,}28h^2 - 20{,}88a^2. \quad (7)$$

Отриманий вираз (8) – експериментальна математична модель залежності величини втрат на тертя матеріалу об грані нерухомого ножа під час виконання поздовжнього 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 монолітної гуми (1). Підставляючи значення в рівняння (1), отримаємо середнє значення погонного зусилля монолітної гуми: $q_p = 3{,}22\,\frac{H}{мм}$.

Відхилення від отриманих раніше значень роботи [4] становлять $\Delta = 1{,}6\,\%$.

Порівнюючи сумарні величини втрат при поздовжньому різанні матеріалу під час використання ножа з двосторонньою заточкою (отримані автором у роботі [4]) та при використанні ножа з односторонньою заточкою, отримаємо: $\Delta P = \frac{991{,}04 - 759{,}38}{991{,}04} = 23{,}4\,\%$.

Визначене відхилення свідчить, що під час виконання операції поздовжнього різання матеріалу доцільно використовувати лезо ножа з односторонньою заточкою, що дозволить знизити сумарні величини втрат у порівнянні з двостороннім заточуванням, що, у свою чергу, знизить енергетичні витрати на процес.

Висновки та пропозиції. Отримані рівняння регресії описують сумарну величину втрат при поздовжньому різанні матеріалу та величину втрат на тертя матеріалу об грані нерухомого ножа з односторонньою заточкою. Порівняння сумарних величин втрат при поздовжньому різанні матеріалу ножами різних геометричних форм (з односторонньою та двосторонньою заточкою) дозволяє зробити висновки, що під час проектування машин для двоїння та вирівнювання деталей низу взуття по товщині доцільно обирати лезо ножа з односторонньою заточкою, що дозволить знизити енергетичні витрати на процес.

Список використаних джерел

1. *Князєв В. І.* Визначення похибки обробки при двоїнні деталей низу взуття / В. І. Князєв, В. С. Чорно-Іванов // Легка промисловість. –1997. – № 1. – С. 59.

2. *Макатьора Д. А.* Аналіз раціонального положення ножа та форми його поперечного перерізу в машинах типу “ДН” / Д. А. Макатьора, В. І. Князєв // Вісник КНУТД. – 2004. – № 1. – С. 159–163.

3. *Макатьора Д. А.* Визначення погонного зусилля різання мікропористої гуми ножем з двосторонньою заточкою / Д. А. Макатьора // Вісник ЧДТУ. – 2013. – № 2 (65). – С. 92–97.

4. *Чорно-Іванов В. С.* Розробка механізму повздовжнього різання деталей низу взуття : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.10 / В. С. Чорно-Іванов. – К., 1998. – 18 с.

5. *Макатьора Д. А.* Визначення погонного зусилля різання монолітної гуми ножем з двосторонньою заточкою / Д. А. Макатьора, І. В. Панасюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – № 1. – С. 31–35.

6. *Макатьора Д. А.* Визначення погонного зусилля різання повсті ножем з двосторонньою заточкою / Д. А. Макатьора, І. В. Панасюк // Вісник КНУТД. – 2014. – № 1 (75). – С. 41–48.

7. *Деклараційний* патент (України) 70012А. Спосіб визначення потужності, що витрачається на повздовжнє різання матеріалу / Д. А. Макатьора, В. І. Князєв ; опубл. 2004, Бюл. № 9.

8. *Тихомиров В. Б.* Планирование и анализ эксперимента / В. Б. Тихомиров. – М. : Легкая индустрия, 1974. – 262 с.

UDC 534.1: 539.3

Vitalii Dubenets, Doctor of Technical Sciences
Olena Savchenko, PhD in Technical Sciences
Oleh Derkach, PhD student
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

ACTIVE DAMPING OF NONSTATIONARY VIBRATIONS IN A BEAM WITH ELECTRO-VISCOELASTIC PATCHES

В.Г. Дубенець, д-р техн. наук
О.В. Савченко, канд. техн. наук
О.Л. Деркач, аспірант
Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

АКТИВНЕ ДЕМПФІРУВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ КОЛИВАНЬ БАЛКИ З ЕЛЕКТРОВ'ЯЗКОПРУЖНИМИ НАКЛАДКАМИ

В.Г. Дубенец, д-р техн. наук
Е.В. Савченко, канд. техн. наук
О.Л. Деркач, аспирант
Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

АКТИВНОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ КОЛЕБАНИЙ БАЛКИ С ЭЛЕКТРОВЯЗКОУПРУГИМИ НАКЛАДКАМИ

The technique of finite element modeling in integral Fourier transform frequency space is applied to the problem of active damping of nonstationary vibration in a beam with piezoelectric patches. The optimal value of a feedback control parameter by maximum damping criterion is found.

Key words: *non-stationary vibrations, active damping, smart constructions, Fourier transformation.*

Для вирішення завдання активного демпфірування нестаціонарних коливань балки з п'єзоелектричними накладками застосовано методику скінченно-елементного моделювання у частотному просторі інтегральних перетворень Фур'є. Знайдено оптимальне значення керуючого параметра зворотного зв'язку за критерієм максимального демпфірування.

Ключові слова: *нестаціонарні коливання, активне демпфірування, smart-конструкція, перетворення Фур'є.*

Для решения задачи активного демпфирования нестационарных колебаний балки с пьезоэлектрическими накладками применена методика конечно-элементного моделирования в частотном пространстве интегральных преобразований Фурье. Проведен поиск оптимального значения параметра обратной связи по критерию максимального демпфирования.

Ключевые слова: *нестационарные колебания, активное демпфирование, smart-конструкция, преобразование Фурье.*

Introduction. The passive damping of nonstationary vibration in a beam with electroviscoelastic dissipative patches was studied in [1]. The application of piezoelectric elements with connected electric circuits (RL-shunts) was shown to decrease the reaction of structures to the impact of nonstationary loads. Dissipation of the vibration energy is conducted at the electropassive elements (sensors) and RL-shunts due to conversion of electric energy into heat.

In recent years the methods of active damping using active and passive piezoelectric elements – sensors and actuators [2–7], became intensively employed for damping of vibration in thin-shelled structure elements. Different modes of applying voltage to the active elements to effect the structure are being used. In particular, the calculated beforehand potential difference is applied using a control device to the actuator, to compensate vibration on a specific frequency [5–7].

The adjusting of the potential difference on the electrodes of the actuator φ_a can be done considering the indications of sensor φ_s. In fig. 1 the schematic circuit of connecting a sensor and an actuator that have reverse polarization in a circuit of negative feedback is shown. Aside from this scheme, an RL-shunt is connected to the passive piezoelectric elements of the viscoelastic material PVDF.

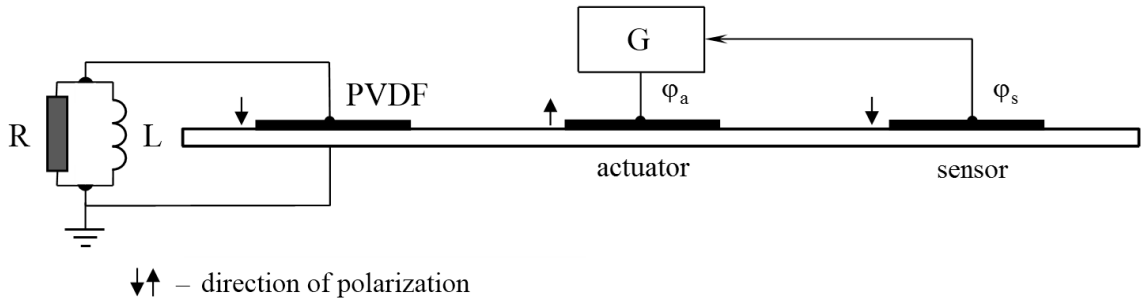


Fig. 1. Schematic circuit of active damping of a structure fragment

Different algorithms of feedback are considered in [6]. In this paper the actuator potential is governed by the rule:

$$\varphi_a = -G\dot{\varphi}_s, \tag{1}$$

where G is a coefficient of amplifying the derivative of a sensor potential by time (control parameter). This coefficient influences the inertial and dissipative characteristics of a beam.

To efficiently implement the active control of vibration, a particularly important issue is to consider the dissipation of energy by methods that are based on real physical dependencies for structure materials and piezoelectric materials. The existing papers on vibration control mostly omit these dependencies for several reasons. However, the experiments [8] prove that passive and active piezoelectric elements under dynamic loads behave as viscoelastic materials. It is shown in [9; 10] that the analysis of nonstationary vibration in imperfectly elastic structures can be efficiently conducted by the frequency finite element method (FFEM) [11], which performs the synthesis of structures and the analysis of vibration in Fourier integral transform space. The advantages of this method are the capability to take into account the dependencies of the linear theory of hereditary environments, including the correct introduction of frequency-dependent complex modules, and the capability to analyze nonstationary vibration with given initial conditions. The conversion to frequency space also significantly simplifies the synthesis of structures from piezoelectric materials.

Mathematical model. The complexity of problems requires the application of approximate methods. The synthesis of the finite element beam model with passive electroviscoelastic patches was conducted by the FFEM [1]. In case of active vibration control, the finite element version of differential equations for balance and quasi-static equations of linear electroelasticity is supplemented with the equations for the sensor (s) and the actuator (a). The dynamics equations, received by the application of variational Hamilton-Ostrohradsky principle, after the integral Fourier transform will look like the equations of the linear elasticity theory with complex modules:

$$\begin{aligned}
&\omega^2\mathbf{M}\tilde{\mathbf{u}} + \tilde{\mathbf{K}}_u\tilde{\mathbf{u}} + \tilde{\mathbf{K}}^{\mathrm{s}}_{u\varphi}\tilde{\varphi}_{\mathrm{s}} + \tilde{\mathbf{K}}^{\mathrm{a}}_{u\varphi}\tilde{\varphi}_{\mathrm{a}} = \tilde{\mathbf{F}}(\omega) + \mathbf{f},\\
&\tilde{\mathbf{K}}^{\mathrm{s}}_{u\varphi}{}^{T}\tilde{\mathbf{u}} - \tilde{\mathbf{K}}^{\mathrm{s}}_{\varphi}\tilde{\varphi}_{\mathrm{s}} = \tilde{\mathbf{Q}}_{\mathrm{s}}(\omega),\\
&\tilde{\mathbf{K}}^{\mathrm{a}}_{u\varphi}{}^{T}\tilde{\mathbf{u}} + \tilde{\mathbf{K}}^{\mathrm{a}}_{\varphi}\tilde{\varphi}_{\mathrm{a}} = \tilde{\mathbf{Q}}_{a}(\omega),
\end{aligned} \tag{2}$$

where $\mathbf{M}$ and $\tilde{\mathbf{K}}^{\mathrm{s(a)}}_{\varphi}$ are matrices of mass and electric "stiffness" of sensor (actuator) respectively, $\tilde{\mathbf{K}}^{s(a)}_{u\varphi}$ and $\tilde{\mathbf{K}}^{s(a)}_{\varphi u}(\omega) = \tilde{\mathbf{K}}^{s(a)^T}_{u\varphi}(\omega)$ are matrices that correspond to the direct and reverse piezoelectric effect respectively:

$$\mathbf{M} = h\int_0^a\int_0^b \mathbf{N}_u{}^T\rho\mathbf{N}_u\,dydx,\ \tilde{\mathbf{K}}_u(\omega) = h\int_0^a\int_0^b(\mathbf{A}\mathbf{N}_u)^T\tilde{\mathbf{C}}(\omega)(\mathbf{A}\mathbf{N}_u)\,dydx,$$

$$\tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^{s(a)}(\omega) = h\int_0^a\int_0^b (\nabla\mathbf{N}_u)^T \tilde{\mathbf{e}}(\omega)^T \nabla\mathbf{N}_\varphi dydx, \quad \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi}^{s(a)}(\omega) = h\int_0^a\int_0^b (\nabla\mathbf{N}_\varphi)^T \tilde{\boldsymbol{\kappa}}(\omega) \nabla\mathbf{N}_\varphi dydx, \quad (3)$$

$$\tilde{\mathbf{F}}(\omega) = \int_0^\infty\int_0^a\int_0^b \nabla\mathbf{N}_u^T \mathbf{p}(x,y,t)\exp(-i\omega t)dydxdt,$$

$$\tilde{\mathbf{Q}}_{s(a)}(\omega) = \int_0^\infty\int_0^a\int_0^b \nabla\mathbf{N}_\varphi^T \mathbf{q}(x,y,t)\exp(-i\omega t)dydxdt,$$

where $\tilde{\mathbf{C}}(\omega) = \mathbf{C}'(\omega) + i\mathbf{C}''(\omega)$ is the matrix of frequency-dependent complex elastic modules; $\tilde{\mathbf{e}}(\omega) = \mathbf{e}'(\omega) + i\mathbf{e}''(\omega)$, $\tilde{\boldsymbol{\kappa}}(\omega) = \boldsymbol{\kappa}'(\omega) + i\boldsymbol{\kappa}''(\omega)$ are the matrices of complex piezoelectric and dielectric modules respectively; ρ is material density; h is the width of a finite element; $\mathbf{p}(x,y,t) = (p_x \;\; p_y)^T$ is external load $\mathbf{q}(x,y,t) = (q_x \;\; q_y)^T$; $\tilde{\mathbf{F}}(x,y)$ is the Fourier image of external mechanical load; $\tilde{\mathbf{Q}}_{s(a)}(x,y)$ is the image of nodal charges vector; $\tilde{\mathbf{u}}$, $\tilde{\varphi}_{s(a)}$ are the images of mechanical displacements and potentials of a sensor (actuator) in Fourier space respectively; $\mathbf{f} = i\omega\mathbf{M}\dot{\mathbf{u}}(0) + \mathbf{M}\mathbf{u}(0)$, where $\dot{\mathbf{u}}(0)$, $\mathbf{u}(0)$ are the initial velocities and displacements of nodal points respectively; $i = \sqrt{-1}$.

The application of Hamilton-Ostrohradsky variational principle gives the approximate result [12]. The more correct transition method, based on variational equations in convolutions, equations of hereditary viscoelasticity theory and further Fourier transform, is applied in papers [10; 13].

In frequency space the equation (1) becomes:

$$\tilde{\varphi}_a = -i\omega G\tilde{\varphi}_s. \quad (4)$$

The difference of potentials, necessary to apply to the actuator electrodes, is determined from the system (2):

$$\tilde{\varphi}_a = -i\omega G\tilde{\mathbf{K}}_{\varphi}^{s\,-1}\tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^{s\,T}\tilde{\mathbf{u}}. \quad (5)$$

Thus we get an equation in respect to images of mechanical displacements:

$$\tilde{\mathbf{Z}}(\omega)\tilde{\mathbf{u}} = \tilde{\mathbf{F}}(\omega), \quad (6)$$

where $\tilde{\mathbf{Z}}(\omega)$ is a dynamic stiffness matrix

$$\tilde{\mathbf{Z}}(\omega) = -\omega^2\mathbf{M} + \tilde{\mathbf{K}}_u + \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^{s}\left(\tilde{\mathbf{Q}}_s(\omega) + \tilde{\mathbf{K}}_{\varphi}^{s}\right)^{-1}\tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^{s\,T} - i\omega\tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^{a}G\tilde{\mathbf{K}}_{\varphi}^{s\,-1}\tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^{s\,T}. \quad (7)$$

The solution of the linear algebraic system of equations (2) in respect to displacements in frequency space can be written as:

$$\tilde{\mathbf{u}} = \tilde{\mathbf{Z}}(\omega)^{-1}\tilde{\mathbf{F}}(\omega). \quad (8)$$

After we determine the displacements, the return to the time space is done by the discrete reverse Fourier transform, namely the fast Fourier transform (FFT):

$$\mathbf{u} = \mathrm{FFT}^{-1}\left(\tilde{\mathbf{Z}}(\omega)^{-1}\tilde{\mathbf{F}}\right). \quad (9)$$

To analyze the dissipation of vibration energy in a structure, the eigenvectors and eigenvalues of a dynamic stiffness matrix need to be determined from the requirement

$$\left|\tilde{\mathbf{Z}}(\omega)\right| = 0. \quad (10)$$

The decrement is defined by the formula:

$$\Delta = 2\pi \frac{\omega_k''}{\omega_k'}, \tag{11}$$

where ω_k'', ω_k' are the real and imaginary frequencies on the k-th vibration form respectively.

The calculation for a beam with active piezoelectric patches. Let's consider an example of calculating the nonstationary vibration of a beam [1] with active viscoelastic piezoelectric patches.

The beam parameters:

– length $l = 0,7\ m$;

– width $b = 20 \cdot 10^{-3}\ m$;

– the main bearing structure thickness $s = 6 \cdot 10^{-3}\ m$;

– material density $\rho = 2,7 \cdot 10^3\ \frac{kg}{m^3}$;

– the elasticity module of the bearing layer $E = 6,71 \cdot 10^{10} \cdot (1 + i \cdot 0,025)\ \ Pa$.

The patch parameters of the viscoelasic piezocomposite material based on PVDF and PZT:

– patch length $l_p = 0,1 m$;

– width $b_p = 20 \cdot 10^{-3} m$;

– thickness $s_p = 3 \cdot 10^{-3} m$;

– material density $\rho_p = 1,75 \cdot 10^3\ kg/m^3$;

– real and imaginary components of the elasticity modules matrix for the piezoelectric material: $C_{11} = 15,7 \cdot 10^9 \cdot (1 + i \cdot 0,064)\ \ Pa$, $C_{31} = 9,30 \cdot 10^9 \cdot (1 + i \cdot 0,098)\ \ Pa$,

$C_{33} = 13,6 \cdot 10^9 \cdot (1 + i \cdot 0,069)\ \ Pa$, $C_{55} = 2,52 \cdot 10^9 \cdot (1 + i \cdot 0,014)\ \ Pa$;

– piezoelectric modules: $e_{31} = -1,0 \cdot (1 - i \cdot 8,3 \cdot 10^{-3})\ \ C/m^2$, $e_{33} = 1,5\ C/m^2$, $e_{15} = 1,13 \cdot (1 - i \cdot 2,1 \cdot 10^{-3})\ \ C/m^2$;

– the components of dielectric properties matrix: $\kappa_{11}/\kappa_0 = 12,7 \cdot (1 - i \cdot 4,7 \cdot 10^{-3})$, $\kappa_{11}/\kappa_0 = 11,8 \cdot (1 - i \cdot 1,2 \cdot 10^{-3})$, $\kappa_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}\ F/m$.

Parameters of the fast Fourier transform: number of points $N = 1000$ on the time interval $T = 0,4 s$.

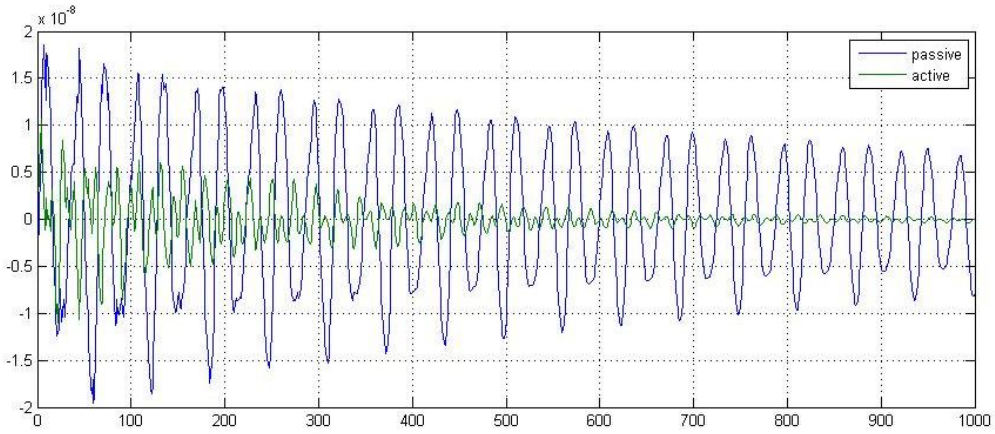
The solution of the problem is considered for two cases:

1) passive damping by RL-shunts. In this case the matrix of dynamic stiffness looks like:

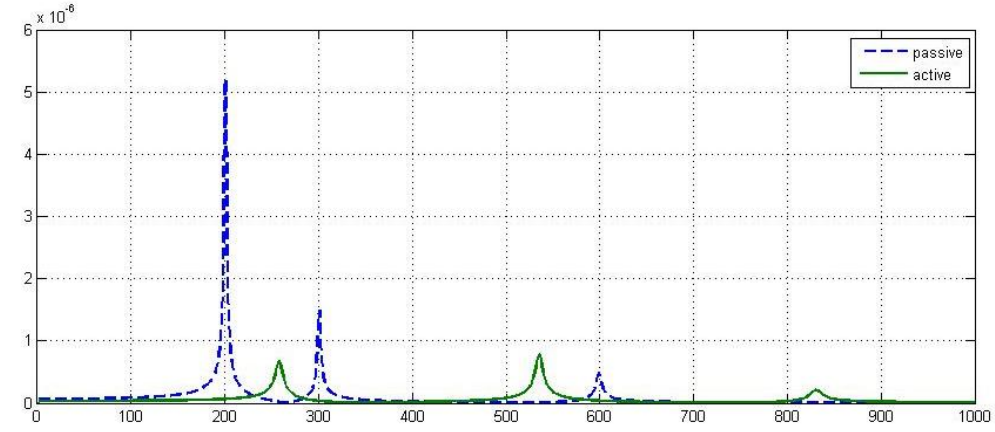
$$\tilde{\mathbf{Z}}(\omega) = -\omega^2 \mathbf{M} + \tilde{\mathbf{K}}_u + \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^s \left(\mathbf{Q}_s(\omega) + \tilde{\mathbf{K}}_\varphi^s\right)^{-1} \tilde{\mathbf{K}}_{u\varphi}^{s\,T}. \tag{12}$$

2) active damping of nonstationary vibration in a beam. In this case the matrix of dynamic stiffness (7) is used.

The reaction of the beam to a shock load is given in fig. 2, *a*. The frequency response is given in fig. 2, *b*.



a



b

Fig. 2. Reaction of the beam to a shock load (a); frequency response (b)

Decrement of nonstationary vibration in case of active damping equals $\Delta = 0{,}0203$.

Optimization of the feedback control parameter. As shown in [13], the choice of optimal parameters for a passive shunt can increase the speed of vibration fading in structures under dynamic loads. Let's consider the problem in case of active damping of nonstationary vibration. This optimization problem lies in calculating the project parameter G by the criterion of maximum damping, taking into account the constraints on characteristics of control devices. The given optimization task can be formulated as a generalized nonlinear programming problem [10]:

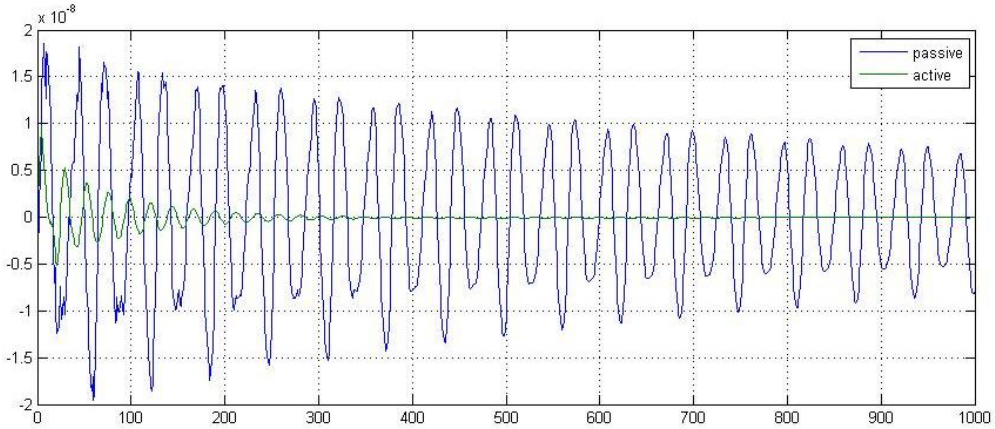
$$\max \Delta(G, u). \tag{13}$$

The constraints for the project parameters

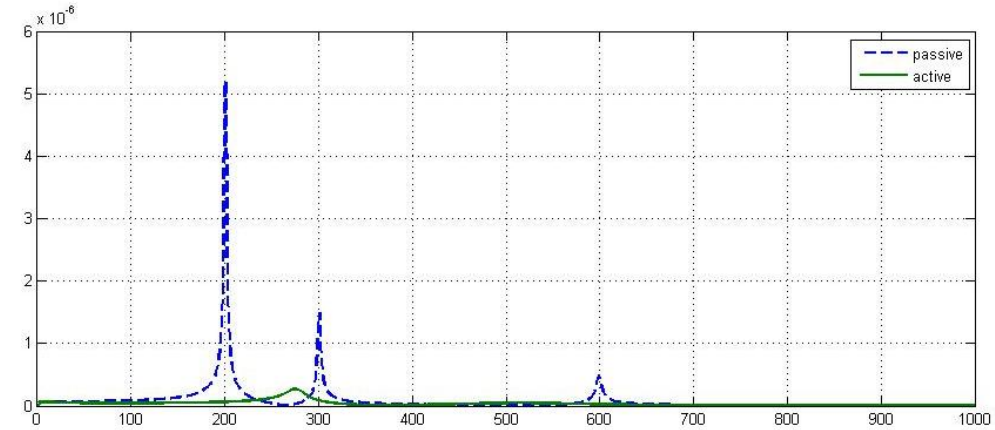
$$G_{\min} \le G \le G_{\max}, \tag{14}$$

are chosen regarding the technical characteristics of devices that implement the selected feedback algorithm.

The optimal goal function value was found in 14 iterations using the *fmincon* program [14]. The reaction of the beam to a shock load and the frequency response for the optimal value G_{opt} are shown in fig. 3.



a



b

Fig. 3. Reaction of the beam to a shock load (a) and frequency response (b) for an optimal value of the amplification coefficient $G_{opt} = 10^{-4}$

The decrement of nonstationary vibration in case of active damping with optimal control parameter G_{opt} equals $\Delta_{opt} = 0{,}4808$.

Conclusions. The results of calculating the nonstationary vibration of a piezoelectric beam with active electroviscoelastic elements lead us to a conclusion that using sensors and actuators, working in opposition, can provide significant decrease of vibration amplitude for a given type of structure. The application of active damping technique allows to change the vibration decrement of a structure by regulating the amplification coefficient G. The efficiency of this technique depends on the accuracy and stability of devices that provide the feedback of sensor and actuator. It is important to note that the optimal value of the control parameter G_{opt} resulted in practically negligible level of resonant beam vibration.

The finite element analysis in Fourier transform space can be applied for studying the behavior of active piezoelectric structures and composites, based on them, under shock loads. The advantages of this technique are the possibility to determine the reactions to external loads and take into account the dependencies between frequency and physical characteristics of a material. The return to the time space is done only at the last step of calculations.

References

1. *Dubenets V. H.* Nonstationary Vibrations of a Beam with Electro-Viscoelastic Dissipative Patches / V. H. Dubenets, O. V. Savchenko, O. L. Derkach // Visnyk of Chernihiv National Technological University. – Chernihiv : Chernihiv National Technological University, 2013. – № 3 (67). – P. 53–61.

2. *Bandyopadhyay B.*, Manjunath T. C., M. Umapathy M. Modeling, Control and Implementation of Smart Structures: A FEM-State Space Approach, Springer, Verlag Berlin Heidelberg (2007).

3. *Kozlov V. I.*, Karnaukhova T. V. Basic Equations for Viscoelastic Laminated Shells with Distributed Piezoelectric Inclusions Intended to Control Nonstationary Vibrations // Int. Appl. Mech. – 2002. – 38, No 10. – P. 1253–1260.

4. *Matveyenko V. P.*, Kligman E. P., Yurlova N. A. Dissipative properties control of mechanical systems based on smart materials with piezoelectric elements// Proc. of the International Conference "New Challenges in mesomechanics". Aalborg, Denmark. – 2002. – V2. – P. 375–380.

5. *Piefort V.* Finite Element Modeling of Piezoelectric Active Structures. Thesis subnutted in candidature for the degree of Doctor in Applied Science (2001).

6. *Tzou H. S.* and Bergman L. A. Dynamics and Control of Distributed Systems, Cambridge University Press, Cambridge (1998).

7. *Zhongdong W.*, Suhan C., Xiaodong Y. Active Vibration Control and Suppression for Integrated Structures // Appl. Math. and Mech. – 1999. – 20, No 2. – P. 171–178.

8. *Shul'ga N. A.* and Bolkisev A. M. Vibrations of Piezoelectric Bodies [in Russian], Naukova Dumka, Kyiv (1990).

9. *Dubenets V. G.* and Khil'chevskii V. V. Oscillations of Damped Composite Structures [in Russian], Vol. 1, Vyshcha Shkola, Kiev (1995).

10. *Savchenko E. V.* Passive Damping of Oscillations of Composite Structures [in Russian], Aspekt-Poligraf, Nezhin (2006).

11. *Dubenets V. H.*, Khil'chevskii V. V. , Savchenko O. V. Basics of finite element method [in Ukranian]. Chernigiv University Press, Chernigiv (2007).

12. *Christensen R. M.* Theory of Viscoelasticity: An Introduction, Academic Press, New York (1971).

13. *Dubenets V. G.*, Savchenko O. V. Optimization of Multilayered Electro-Viscoelastic Plates. Visnyk of Chernigiv State Technological University. – 2013. – 63, No 2. – P. 59–68.

14. *Ketkov L.*, Ketkov, M. Schulz. MATLAB 7: programming, numerical methods [in Russian], BHV-Petersburg, St. Petersburg (2005).

РОЗДІЛ ІІ. МЕХАНОХІМІЯ

УДК 521.359.7

М.Д. Гомеля, д-р техн. наук
І.М. Трус, аспірант
Т.О. Шаблій, канд. техн. наук
НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна

ЕЛЕКТРОДІАЛІЗНЕ ОПРІСНЕННЯ РОЗЧИНІВ З ВИСОКИМ ВМІСТОМ ІОНІВ ЖОРСТКОСТІ

Н.Д. Гомеля, д-р техн. наук
И.Н. Трус, аспирант
Т.А. Шаблий, канд. техн. наук
НТУУ «КПИ», г. Киев, Украина

ЭЛЕКТРОДИАЛИЗНОЕ ОПРЕСНЕНИЕ РАСТВОРОВ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ИОНОВ ЖЕСТКОСТИ

Mykola Homelia, Doctor of Technical Sciences
Inna Trus, PhD student
Tetiana Shablii, PhD in Technical Sciences
NTUU «KPI», Kyiv, Ukraine

ELECTRODIALYSIS DESALINATION OF HIGH-HARDNESS SOLUTIONS

Вивчено процеси електродіалізу під час опріснення концентрованих розчинів солей із високим вмістом іонів жорсткості. Електроліз проводили в трикамерних електролізерах з двома аніонними мембранами МА-41. Показано, що швидкість процесу і вихід за струмом підвищуються у разі збільшення концентрації іонів у розчині. Встановлено, що концентрація лугу в катодній області не впливає на ефективність процесу. Доведено, що додавання магнезиту в розчини з високою жорсткістю під час проведення електролізу сприяє ефективному пом'якшенню води.

Ключові слова: *анод, електродіаліз, катод, концентрат, мембрана, опріснення.*

Изучены процессы электродиализа при опреснении концентрированных растворов солей с высоким содержанием ионов жесткости. Электролиз проводили в трикамерных электролизерах с двумя анионными мембранами МА-41. Показано, что скорость процесса и выход по току повышаются при увеличении концентрации ионов в растворе. Установлено, что концентрация щелочи в катодной области не влияет на эффективность процесса. Доведено, что добавление магнезита в растворы с высокой жесткостью при проведении электролиза способствует эффективному умягчению воды.

Ключевые слова: *анод, электродиализ, катод, концентрат, мембрана, опреснение.*

Processes of electrodialysis in desalting concentrated high-hardness salt solutions were studied. Electrodialysis was conducted in three-chambered electrolyzer with two anionite membranes MA-41. It is shown that speed of the process and faraday efficiency rise with the increase of ion concentration in the solution. Alkali concentration in cathode region has no influence on the process effectiveness. It is proved that magnesit adding into the high-hardness solution, when performing electrodialysis, contribute to effective water softening.

Key words: *anode, electrodialysis, concentrate, cathode, membrane, desalination.*

Вступ. Незважаючи на значний прогрес у галузі досліджень процесів очищення води, створення досконалого обладнання для водопідготовки та очищення стічних вод, рівень забрудненості природних водойм постійно зростає. Це стосується не лише України, але і багатьох країн світу. Особливо гостро стоїть проблема підвищення рівня мінералізації води.

Так, на сьогодні розроблені досконалі установки баромембранного, електродіалізного, іонообмінного та термічного опріснення води. Проте проблему переробки концентрованих сольових розчинів економічно доцільними методами не вирішено. Не вирішує проблему і випарювання розчинів солей до сухого стану. Незважаючи на значні енерговитрати під час випарювання розчинів, ще більші затрати виникають у разі захоронення мінеральних солей у спеціально обладнаних сховищах. Розміщення сухих залишків мінеральних солей на звичайних звалищах недопустиме згідно з чинним екологічним законодавством.

Реагентне вилучення сульфатів із стічних вод та концентратів баромембранного очищення води [1; 2] передбачає використання вапна та дорогих високоосновних коагулянтів. Такий метод не ефективний при високому вмісті хлоридів та іонів натрію чи інших одновалентних металів. Більш перспективним є електрохімічне опріснення концентрованих розчинів. Під час застосування електродіалізних мембран можлива їх переробка з отриманням розчинів кислоти та лугу [3–5]. Проте процеси електролізу та електродіалізу суттєво ускладнюються за наявності в розчинах іонів жорсткості [6; 7].

Метою цієї роботи було створення електролізера, що забезпечує ефективну демінералізацію концентрованих розчинів солей із високим вмістом іонів жорсткості та вивчення процесів електродіалізу у разі опріснення концентратів баромембранного знесолення води.

Методика експерименту. За аналогією з роботою [5], де для запобігання міграції хлоридів в анодну область зі сторони аноду розмістили катіонну мембрану, в цій роботі для запобігання міграції іонів жорсткості в катодну область зі сторони катоду розмістили аніонну мембрану МА-41. Зі сторони анода також розмістили аніонну мембрану МА-41. У просторі між мембранами (V=0,2 дм^3) розміщали робочий розчин. Анодну область заповнювали 0,05Н розчином сірчаної кислоти, катодну – 0,150, 0,283 та 1,000 Н розчинами лугу. Катод – пластина з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т. Анод – титанова пластина, покрита оксидом рутенію. Площа електродів $S_K = S_A = 0{,}20$ дм^3. Електроліз проводили при силі струму 0,1-0,2 А при напрузі 15-19 В.

Під час проведення електролізу через однакові проміжки часу контролювали лужність у катодній та робочій зоні, вміст хлоридів, сульфатів, кальцію, жорсткість у робочій зоні, концентрацію хлоридів та сульфатів в анодній області. Робочий розчин перед аналізом очищали від осаду фільтруванням на паперовому фільтрі «синя стрічка».

Вихід за струмом розраховували як співвідношення реальної кількості видалених з розчину хлоридів та сульфатів до теоретично розрахованої за законом Фарадея [6].

Результати досліджень та їх обговорення. Для ефективного пом'якшення оброблюваних розчинів в окремих дослідах у робочі розчини додавали магнезит пропорційно різниці між кількістю іонів кальцію та лужністю вихідного розчину. При цьому відбувалось пом'якшення води за рахунок її підлуження при дифузії гідроксид аніонів з катодної області. Процеси пом'якшення можна описати рівняннями:

$$Mg^{2+} + 2OH^- \leftrightarrow Mg(OH)_2\downarrow, \quad (1)$$

$$Ca^{2+} + HCO_3^- + OH^- \leftrightarrow CaCO_3\downarrow + H_2O, \quad (2)$$

$$Ca^{2+} + MgCO_3 + 2OH^- \leftrightarrow CaCO_3\downarrow + Mg(OH)_2\downarrow + H_2O. \quad (3)$$

Результати демінералізації модельного розчину ([SO_4^{2-}] = 335 мг/дм^3, Ж = 8,5 мг-екв/дм^3, [Ca^{2+}] = 5,2 мг-екв/дм^3, Л = 0,03 мг-екв/дм^3, pH = 7,9) наведені на рис. 1. Доза магнезиту в цьому випадку при низькій лужності розчину була еквівалентна концентрації кальцію. Як видно з рисунка, вже через три години з розчину було повністю вилучено сульфати, а ще через дві години з води було практично повністю вилучено іони жорсткості ($Ж_з$ = 0,63 мг-екв/дм^3). Дещо повільніше пом'якшення води, в порівнянні із виділенням сульфатів, обумовлено більш повільним протіканням реакцій (1)-(3) при електролізі води. Слід зазначити, що підвищення кислотності та вмісту сульфатів в анодній області було пропорційно кількості вилучених сульфатів з робочого розчину, що відповідає даним, наведеним у роботі [3].

При подальших дослідженнях вивчали процеси демінералізації концентратів, що утворюються при зворотньоосмотичному опрісненні водопровідної води ([SO_4^{2-}] = 345,0 мг/дм^3, [Cl^-] = 20,5 – 92,3 мг/дм^3, Ж = 3,6 – 23,75 мг-екв/дм^3, [Ca^{2+}] = 2,6 – 17,0 мг-екв/дм^3, Л = 3,5 – 14,5 мг-екв/дм^3). Результати наведені на рис. 2–4.

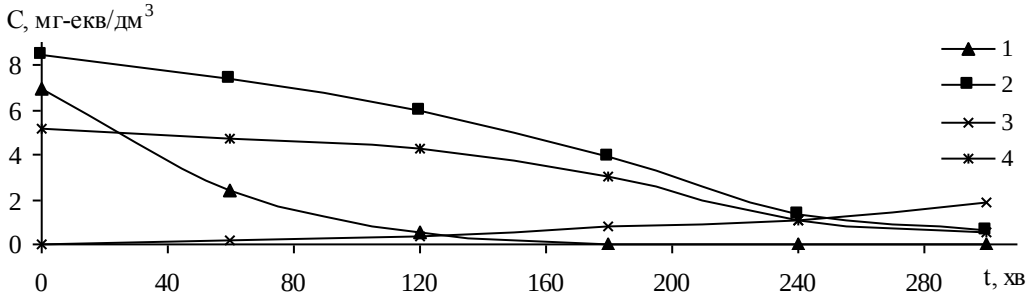


Рис.1. Залежність концентрації сульфатів (1), жорсткості (2), лужності (3) та концентрації кальцію (4) в робочій камері від часу електролізу в трикамерному електролізері з двома аніонними мембранами МА-41 модельного розчину (при силі струму I = 0,1 А, напрузі U = 50 В, дозі магнезиту 5 мг-екв/дм^3, лужність у катодній області 0,75 г-екв/дм^3)

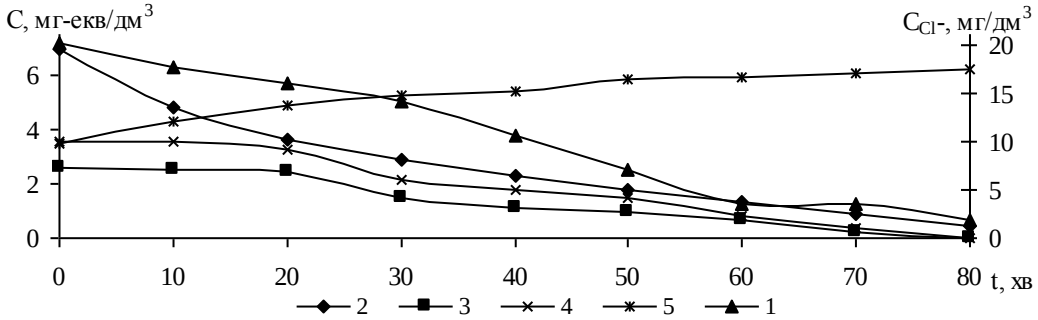


Рис. 2. Залежність концентрації хлоридів (1), сульфатів (2), іонів кальцію (3), жорсткості (4) та лужності (5) робочого розчину від часу електролізу концентрату зворотньоосмотичного опріснення водопровідної води у трикамерному електролізері з двома аніонними мембранами МА-41 (I = 0,1 А, U = 50 В, j = 0,5 А/дм^2) (лужність у катодній області 1 г-екв/дм^3, кислотність в анодній області – 0,05 г-екв/дм^3, доза магнезиту 2,1 мг-екв/дм^3)

Як видно з рис. 2, під час оброблення концентрату із вмістом хлоридів 20,5 мг/дм^3, жорсткістю 3,6 мг-екв/дм^3 та лужністю 3,5 мг-екв/дм^3 відмічено ефективне вилучення хлоридів та сульфатів протягом 60 хвилин. Крім того, за цей час було досягнуто практично повного пом'якшення розчину. При електролізі розчинів із вмістом хлоридів 92,3 мг/дм^3, лужністю 14,5 мг-екв/дм^3 та жорсткістю 23,75 мг-екв/дм^3 (рис. 3, 4) отримано аналогічні результати. При цьому за 80 хвилин електролізу вміст хлоридів знижувався до 10–16 мг/дм^3, сульфатів до 23–90 мг/дм^3, жорсткість до 5,6–8,0 мг-екв/дм^3, лужність до 5,0–8,1 мг-екв/дм^3.

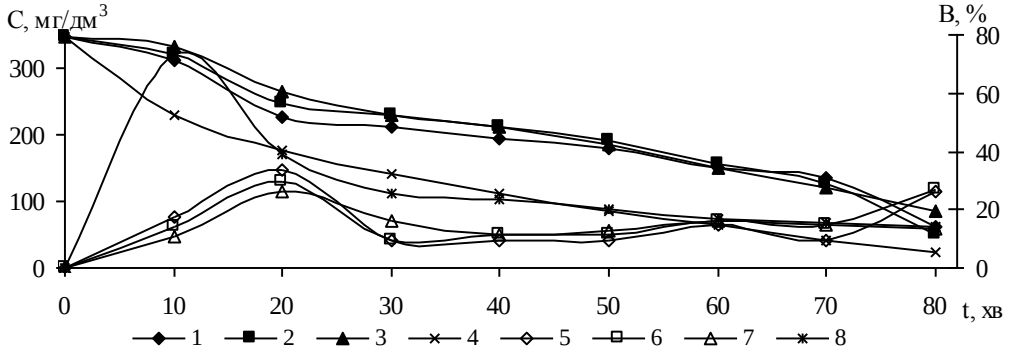


Рис. 3. Вплив часу електролізу концентрату після опріснення водопровідної води у трикамерному електролізері (мембрана МА-41) на залишкову концентрацію сульфатів у робочому розчині (1; 2; 3; 4) та вихід їх видалення за струмом (5; 6; 7; 8) при концентрації лугу в катодній області 0,15 (1; 2; 5; 6), 283 (3; 7) та 1000 (4; 8) мг-екв/дм^3 при дозі магнезиту в робочому розчині, мг-екв/дм^3: 0,0 – (2; 6); 2,5 – (1; 3; 4; 5; 7; 8)

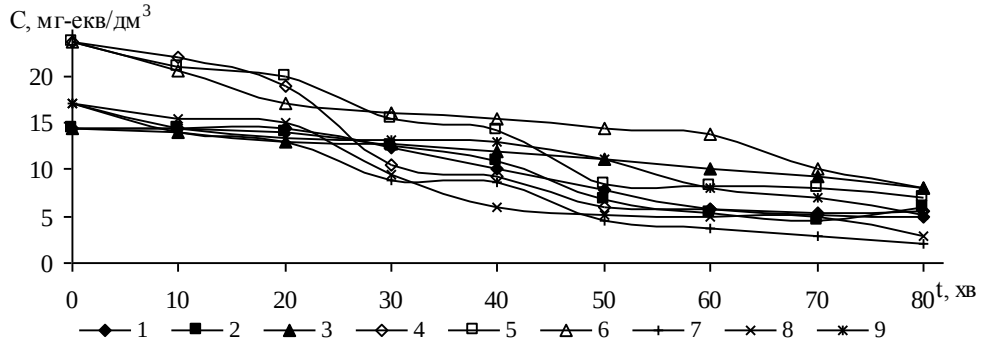


Рис. 4. Залежність залишкових значень лужності (1; 2; 3), жорсткості (4; 5; 6) та концентрації іонів кальцію (7; 8; 9) в робочому розчині (концентраті зворотньоосмотичного опріснення водопровідної води) від часу електролізу в трикамерному електролізері (мембрана МА-41) при концентрації лугу в катодній області 0,150 г-екв/дм^3 (1; 3; 4; 6; 7; 9), 0,283 г-екв/дм^3 (2; 5; 8) при дозі магнезиту, мг-екв/дм^3: 0,0 – (3; 6; 9); 2,5 – (1; 2; 4; 5; 7; 8)

Сульфати накопичувались в анодній області у вигляді сірчаної кислоти, хлориди виділялись з анодної області у вигляді активного хлору, як це описано в роботі [6].

Слід зазначити, що зміна концентрації лугу в катодній області жодним чином не впливала на ефективність знесолення води, так само як і додавання у воду магнезиту. Використання магнезиту ніяк не впливало на вилучення хлоридів та сульфатів, що є закономірним. Проте і на пом'якшення води цей реагент впливав незначною мірою. Під час використання магнезиту залишковий вміст кальцію був на 2–3 мг-екв/дм^3 нижчий, ніж у разі його відсутності, жорсткість та лужність відповідно були нижчими на 1–3 мг-екв/дм^3. Це в цілому вказує на можливість ефективного знесолення подібних концентратів без застосування магнезиту, що суттєво спрощує технологічний процес.

Досить ефективним було використання цього електролізера при демінералізації концентрату, отриманого при зворотньоосмотичному опрісненні солонуватої води із Ісакіївського водосховища (м. Алчевськ), основний запас води в якому формується за рахунок скиду шахтних вод ([SO_4^{2-}] = 2030 мг/дм^3, [Cl^-] = 645 мг/дм^3, Ж = 38,0 мг-екв/дм^3, [Ca^{2+}] = 6,7 мг-екв/дм^3, Л = 11,0 мг-екв/дм^3, pH = 8,82).

Концентрація хлоридів та сульфатів у цьому концентраті в 6–7 разів вища, у порівнянні з концентратом, отриманим при знесоленні водопровідної води. Саме цим зумовлено збільшення терміну електролізу при переході від менш концентрованого до більш концентрованого розчину (рис. 3, 4, 5, 6). При цьому час електролізу зростає всього в 3,5 рази, що обумовлено підвищенням ефективності процесу при вищих концентраціях іонів. Так, у випадку розчину з низькою концентрацією іонів (рис. 3) вихід за струмом під час вилучення сульфатів та хлоридів не перевищує 38 %, тоді як при переробці концентрату опріснення води з Ісакіївського водосховища вихід за струмом хлоридів та сульфатів досягав 97 % (рис. 7).

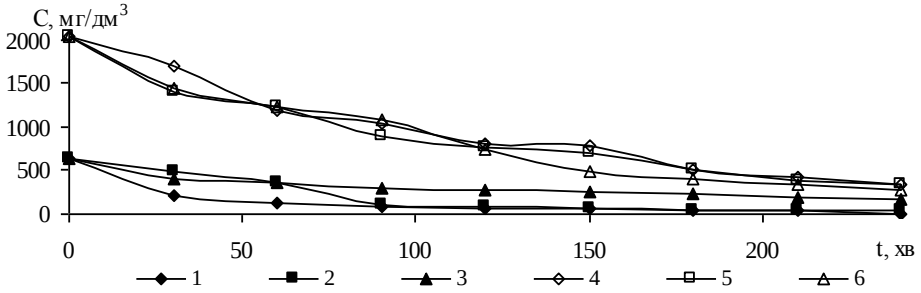


Рис. 5. Вплив часу електролізу концентрату зворотньоосмотичного опріснення води Ісакіївського водосховища в трикамерному електролізері (мембрана МА-41) на залишковий вміст хлоридів (1; 2; 3) та сульфатів (4; 5; 6) при концентрації лугу в катодній області, мг-екв/дм^3: 150 (1; 4), 283 (2; 5) та 1000 – (3; 6) при дозі магнезиту (мг-екв/дм^3): 0,0 – (1; 2; 4; 5); 6,7 – (3; 6) (I = 0,2 А, U = 15 В, j = 1,0 А/дм^2)

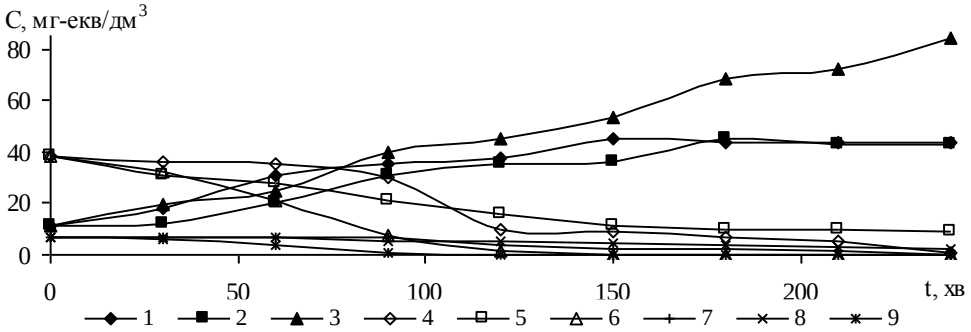


Рис. 6. Вплив часу електролізу в трикамерному електролізері (мембрана МА-41) на залишкові значення лужності (1; 2; 3), жорсткості (4; 5; 6) та концентрації кальцію (7; 8; 9) в робочому розчині (концентраті зворотньоосмотичного опріснення води з Ісакіївського водосховища) при концентрації лугу в катодній області (г-екв/дм^3): 0,15 (1; 4; 7), 0,283 (2; 5; 8), 1,0 – (3; 6; 9) при дозі магнезиту (мг-екв/дм^3): 0,0 (1; 2; 4; 5;7; 8), 6,7 – (3; 6; 9)

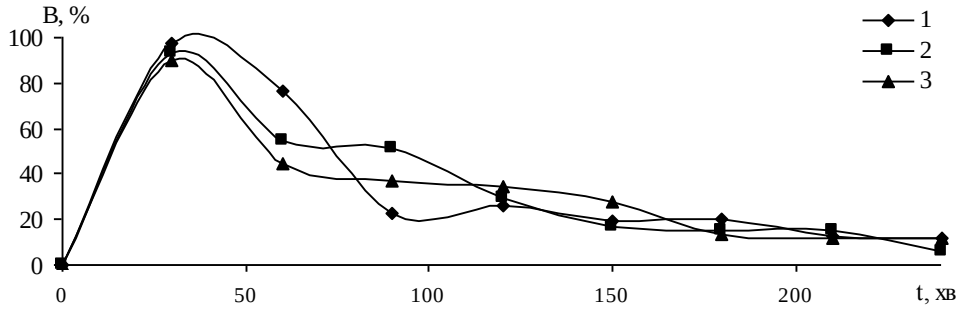


Рис. 7. Залежність виходу за струмом при електродіалізному вилученні хлоридів та сульфатів (1; 2; 3) із концентрату зворотньоосмотичного опріснення води Ісакіївського водосховища в трикамерному електролізері (мембрана МА-41) від часу електролізу при концентрації лугу в катодній області, мг-екв/дм^3: 150 (1), 283 (2), 1000 (3) при дозі магнезиту (мг-екв/дм^3): 0,0 – (1; 2); 6,7 – (3)

У цьому випадку на процеси очищення води від хлоридів і сульфатів та пом'якшення води (рис. 5, 6) практично не впливає концентрація лугу в католіті. У разі використання магнезиту відмічено підвищення ефективності пом'якшення води при значному зростанні лужності обробленого розчину. В цілому підвищення лужності цих розчинів після електролізу можна пояснити наявністю іонів натрію, які жодним чином не виводяться з розчину та накопичуються у ньому у вигляді гідроксиду натрію. Можливо, що доочищувати такий розчин слід в дво- або трикамерних електролізерах з катіонною мембраною з виділенням розчину лугу в катодній області [4]. Слід зазначити, що в усіх випадках очищення води без застосування магнезиту результати щодо пом'якшення були цілком задовільні.

Висновки

1. Вивчено процеси демінералізації розчинів з високою жорсткістю в трикамерних електролізерах з двома аніонними мембранами МА-41, що забезпечують ефективне очищення води від хлоридів та сульфатів при ефективному її пом'якшенні.
2. Показано, що на процеси вилучення хлоридів та сульфатів з модельного розчину та концентратів зворотньоосмотичного очищення не впливає концентрація лугу в катодній області та додавання магнезиту. Швидкість процесу та вихід за струмом підвищується у разі зростання концентрації цих іонів у розчині.
3. Встановлено, що під час проведення електролізу розчинів із високою жорсткістю в трикамерному електролізері із двома аніонними мембранами МА-41 відбувається ефективне пом'якшення води. Ефективність пом'якшення розчинів зростає під час додавання до них магнезиту в кількості, рівній різниці концентрації іонів кальцію та лужності води.

Список використаних джерел

1. *Сальникова Е. О.* Очистка сточных вод от сульфат ионов с помощью извести и оксосульфата алюминия / Е. О. Сальникова, И. Ф. Гофенберг, Е. Н. Туранина // Химия и технология воды. – 1992. – Вып. 14, № 2, – С. 152-157.

2. *Вилучення* сульфатів із концентратів, що утворюються при нанофільтраційній демінералізації води / В. В. Рисухін, Т. О.Шаблій, В. С. Камаєв, М. Д. Гомеля // Экология и промышленность. – 2011. – № 4. – С. 83-88.

3. *Писарска Б.* Анализ условий получения H_2SO_4 и NaOH из растворов сульфата натрия методом электродиализа / Б. Писарска, Р. Дилевски // Журнал прикладной химии. – 2005. – Т. 78, № 8. – С. 1311-1316.

4. *Шаблій Т. О.* Електрохімічна переробка відпрацьованих розчинів, що утворюються при регенерації катіонітів / Т. О. Шаблій, М. Д. Гомеля, Е. М. Панов // Экология и промышленность. – 2010. – № 2. – С. 33-38.

5. *Шаблій Т. О.* Електродіаліз розчину хлориду натрію з одержанням соляної кислоти та лугу / Т. О. Шаблій, В. В. Іванюк, М. Д. Гомеля // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2011. – № 1 (II). – С. 67-71.

6. *Чхенадзе Н. В.* К определению допустимой величины кальциевой жест кости при электролизе минерализованных вод с одновременным концентрированием // Н. В. Чхенадзе, Ц. С. Курцхалия // GEN : Georg. Eng. News. – 2004. – № 4. – С. 118-122.

7. *Кучерик Г. В.* Електрохімічне вилучення хлоридів із природних вод і лужних регенераційних розчинів / Г. В. Кучерик, Ю. А. Омельчук, М. Д. Гомеля // Збірник наукових праць СНУЯЕтаП. – 2011. – Т.2, № 38. – С. 189-196.

УДК 628.477:678.7

Т.М. Денисенко, канд. техн. наук
Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТИКОВИХ ВИРОБІВ

Т.Н. Денисенко, канд. техн. наук
Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПЛАСТИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Tetiana Denysenco, PhD in Technical Sciences
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

RESEARCH OF MODERN TECHNOLOGIES OF PLASTICS PRODUCTS PROCESSING

Проаналізовано морфологічну структуру промислових та побутових відходів та визначено частку полімерних відходів. Досліджено розподіл полімерних відходів за видами полімерів, призначенню, агрегатно-фізичному стану виробів, місцях утворення і накопичення, можливості збору, заготівлі і переробки з урахуванням їх об'ємів і залишкових технологічних властивостей. Проаналізовано методи утилізації та вторинної переробки відходів полімерів.

***Ключові слова**: пластик, полімери, утилізація, деструкція.*

Проанализирована морфологическая структура промышленных и бытовых отходов и определена доля полимерных отходов. Исследовано распределение полимерных отходов по видам полимеров, назначению, агрегатно-физическому состоянию изделий, месту образования и накопления, возможности сбора, заготовки и переработки с учетом их объемов и остаточных технологических свойств. Проанализированы методы утилизации и вторичной переработки отходов полимеров.

***Ключевые слова:** пластик, полимеры, утилизация, деструкция.*

The article analyzes the morphological structure of industrial and domestic wastes and determined the proportion of plastic waste. Investigated the distribution of plastic waste by types of polymers, purpose, aggregate-physical condition of the products, places of the ir formation and accumulation, the possibility of collecting, harvesting and processing based on their residual volumes and technological properties. The methods of disposal and recycling of waste polymers were analid.

***Key words**: plastic, polymers, recycling, destruction.*

Постановка проблеми. Нині людство виробляє полімерів стільки ж, скільки випускається у світі чавуну, сталі і кольорових металів разом узятих, якщо порівнювати не в

одиницях маси, а за об'ємом. Виробництво пластичних мас на сучасному етапі розвитку зростає в середньому на 5–6 % щорічно і до 2014 року досягло 270 млн т. Їх питоме споживання населенням в індустріально розвинених країнах за останні 20 років подвоїлося, досягнувши 85–90 кг [1].

Пластик, відкритий Олександром Паркесом більше ніж півтора століття тому, став справжньою бідою початку XXI століття. Останні три десятиліття були ключовими у його експансії – пластик став невід'ємною частиною нашого життя. Навряд чи ми можемо нині уявити свій побут без пластикових пакетів, пляшок, посуду, упаковок тощо. Використовуючи його як одноразовий посуд чи пакувальний матеріал, людство зіткнулося із накопиченням пластикових відходів, які не розкладаються за допомогою природних чинників. За приблизними підрахунками вчених, від 1950 року і до теперішнього часу у навколишнє середовище потрапило понад мільярд тонн пластику. На основі лабораторних експериментів вдалося встановити, що для повного розкладання пластикової пляшки під дією ультрафіолету та перепадів температур знадобиться від ста до п'ятисот років. А деякі екологи вказують навіть термін до тисячі років [2]! І це при тому, що виробництво продукції із пластику становить понад 300 мільйонів тонн щорічно і продовжує зростати.

Пластик дешевий у виробництві, однак він здорожується під час переробки та стає невигідним для повторного використання з першопочатковою метою. Основною проблемою переробки є сортування, яке неможливо автоматизувати, тому основні витрати припадають на оплату праці сортувальників. Справа в тому, що різні пластикові продукти виробляються із різних речовин (поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид, поліуретан та інші), а їх переробка можлива лише окремо. Однак деякі пластикові відходи взагалі не переробляють через нерентабельність, прикладом можуть слугувати вироби із полістерену (полістиролу), які просто захоронюють на сміттєзвалищах або утилізовують на сміттєспалювальних заводах. Як вторинну сировину, пластик використовують здебільшого як наповнювач для різноманітних будівельних сумішей, облицьовувальних виробів, ізоляційних матеріалів, технічних конструкцій, палива і навіть для одержання електроенергії.

Виробництво виробів з пластику збільшується з року в рік. Це пляшки, банки, каністри, лотки, піддони, пакети, етикетки, плівка, скотч, перегородки, перекриття, короби, сітки, решітки, папки, штучні трав'яні покриття, фільтруючі трубки і безліч інших виробів. Збільшується і кількість пластикових відходів, які не просто засмічують навколишнє середовище, але і забруднюють його шкідливими елементами. Пластик належить до матеріалів, які практично не розкладаються з часом, а під час спалювання виділяються дуже токсичні речовини, які неможливо вивести з організму. Тому вироби з пластику повинні бути перероблені. Нині проблема переробки відходів полімерних матеріалів отримує актуальність не тільки у зв'язку з охороною навколишнього середовища, а й у зв'язку з дефіцитом полімерної сировини. З 1 кг відходів (поліетилентерефталату ПЕТФ, поліпропілену ПП, поліетилену високого тиску ПЕВТ, поліетилену низького тиску ПЕНТ) виходить 0,8 кг вторинної сировини. Популярність пластику пояснюється його легкістю, економічністю, зручністю використання. Так, під час виготовлення пластику енергії потрібно на 21 % менше, ніж під час виготовлення скла.

Полімерна промисловість останнім часом активно розвивається як сектор світової економіки. Бурхливе зростання застосування, використання полімерної продукції поряд з незаперечними позитивними результатами привело до непростих проблем, що стосуються утилізації й переробки відходів полімерного виробництва.

Пластики не можна захоронити в землю, оскільки вони там не розкладаються. Позбавлення від них можливе лише у разі спалювання, але тоді відбувається виділення великої кількості небезпечних для здоров'я речовин – канцерогенів, вони ж діоксини, які руйну-

ють імунітет, що сприяють розвитку онкологічних захворювань та вроджених вад. Не будемо забувати про те, що діоксини поширюються і повітрям, і підземними водами.

Мета статті. Метою роботи є аналіз сучасних технологій переробки відходів полімерів, що дозволить вирішити проблему повторного використання значної частини промислових і побутових полімерних відходів та зменшить їх вплив на довкілля.

Виклад основного матеріалу. Сьогодні виробляється приблизно 150 видів пластиків. Суміші різних полімерів становлять 30 % від цього числа. Стандартні термопласти – ПЕНТ, ПЕВТ, ПП, ПС, ПВХ – становлять до 80 % полімерів, що випускаються. На частку конструкційних пластиків – полікарбонати, поліаміди, ПЕТ, поліфеніленоксид – припадає до 19 %. Решта 1 % – це полімери із специфічними унікальними властивостями: поліефіркетони, поліфеніленсульфіди і багато інших.

Полімерні матеріали, залежно від сфер застосування, мають різні терміни використання. Як приклад, можна розглянути дані, наведені для країн ЄС за 2013 р. З 25 млн т спожитих пластиків 9 млн т (36 %) використовувались менше одного року – це, передусім, тара і пакування; 7 млн т (28 %) – вироби з терміном придатності від 1 до 10 років – побутова електротехніка, посуд, інші споживчі товари; 9 млн т (36 %) експлуатується понад 10 років – полімерні матеріали будівельного призначення, деталі, що використовуються в автомобіле-, судно-, літакобудуванні. В цілому, щорічно із загального об’єму полімерів до 75 % матеріалів потрапляють у відходи [3]. Значна частка полімерів мають дуже короткий термін експлуатації.

Зростання обсягів виробництва полімерів приводить відповідно до зростання їх частки у відходах. За останні 15 років, за даними Союзу європейських виробників пластмас, частка полімерних матеріалів у відходах виросла з 2 до 8–11 %. Лідером сміттєвих відходів, поза сумнівом, є упаковка. Від загальної кількості полімерів, що випускаються, на виробництво пакувань витрачається 41 %; половина всіх пакувальних матеріалів – харчове пакування.

Нині чіткої класифікації полімерних відходів немає, але практичний досвід їх утилізації, що є сьогодні, дозволяє розділити полімерні відходи на чотири групи, кожна з яких вимагає різних господарсько-організаційних і специфічно-технологічних заходів для залучення до переробки [4]:

1) технологічні відходи виробництва пластмас. Частина відходів, хімічні, фізичні і механічні властивості яких відповідають нормам технологічного процесу цього виробництва, може бути залучена до повторної переробки, а інші відходи, що не гарантують високої якості виробів (при звичайних способах вторинної переробки), знищуються або передаються як вторинна сировина на інші переробні підприємства;

2) відходи виробничого споживання накопичуються в результаті виходу з ладу виробів з полімерних матеріалів, що використовуються в різних галузях народного господарства. Ці відходи є найбільш однорідними, малозабрудненими, тому представляють найбільший інтерес з погляду повторної переробки. Зазвичай, ці відходи подрібнюють у ножовій дробарці, а потім пропускають через екструдер;

3) полімерні відходи сфери виробництва і споживання містять відходи полімерів, такі, наприклад, як плівкові матеріали в сільському господарстві, пакувальні матеріали в торгівлі та ін. Такі відходи, зазвичай, сильно забруднені, містять чужорідні тіла, мають підвищену вологість;

4) відходи громадського споживання накопичуються у населення, на підприємствах громадського харчування тощо, а потім потрапляють на міські звалища; зрештою вони переходять у нову категорію відходів – змішані відходи.

Найбільші труднощі пов’язані з переробкою і використанням останніх відходів. Причиною тут є несумісність полімерів, які входять до складу побутового сміття, що вимагає їх постадійного виділення.

Відповідно до Директив Європейської спільноти (75/442/ЕЕС, 91/156/ЕЕС та ін.) і на підставі аналізу впливу відходів на довкілля у країнах ЄС стимулюються переробка і повторне використання відходів. Найбільших успіхів у впровадженні роздільного збору, переробки і використанні відходів за останні 30 років досягла Німеччина, що впровадила «Дуальну систему Німеччини». Ця система дозволила створити 17 тис. додаткових робочих місць і 320 сортувальних пунктів твердих побутових відходів. Збираються і переробляються 5 млн т упаковки на рік. Загальна кількість побутового сміття за рахунок переробки скоротилася на 15 %.

Розглянемо розподіл полімерної тари за видами полімерів, призначенням, агрегатно-фізичним станом виробів, термінами служби, умовами експлуатації, місцями утворення і накопичення, можливості збору, заготівлі і переробки з урахуванням їх об'ємів і залишкових технологічних властивостей:

1) транспортна полімерна тара у вигляді ящиків, піддонів, бідонів, бочок та ін. Термін експлуатації полімерної транспортної тари – до 3 років. Зношена транспортна тара практично в повному об'ємі повертається до виробника і переробляється в дроблену, остання додається до первинної сировини в кількості до 50 % для виробництва полімерної тари;

2) зношена тара і пакування з комбінованих матеріалів – ламінованого паперу, металізованої алюмінієм плівки, з антисептичних пакувальних матеріалів та ін. З комбінованих матеріалів виготовляють пакети та пачки для розфасовки молока, кефіру, сметани, соку, упакування сиру, медикаментів. Це тара і пакуванння одноразового використання. Випускається в основному паралельно з виробництвом продуктів харчування, медикаментів та ін. Зношена тара і пакування та технологічні відходи їх виробництва можуть розглядатися як вторинна полімерна сировина за умови організації збору, заготівлі їх від населення в очищеному вигляді та розроблення технології й устаткування для їх переробки в ліквідні вироби. Вона може бути використана за умови відповідної технології переробки як «сміттєве» паливо у вигляді брикетів з питомою теплотою згорання до 7000 ккал/кг;

3) зношена текстильна тара і пакування, у тому числі з мішків із синтетичної нитки (поліпропілену, поліаміду) близько 2500 т/рік, які використовують для затарювання цукру, круп, зерна, солі, борошна та інших сипких харчових продуктів, а також сумки, пакети з синтетичних ниток, сітки, вкладиші, контейнери. Це тара і пакування одноразового використання. Потенційними постачальниками можуть бути виробники цієї тари і пакування, споживачі харчових і технічних сипких продуктів та матеріалів. Це хлібобулочні, макаронні, кондитерські комбінати, фабрики, заводи, приватний сектор, а також підприємства громадського харчування – ресторани, кафе, їдальні і т. ін. За своїми фізико-хімічними і механічними залишковими властивостями вживані мішки, сітки, сумки, вкладиші з синтетичних ниток (поліпропілен, поліамід, поліетилен) можуть розглядатися як вторинна полімерна сировина;

4) зношена тара і пакування з термопластичних матеріалів типу поліетилену високого і низького тиску, поліпропілену, полістиролу. Це поліетиленові плівкові мішки, вкладиші м'яких контейнерів, споживча тара – пакети, пакувальна, обгорткова, термоусадкова плівка, пляшки, стаканчики, туби та ін. Виробництво плівкової пакувальної тари здійснюють на невеликих фірмах з різною формою власності, основними споживачами є торговельні підприємства, ярмарки, що реалізують харчові продукти, предмети косметики, санітарно-гігієнічні вироби, технічні засоби, одяг, взуття. Враховуючи відсутність організованої системи збору, заготівлі і переробки пакувальної тари, основний об'єм її потрапляє до складу твердих побутових відходів, де піддається сильному забрудненню, зараженню бактеріями. Це значно ускладнює технологічні процеси її переробки, зокрема вимагає додаткового миття і знезараження;

5) поліетиленова плівка сільськогосподарського застосування в парниковому, тепличному господарствах є компактним джерелом вторинної полімерної сировини. Термін експлуатації ПЕ-плівки в тепличному і парниковому господарствах становить один рік. Проте залишкові фізико-хімічні і механічні властивості зношеної ПЕ-плівки тепличного, парникового призначення є достатніми для її повторної переробки;

6) поліетиленові мішки з-під мінеральних добрив є високоякісною вторинною полімерною сировиною. Термін служби ПЕ-мішків один рік;

7) разовий посуд. Цей вид полімерних відходів має незначну частку серед інших видів полімерних відходів та сильну забрудненість залишками їжі. Для виробництва виробів використовуються в основному полістирол, поліпропілен, поліетилентерефталат, полівінілхлорид, поліетилен. Термін служби цих виробів разовий. Основна тара – ПЕТ-пляшки, концентруються у населення, тому можливі обсяги заготівлі залежать від організації їх збору.

Найчастіше ПЕТ-відходи використовуються повторно для виробництва пластикових пляшок, плівок і волокна. Реологічні і механічні властивості вторинного складу ПЕТ дозволяють використовувати під час виготовлення ємностей для мийних засобів, що робить його гарною альтернативою ПВХ і ПЕВТ. Вторинний ПЕТ також часто використовується як проміжний шар при виробництві тришарової аморфної плівки і видування тришарових ламінованих пляшок із зовнішніми шарами з первинного полімеру. Застосування співекструзії сумішей з переробленого вторинного та первинного ПЕТ дозволяє поліпшити реологічні властивості вторинного полімеру, зробивши його більш придатним для видування. Не менш важливою сферою застосування вторинного ПЕТ є виробництво волокон. Процес формування волокна вимагає від вторинного полімеру тих же реологічних властивостей (градієнта швидкості потоку і неізотермального витягування), якими володіє первинний полімер. Здебільшого ПЕТ-волокно, сформоване з вторинної основи, має механічні властивості, що задовольняють умови виробництва широкої гами продуктів. Вторволокно переробляється в текстиль або тканні основи для виробництва одягу і килимових покриттів. Ці програми можуть використовувати до 100 % вторинного полімеру. Найчастіше ПЕТ-волокно застосовують якості синтетичного утеплювача для зимового одягу або готової плисової фактури для пошиття одягу. У ПЕТ-волокна є певні переваги перед іншими синтетичними волокнами. Наприклад, килими з ПЕТ-волокна не втрачають колір і не вимагають спеціального хімічного оброблення, необхідного килимам з нейлонових волокон. ПЕТ-волокна і забарвлюються легше, ніж нейлон. Волоконні полотна з ПЕТ, виготовлені за технологією melt-blown, застосовуються для виробництва шумоізоляційних матеріалів, абсорбуючих елементів, синтепону. Нарешті, невеликий обсяг вторинного ПЕТ використовується для виготовлення автомобільних компонентів, електротехнічних виробів, різної фурнітури методом лиття під тиском.

Крім вищеперерахованих, останніми роками все активніше в Європі, а також уже і в Україні, вторинний ПЕТ використовується для екструзії щетини. Щетина являє собою волокно великої товщини (діапазон товщини – 0,1–2,0 мм). Вона знаходить застосування при виробництві різних щіток як господарського, так і промислового та сервісного призначення. Обсяг цього ринку, як і його потенціал, є значним. Крім ПЕТ, у цій індустрії використовується і ПП (рідше ПА).

Переробка пластику складається з кількох етапів: збір, сортування (за кольором, якістю, чисті/брудні відходи), пресування, власне переробки (різка, промивка, сушка, виробництво регранулята), виробництво нової продукції.

Для забезпечення утилізації одноразових предметів у 1988 році Товариством пластмасової промисловості була розроблена система маркування для всіх видів пластику та

ідентифікаційні коди. Маркування пластику складається з 3-х стрілок у формі трикутника, всередині яких знаходиться цифра, що позначає тип пластику [5]:

1) PET або ПЕТ – поліетилентерефталат. Зазвичай використовується для виробництва тари для мінеральної води, безалкогольних напоїв і фруктових соків, упаковки, блістерів, оббивки;

2) PEHD або HDPE – поліетилен високої щільності. Виробництво пляшок, фляг, напівжорсткої упаковки. Вважається безпечними для харчового використання;

3) ПВХ або PVC – полівінілхлорид. Використовується для виробництва труб, трубок, садових меблів, підлогових покриттів, віконних профілів, жалюзі, тари для мийних засобів та клейонки. Матеріал є потенційно небезпечним для харчового використання, оскільки може містити діоксини, бісфенол А, ртуть, кадмій;

4) LDPE або ПЕВТ – поліетилен низької щільності. Виробництво брезентів, сміттєвих мішків, пакетів, плівки і гнучких ємностей. Вважається безпечним для харчового використання;

5) PP або ПП – поліпропілен. Використовується в автомобільній промисловості (обладнання, бампери), при виготовленні іграшок, а також у харчовій промисловості, в основному при виготовленні пакувань. Вважається безпечним для харчового використання;

6) PS або ПС – полістирол. Використовується при виготовленні плит теплоізоляції будівель, харчових паковань, столових приладів і чашок, коробок CD та інших упаковок (харчової плівки і піноматеріалів), іграшок, посуду, ручок і так далі. Матеріал є потенційно небезпечним, особливо у випадку горіння, оскільки містить стирол;

7) OTHER або О – інші. До цієї групи відноситься будь-який інший пластик, який не може бути включений у попередні групи. В основному, це полікарбонат. Полікарбонат не є токсичним для навколишнього середовища, але може містити небезпечний для людини бісфенол А. Використовується для виготовлення твердих прозорих виробів.

Нині найбільш прийнятним методом переробки для України залишається механічний рециклінг – вторинна переробка (спосіб не потребує дорогого спеціального обладнання і може бути реалізований у будь-якому місці накопичення відходів).

Вторинна переробка полімерних відходів, застосування їх у комунальному господарстві міст України є актуальними проблемами екологічного та економічного характеру. Річний об’єм господарського сміття на одного жителя міста в середньому становить 250 кг, у тому числі 30 % (75 кг) – тара й упаковка, до 12 % (30 кг) – полімерні відходи, відходи поліетилентерефталату (ПЕТ-пляшка) – 0,8–1 % (2–2,5 кг). Використана тара і пакування є цінною вторинною сировиною, яка найчастіше використовується для виробництва тієї ж тари і пакувань, хоча діапазон застосування вторинної полімерної сировини досить широкий, особливо в комунальному господарстві та інфраструктурі міста.

Під час вибору способу утилізації відходів потрібно враховувати загальні витрати енергії. Відходи, які вигідніше переробляти, ніж спалювати й утилізувати на полігонах, потрібно переробляти. Нині в Україні щорічно утворюється близько 6 млн. тонн відходів, серед яких до 50 % становлять відходи тари і упаковки. Ці відходи є серйозними забруднювачами природного довкілля (у природних умовах вони не розкладаються протягом багатьох десятиліть), тому велику увагу необхідно приділяти їх збору, переробці та утилізації.

Переробка технологічних відходів пластмас складнощів не представляє. Здебільшого ці відходи переробляють на тих же підприємствах, де вони утворюються. Ступінь утилізації промислових відходів пластмас досягає 90 %. Відходи виробництва полімерів використовують для виготовлення виробів технічного призначення, побутової хімії і потреб комунального господарства (труби поліетиленові, тротуарна плитка, люки і кришки каналізаційні) або як добавки (10–15 %) до початкової сировини.

Утилізація відходів використаної упаковки з термопластичних полімерів залежить від вибраних технологій. При переробці таких відходів методом рециклінга (регранулляції) однією з основних вимог є вибір устаткування і технології переробки (рис. 1).

Рис. 1. Методи утилізації і вторинної переробки полімерних відходів

Перевага віддається устаткуванню, що дозволяє переробляти відходи полімерів при їх мінімальному очищенні і сортуванні.

Зібрані або виділені з ТПВ полімерні відходи більш різноманітні, ніж відходи інших видів. Тому є безліч підходів щодо перетворення полімерного сміття в корисні продукти. Первинна переробка утилізованих полімерів включає повторне використання низькосортних відходів і обрізків безпосередньо на заводі, що їх виробляє. Вона застосовується щодо термопластичних полімерних матеріалів, які мають дуже низький рівень забруднення. Вторинна переробка полягає в розподілі, очищенні і повторному використанні базових продуктів у вигляді чистих полімерів або сумішей. Механічна переробка (первинна або вторинна) є основним напрямом відновлення пластмас, оскільки вона зберігає максимальну кількість корисних продуктів. Проте вона часто обмежена впливом таких чинників, як забруднення, деградація властивостей і т. ін.

З іншого боку, полімерні відходи можна спалювати з отриманням енергії. Спалювання є дуже ефективним способом знищення великих об’ємів пластмас, але в цьому випадку із сміття отримується невелика частка корисних продуктів.

Між цими підходами є третій шлях – хімічна переробка, яку називають також сировинною або «третинною». Сюди можна віднести будь-яку технологію, яка використовує керовані хімічні реакції. Це деполімеризація макромолекул з утворенням мономерів, покрокова деструкція до низьких молекулярних мас через розрив певних хімічних зв’язків, нарощування полімерних ланцюгів для відновлення молекулярної маси, піроліз з утворенням складної суміші газоподібних, рідких і твердих продуктів, реакційне змішування різних полімерів та ін. Цей шлях переробки дозволяє відновити більшу, ніж під час спалювання, частину відходів.

Переробка полімерних відходів у нові матеріали і вироби – найбільш економічно доцільний шлях їх використання. Оскільки вторинна переробка полімерних відходів приблизно в два рази менше енергоємна, ніж виробництво первинних полімерів, оскільки при цьому економиться нафтова сировина, то рециркуляція полімерних відходів виявляється економічно вигідною.

Промислові і побутові полімерні відходи піддаються багатоетапній переробці. Загальну схему процесу попереднього оброблення полімерних наведено на рис. 2. Залежно від стану полімерних відходів (їх складу, забрудненості, рівня деструкції) вони або переробляються як суміш полімерів, або розділяються на індивідуальні компоненти.

Полімерні відходи, промислові або виділені з побутових, піддаються подрібненню для уніфікації властивостей цих різноманітних за формою, розмірами і специфічними характеристиками матеріалів. Цю стадію можна визначити як формування часток певного розміру і форми для зменшення об’єму і гомогенізації потоку сировини. Одночасно – це крок переробки для наступного використання матеріалу. Подрібнення дуже ва-

жлива стадія підготовки відходів до переробки. Регулювання ступеня подрібнення полімерних відходів дозволяє механізувати процес переробки, підвищити якість матеріалу за рахунок усереднення його технологічних характеристик, скоротити тривалість інших технологічних операцій, спростити конструкцію переробного устаткування.

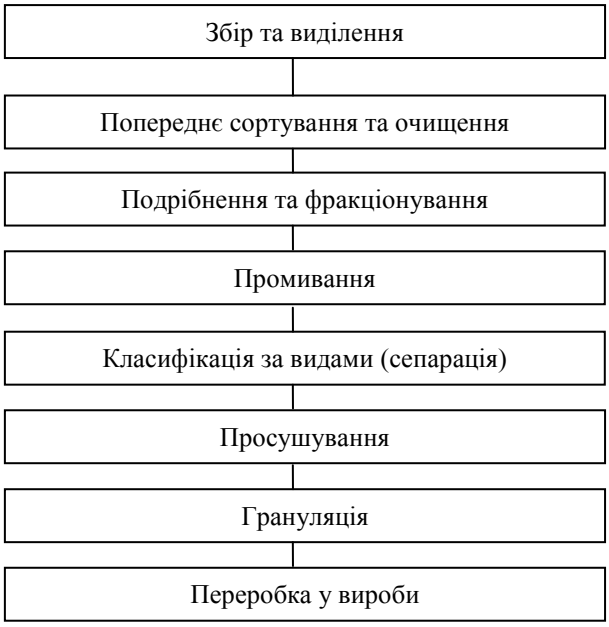


Рис. 2. Схема попереднього оброблення полімерів

Основну частину полімерних відходів складають термопласти. Оскільки це еластичні матеріали, то зсувове подрібнення, ударна дія і тиск для їх подрібнення не ефективні, тоді як різання дає необхідні результати. Різальні млини, подрібнювачі, різаки гільйотин і пили використовуються для різання профілів, плівок і інших полімерних відходів.

Метою фракціонування є розподіл часток подрібненої сировини за розміром і формою. Розподіл компонентів у суміші гранул здійснюється за допомогою ситових, проточних або валкових екранів.

Промивання очищає сировину і видаляє бруд. Ця технологія може бути схематично розділена на три кроки: вимочування, зачистка (сильно забруднені матеріали очищаються в турбінних або фрикційних мийних машинах), видалення бруду. Після стадії промивання змішані полімерні відходи можуть бути розділені і класифіковані за видами пластиків або перероблятися далі єдиною масою.

Просушування зменшує вміст вологи в матеріалі після процедур промивання до прийнятного рівня. Вміст залишкової вологи повинен становити не більше 1 %.

Метою грануляції є отримання однакових за формою і розміром гранул, що необхідно для спрощення поводження з матеріалом. Кінцевий вторинний полімерний матеріал, придатний для переробки у вироби на стандартному устаткуванні переробки пластмас, отримують за допомогою грануляції. Пластмасу розплавляють в екструдері і надають матеріалу форми гранул за допомогою гранулюючого диска.

Вторинна переробка полімерів часто обмежена високою забрудненістю сировини, його композиційною неоднорідністю і значним рівнем деструкції матеріалу. Хімічна переробка полімерних відходів припускає їх трансформацію в низькомолекулярні фракції: гази, мономери, олігомери, сиру нафту і т. ін. Цей вид утилізації включає також контрольовані реакції, що ведуть до відновлення полімеру і його хімічної модифікації.

Піроліз – це термічне розкладання органічних продуктів за наявності кисню або без нього. Піроліз полімерних відходів дозволяє отримати висококалорійне паливо, сировину і напівфабрикати, використовувані в різних технологічних процесах, а також мо-

номери. Газоподібні продукти термічного розкладання пластмас можуть використовуватися як паливо для отримання робочої водяної пари. Рідкі продукти використовуються для отримання теплоносіїв. Спектр застосування твердих продуктів піролізу відходів пластмас досить широкий (компоненти різного роду захисних композицій, мастил, емульсій, просочувальних матеріалів та ін.).

Для отримання низькомолекулярної сировини з таких видів відходів полімерів, як суміші полімерів, кабельна ізоляція, застосовують високотемпературний піроліз, при цьому велика продуктивність досягається тільки у разі безперервних методів.

Низькомолекулярні граничні вуглеводні, що утворюються в процесі піролізу, піддаються наступному крекінгу з метою збільшення виходу неорганічних сполук, що використовуються під час синтезу поліолефінів. Штучне рідке паливо є дуже перспективним напрямом утилізації полімерних відходів. Розроблені останнім часом технології дозволяють отримувати високоякісні марки бензину, гасу, дизельного і котельного палива. Проте основним недоліком вказаних технологій є висока вартість використовуваного устаткування і, відповідно, висока вартість отримуваного палива.

Більшість полімерів у результаті зворотності реакції можуть знову розкладатися до початкових речовин – мономерів. ПЕТ може бути деполімеризована до початкових компонентів – етиленгліколю і терефталевої кислоти за реакцію гідролізу з використанням «надкритичної» води, яка діє як кислотний каталізатор. Терефталева кислота відділяється при 350–400 ^{o}C на 100 %, етиленгліколь – дещо менше. Аналогічній переробці можуть бути піддані відходи поліуретанів і поліамідів. Цей спосіб використання відходів енергетично вигідніший, ніж піроліз, оскільки в оборот повертаються високоякісні хімічні продукти.

У порівнянні з гідролізом для розщеплення відходів ПЕТ економічніший інший спосіб – гліколіз. Деструкція відбувається при високих температурах і тиску за наявності етиленгліколю і за участю каталізаторів до отримання чистого диглікольтерефталату. Все ж найпоширенішим термічним методом переробки відходів ПЕТ є їх розщеплення за допомогою метанолу – метаноліз. Процес відбувається при температурі вище 150 °С і тиску 1,5 МПа. Цей метод дуже економічний. На практиці застосовують і комбінацію методів гліколізу і метанолізу.

Отримання енергії за рахунок спалювання полімерних відходів стає особливо актуальним під час зростання цін на органічне паливо. При цьому немає необхідності сортування, необхідно лише подрібнювати відходи до досить великих шматків, щоб забезпечити необхідний для горіння доступ кисню. Хоча полімерні компоненти у відходах за масою становлять лише 7 %, вони дають 30 % енергії на переробних заводах. Використання у вигляді палива однієї тонни заздалегідь підготовлених змішаних полімерних відходів зберігає 1,4 т вугілля. Небезпека забруднення довкілля супертоксикантами при спалюванні полімерних відходів значною мірою перебільшена і більше відноситься до старих сміттєспалювальних установок. При температурах 1200–1400 °С, характерних для сучасних установок, ці речовини безповоротно розпадаються, а частка, що не розклалася, поглинається в адсорбуючих фільтрах. Викиди діоксину досягають всього 0,6 мкг на тонну. Під час спалювання тонни кам’яного вугілля виділяється 1-10 мкг діоксину. Спалювання на сьогодні залишається одним з основних способів утилізації відходів навіть в економічно розвинених країнах.

Вторинна переробка, хімічна модифікація або спалювання з отриманням енергії – альтернативні шляхи вирішення проблеми. Ціна переробки відходів полімерів зростає під час збільшення витрат на їх збір і розподіл.

Висновки. Зростання виробництва полімерів привело до суттєвого зростання їх частки у твердих побутових відходах до 8–12 %, з них приблизно 80 % становлять відходи полімерів. Полімерні відходи у природних умовах розкладаються протягом 80-100 років, забруднюючи довкілля продуктами деструкції. При їх самовільному спалюванні

в атмосферу можуть виділятися надзвичайно небезпечні речовини канцерогенної дії – діоксини і фурани.

У той же час відходи полімерів є цінною вторинною сировиною. Їх переробка та повторне використання дозволить заощадити значну кількість первинних пластмас, які виробляються з нафтової сировини, а також знизити викиди у атмосферу.

У роботі проаналізовано морфологічну структуру промислових та побутових відходів та визначено частку полімерних відходів. Досліджено розподіл полімерних відходів за видами полімерів, призначенням, агрегатно-фізичним станом виробів, місцями утворення і накопичення, можливостями збору, заготівлею і переробкою з урахуванням їх об'ємів і залишкових технологічних властивостей.

Проаналізовано особливості роботи з відходами полімерів та досліджено фізико-хімічні процеси їх деструкції. Розглянуто методи утилізації та вторинної переробки відходів полімерів. Результати цієї роботи можна використовувати на сміттєпереробних заводах для вдосконалення технологічних ліній з переробки полімерних відходів.

Список використаних джерел

1. *Пластик* в нашей жизни: быть или не быть [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.babygreen.ru.

2. *Пластиковий* вік [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.naturalist.if.ua/?p=3126#ixzz2xSExodsa.

3. *Полимерные* отходы в коммунальном хозяйстве города : учебное пособие / В. Н. Бабаев, Н. П. Горох, Ю. Л. Коваленко и др. – Х. : ХНАГХ, 2004. – 375 с.

4. *Про класифікацію* полімерів і співполімерів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://pravo.levonevsky.org/bazaua09/pismo/sbor02/text02150.htm.

5. *Класифікація* полімерів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://granula.at.ua/publ/klasifikacija_polimeriv/1-1-0-31.

УДК 330.131.5:331.4:678.675

Н.М. Денисова, канд. техн. наук
Н.П. Буяльська, канд. техн. наук
Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

РОЗРАХУНОК СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РІШЕНЬ ЩОДО ПОЛІПШЕННЯ УМОВ ПРАЦІ ПІД ЧАС ФОРМУВАННЯ ПОЛІАМІДНИХ НИТОК

Н.Н. Денисова, канд. техн. наук
Н.П. Буяльская, канд. техн. наук
Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

РАСЧЕТ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ УСЛОВИЙ ТРУДА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОЛИАМИДНЫХ НИТЕЙ

Nataliia Denysova, PhD in Technical Sciences
Nataliia Buialska, PhD in Technical Sciences
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

THE CALCULATION OF SOCIAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF DECISIONS ON IMPROVEMENT OF WORKING CONDITIONS DURING FORMATION OF POLYAMIDE YARNS

На основі аналізу наявних методик розрахунку та можливих рішень щодо зниження забрудненості повітря робочої зони апаратників розраховано складові соціальної та економічної ефективності, що мають орієнтований характер та включають очікуваний економічний ефект від зниження захворюваності, збитку, заподіяному підпри-

ємству захворюваннями за лікарняними листами, економія за рахунок зменшення збитків через плинність кадрів та очікуваний економічний ефект за рахунок зменшення кількості випаровувань під час формування.

Ключові слова: *забрудненість повітря, комплекс працеохоронних рішень, соціально-економічна ефективність.*

На основании анализа существующих методик расчетов и возможных решений по снижению запыленности воздуха рабочей зоны аппаратчиков формирования полиамидных волокон рассчитаны показатели социально-экономической эффективности, которые имеют прогнозный характер и включают расчеты экономического эффекта от снижения заболеваемости органов дыхания, трат по больничным листам, трат от текучести кадров и экономии сырья за счет снижения количества выделений в воздух рабочей зоны.

Ключевые слова: *загрязненность воздуха рабочей зоны, комплекс мероприятий по улучшению условий труда, социально-экономическая эффективность.*

The indicators of socio- economic efficiency are calculated on the base of the analysis of existing methods of calculation and possible solutions to reduce pollution of the air of the working zone, which have oriented character and include the expected economic effect from reducing the incidence of disease, losses of sick; losses through staff turnover and the expected economic effect by reducing of evaporation in workplace area.

Key words: *air pollution of working area, the complex to improve working conditions decisions, socio-economic efficiency.*

Постановка проблеми. Виробництво синтетичних ниток та волокон у всіх розвинених країнах визначає технічні можливості вирішення багатьох сучасних проблем та створює численні робочі місця на своїх виробництвах та виробництвах легкої промисловості. Світове виробництво хімічних волокон за останні 50 років збільшилось майже в три рази [1], домінуюче положення в об'ємах хімічних волокон займають синтетичні, питома вага яких наближається 79 % [2]. На території пострадянського простору працюють близько 12 підприємств, що виробляють хімічні волокна, завантаженість яких зростає з кожним роком, а обладнання деяких цехів та технологічна схема отримання волокон залишаються незмінними, незважаючи на встановлення додаткового нового обладнання.

Технологічний процес формування супроводжується інтенсивним виділенням забруднюючих речовин – низькомолекулярних сполук капролактаму (НМС КЛ), що спричиняє перевищення ГДК аерозолю капролактаму в повітрі робочої зони у 3–4 рази ($ГДК_{р.з.}$=10 мг/м^3) та веде до підвищення рівнів захворювань органів дихання працівників. Незважаючи на наявний досвід боротьби з підвищеними концентраціями небезпечних сполук у повітрі робочої зони, в комплексах працеохоронних заходів на підприємствах та наукових дослідженнях проблема ще не вирішена, а розрахунок соціально-економічної ефективності рішень є важливим елементом системи впровадження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз інформації щодо комплексних рішень поліпшення умов праці під час формування поліамідних ниток (ПА) показав, що серед основних методів зниження забрудненості повітря робочої зони та засобів захисту працюючих найбільш поширеними є застосування закритих обдувних шахт, систем загальної та місцевої вентиляції, засобів індивідуального захисту органів дихання [3] (ЗІЗОД). Але розроблені методи мають певні недоліки, що обмежують їх використання. Так відомо, що постійне використання ЗІЗОД працівниками приводить до появи помилок і дискомфорту в обслуговуванні машин та, як наслідок, зниження працездатності. Основними недоліками закритих шахт є перешкоди в обслуговуванні та управлінні технологічним процесом, неповне видалення НМС з робочої зони (15 % від їх загальної кількості відносяться з ниткою), складність очищення великих об'ємів обдувного повітря (350–500 м^3/год замість 60–70 м^3/год – у відкритих шахтах) і висока собівартість самої конструкції [3].

У результаті аналізу попередніх досліджень [4] встановлено, що дослідження процесу утворення та розповсюдження забруднень під час формування ПА ниток може стати підґрунтям для розроблення ефективних методів захисту працюючих. На основі аналітичних досліджень джерел виділень та чинників, що впливають на процес утворення забруднюючих речовин під час формування ПА ниток встановлені основні оперативні параметри керування процесом виділень (температура формування і тиск обдувного повітря) та інтервал їх зміни (область мінімальних значень орієнтації ниток) [4],

де якість ниток стабільна та де доцільно варіювати цими параметрами для зменшення інтенсивності виділень. Використання цього технологічного методу керування параметрами процесу дозволяє прогнозувати інтенсивність виділень. Виявлені методи оцінювання небезпеки перебування апаратників у робочій зоні залежно від відстані та часу перебування апаратника в шкідливій зоні, визначення мінімально забруднених зон та раціонального розміщення пункту керування обладнанням [4]. У попередніх дослідженнях авторів розроблено пристрій індивідуального візуального контролю забрудненості повітря під час виникнення нерегламентованих ситуацій під час формування ПА волокон [4].

Таким чином, запропоновано комплексне рішення щодо поліпшення умов праці апаратників щодо зниження забрудненості повітря робочої зони, впровадження якого потребує аналізу економічних та соціальних показників.

Метою роботи є визначення соціально-економічних показників від поліпшення умов праці апаратників формування ПА ниток.

Для досягнення поставленої мети визначено такі ***завдання*** досліджень:

– розрахувати соціальний показник зниження кількості захворювань органів дихання працівників;

– розрахувати економічний ефект від впровадження комплексу рішень.

Виклад основного матеріалу досліджень. Для оцінювання ступеня впливу підвищених концентрацій НМС на кількість захворювань органів дихання апаратників формування було вивчено статистичний матеріал ВАТ «Чернігівське „Хімволокно”» [5] (табл. 1).

Таблиця 1

Вплив концентрації НМС капролактаму на захворюваність органів дихання працівників

Завантаженість цеху, $B_{кл}$, т/рік	610	1230	1360	1416	1250	1028
Середньорічна концентрація НМС, $C_{р.з.}$, мг/м^3	3,37	7,45	8,82	9,65	7,95	6,90
Кількість захворювань органів дихання за рік на 100 працюючих	74,1	108,8	119,2	127,8	114,2	103,7

Враховуючи динаміку змін концентрації капролактаму в повітрі формувальної дільниці за періодами ($C_{кл}$), завантаженості цеху ($B_{кл}$), захворюваності органів дихання апаратників прядильного цеху ВАТ «Чернігівське „Хімволокно”» (ζ), середньорічної концентрації $C_{кл}$ капролактаму в повітрі плавильної частині та формувальної частини і значення $ГДК_{р.з.}$ України та ЄС, авторами запропоновано показник питомої захворюваності органів дихання працівників.

$$\zeta = f(C_{кл}), \quad (1)$$

де ζ – питомий показник захворюваності (кількість захворювань органів дихання в перерахунку на 100 чоловік за рік);

$C_{кл}$ – середньорічна концентрація капролактаму в повітрі робочої зони, що визначена за колориметричним методом, мг/м^3.

Залежність (1) майже лінійна, тобто:

$$\zeta = a + b \cdot C_{кл}, \quad (2)$$

де а – визначає відносно постійну кількість хвороб органів дихання, що не залежать від виробничих умов;

$b \cdot C_{кл}$ – критерій збільшення кількості захворювань, обумовлених дією підвищених концентрацій шкідливих речовин у повітрі.

На основі значень джерела [6] та рівняння (2) методом множинної регресії, враховуючи коефіцієнт кореляції R=0,85, знайдено (σ=10% при γ=0,95):

$$\zeta = 44{,}84 + 8{,}53 \cdot C_{кл}. \quad (3)$$

Також встановлено, що зміна середньорічних даних щодо захворюваності та завантаженості виробництва корелюють з коефіцієнтом R=0,97.

Виходячи з отриманої залежності, можна зробити висновок, що зменшення середньорічної концентрації на 1,0 мг/м^3 зменшує кількість захворювань органів дихання працівників на 8,5 % (для 100 чоловік працюючих).

Для цього необхідно враховувати поряд з науковими технічні питання процесу формування. Одночасно зі зміною $С_{кл}$, що залежить від завантаженості виробництва $В_{кл}$, змінюється й кількість перевищень ГДК ($П_р$) – від 8,3 % при $С_{кл}$=6,9 мг/м^3 до 41,1 % при $С_{кл}$=9,65 мг/м^3. Залежність $П_р$ від $С_{кл}$ характеризується коефіцієнтом кореляції R=0,60 та апроксимується лінійною функцією (σ=15 % при γ=0,90):

$$П_р = -63{,}99 + 10{,}51 \cdot С_{кл}. \quad (4)$$

Розрахунок за залежністю (4) показує, що ризик перевищення ГДК стає незначним при $С_{кл}$=6,0 мг/м^3, при подальшому зниженні $С_{кл}$ до 3,4 мг/м^3 82 % даних відповідають міжнародним стандартам $ГДК_{ЄС}$=5 мг/м^3.

Для досягнення рівня $С_{кл}$=6,0 мг/м^3 необхідно знизити середнє значення $С_{кл}$, що дорівнює 8,15 мг/м^3, на 35–40 %, знижуючи інтенсивність виділень зі збереганням об'ємів та якості продукції, яка випускається. Крім того, необхідним є зниження коливань $С_{кл}$, що виникають внаслідок зміни завантаженості виробництва та технологічних параметрів, а також під час виконання робіт запуску та зупинки формувальних машин, очищення обдувних шахт парою та ін.

Комплекс методів щодо зниження забрудненості повітря виробничих дільниць, що розроблено авторами в попередніх дослідженнях, включає: запобігання проникненню шкідливих речовин у повітря робочої зони за рахунок удосконалення технологічного процесу (технологічний метод зниження забрудненості повітря – регулювання технологічними параметрами процесу формування); видалення шкідливих речовин за рахунок вентиляційних систем (прогнозоване керування об'ємами повітря, що подається, з урахуванням зміни технологічних параметрів процесу формування); застосування засобів захисту працюючих (використання індикаторного пристрою візуального контролю забрудненості повітря, що спонукає до використання ЗІЗОД); організаційні методи (обґрунтоване скорочення часу робочої зміни, раціональне розміщення пункту керування обладнанням у мінімально забрудненій зоні).

Розроблені рішення дозволяють не тільки поліпшити умови праці на виробництві завдяки зниженню концентрації НМС у повітрі формувальної дільниці на 43 % та досягти рівня міжнародних стандартів зі вмісту аерозолю КЛ у повітрі робочої зони під час формування ПА ниток - 5 мг/м^3, але й отримати показники соціально-економічної ефективності від впровадження цих рішень.

Прогноз результатів впровадження комплексу методів у виробництво ВАТ «Чернігівське „Хімволокно"» можна представити таким чином: зниження концентрації забруднюючих речовин у повітрі формувальних дільниць на $\Delta С_{кл}$=43 % (до рівня міжнародних стандартів зі вмісту аерозолю капролактаму у повітрі робочої зони 5 мг/м^3, розраховано за [4]), захворюваність органів дихання працівників знижена на $\Delta\zeta$ = 28 % (розраховано згідно із залежністю (3)).

Згідно з методикою, розробленою Національним науково-дослідним інститутом промислової безпеки та охорони праці України, до основних груп показників поліпшення умов праці відносяться соціальні (скорочення чисельності працівників ΔЧ, що працюють в умовах, які не відповідають вимогам нормативних документів) та економічні [7] (очікуваний економічний ефект від зниження захворюваності ($Е_р$), економія збитку, заподіяному підприємству захворюваннями за лікарняними листами ($Е_л$), та економія за рахунок зменшення збитків через плинність кадрів ($Е_{пл}$)), також до цієї групи

показників можна віднести очікуваний економічний ефект за рахунок зменшення виділень полімеру на шляху фільєрного витягування ($Е_{кл}$). Під час проведення розрахунків важливо враховувати суми витрат на впровадження розроблених рішень: витрат на збільшення тиску обдувного повітря та витрат на впровадження індивідуального індикаторного пристрою візуального оцінювання забрудненості повітря.

Методика проведення розрахунків, вихідні дані та результати обчислень наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунків складових економії витрат у результаті впровадження комплексу працеохоронних рішень під час формування поліамідних ниток

Складові соціально-економічної ефективності	**Формули для розрахунків**	**Пояснення до елементів формул**	**Вихідні дані**	**Очікуваний результат впровадження**
1	2	3	4	5
Скорочення чисельності працівників ΔЧ, що працюють в умовах, які не відповідають вимогам нормативних документів	$\Delta Ч = \frac{Ч_1 - Ч_2}{Ч_3} \cdot 100\%$	$Ч_1$, $Ч_2$ – чисельність працівників, що працюють в умовах, які не відповідають санітарним нормам, відповідно до та після впровадження заходу, чол.; $Ч_3$ – річна середньооблікова чисельність працівників, чол.	$Ч_1$= 187 чол. $Ч_2$=112 чол. $Ч_3$ = 237 чол.	ΔЧ=31,6 %
Очікуваний економічний ефект $Е_р$ від зниження захворюваності	$E_p = B_p \cdot З_{ср}(1+\frac{П_{с.с.}}{100}) \times$ $\times \Delta N$	$В_р$ – умовне звільнення працівників: $B_p = (1-\frac{100-З_1}{100-З_2}) \cdot Ч_3,$ $З_1$, $З_2$ – відсоток втрати робочого часу через захворюваність до і після впровадження методів: $З_{1,2} = \frac{Д_{01,02} \cdot 100}{Ч_3 \cdot Ф},$ $Д_{01,02}$ – кількість днів відсутності працівника через захворюваність за рік до та після впровадження методів відповідно, днів; Ф – річний ефективний фонд робочого часу одного працівника, год/рік; $З_{ср}$ – середньорічна заробітна плата одного працівника, грн/рік $П_{с.с.}$ – відсоток відрахувань на соціальне страхування, % $\Delta N = N_1 - N_2$, $N_{1,2}$ – кількість захворювань органів дихання до та після впровадження запропонованих методів	$Д_{01}$=12,3 діб $Д_{02}$=7,2 діб $Ф_1$=1819 год $Ф_2$=1835 год N_1 = 268 вип. N_2=161 вип.	$В_р$=35 чол. $Е_р$= 73,9 тис. грн
Економія збитку, заподіяному підприємству $Е_л$ за лікарняними листами	$Е_л = 5 \cdot D_{ср} \cdot \Delta N$	$D_{ср}$ – середньоденний заробіток працівника, грн	$D_{ср}$ = 187,5 грн	$Е_л$=14,1 тис. грн

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5
Очікуваний економічний ефект $Е_{кл}$ за рахунок зменшення виділень полімеру на шляху фільєрного витягування	$E_{кл} = B_{кл} \cdot Q \cdot u \times$ $\times Д \cdot Ф \cdot Ц_{кл}$	$В_{кл}$ – об'єм сировини, що переробляється однією формувальною машиною за добу, кг; Q – відсоток виділень під час формування поліамідних ниток від ваги переробленого капролактаму, од.; u – відсоток зниження загальної кількості виділень завдяки використанню розробленого комплексу методів, од.; Д – кількість робочих днів на рік, діб; Ф – кількість працюючих формувальних машин, од.; $Ц_{кл}$ – вартість одного кг сировини – капролактаму з урахуванням втрат на підготовку до формування (транспортування, полімеризація, нагрів та ін.)	$В_{кл}$=9000 кг/добу Q=0,0025 u= 0,42 Д=365 діб Ф=6 од. $Ц_{кл}$=20,4 грн/кг	$Е_{кл}$= 422,2 тис. грн
Витрати на впровадження комплексних рішень зниження забрудненості повітря				
Витрати $П_1$ на збільшення тиску обдувного повітря	$П_1 = \Delta О \cdot Д \cdot Ф \cdot Ц_{пов}$	ΔО – перевищення об'ємів обдувного кондиційованого повітря у зв'язку з підвищенням тиску обдувного повітря з 400 Па до 500 Па, $м^3$/добу; $Ц_{пов}$ – вартість одного $м^3$ підготовленого обдувного повітря, грн/ $м^3$	ΔО= 32842 $м^3$/добу Д = 365 діб Ф = 6 од. $Ц_{пов}$= 0,0033 грн/ $м^3$	$П_1$=237,2 тис. грн
Витрати $П_2$ на впровадження індивідуального індикаторного пристрою візуального оцінювання забрудненості повітря	$П_2 = Ч_4 \cdot Ц_{інд} \cdot З_{впров}$	$Ч_4$ – кількість чоловік, що повинні використовувати засоби індивідуального захисту; $Ц_{інд}$ – вартість одного індикатора та змінних плівок, грн; $З_{впров}$ – витрати на впровадження одного індикатора у виробничий процес (матеріальне стимулювання, проведення позапланового інструктажу, контроль використання)	$Ч_4$= 60 чол. $Ц_{інд}$=30 грн $З_{впров}$=30 грн	$П_2$ = 54,0 тис. грн
Очікуваний економічний ефект від впровадження розроблених заходів				
$Е= Е_р+Е_л+Е_{пл} + Е_{кл} – П_1 – П_2$		Е = 243,7 тис. грн		

Таким чином, у результаті проведених обчислень встановлено, що очікуваний економічний ефект від впровадження розроблених заходів суттєвий.

Висновки та пропозиції. На основі проведених досліджень сформовано комплексне рішення щодо зниження підвищених концентрацій НМС на ділянках формування ПА ниток, що дозволяє знизити концентрацію забруднюючих речовин у повітрі робочої зони на 43 %, а кількість захворювань органів дихання працівників на 28 %. Встановлено, що за рахунок впровадження запропонованих рішень можна скоротити чисельність працівників, що працюють в умовах, які не відповідають вимогам нормативних документів на 31,6 %, причому очікувана щорічна економія становитиме 243,7 тис. грн.

Список використаних джерел

1. *Тарасова Н. В.* Хімічний комплекс України: тенденції, проблеми, перспективи розвитку / Н. В.Тарасова – К. : Науковий світ, 2001. – 253 с.

2. *Айзенштейн Э. М.* О тенденциях мирового развития химического волокна / Э. М. Айзенштейн // Техника для химволокон : сборник докладов II Междунар. научно-практ.

конф. (Чернигов, 8–11 апр. 2003 г.). – Чернигов : АО «Химтекстильмаш», ЧнЦНТЭИ, 2003. – С. 10–21.

3. *Лалетина О. П.* Химия и технология химических волокон. Защита воздушного басейна от загрязнений производств химических волокон : учебное пособие / О. П. Лалетина, Л. Г. Хижняк, К. А. Малышевская. – Красноярск : СибГТУ, 2001. – 44 с.

4. *Денисова Н. М.* Зниження забрудненості повітря робочої зони при формуванні поліамідних ниток : автореф. дис. … канд. техн. наук : спец. 05.26.01 «Охорона праці» / Н. М. Денисова. – К., 2010. – 20 с.

5. *Дослідження* вливу виробничих факторів з метою підвищення ефективності засобів охорони праці : звіт про науково-дослідну роботу / Чернігівський державний технологічний університет. – Чернігів, 2006. – 45 с. – № ДР 0106V002522. – Інв. № 207U000072.

6. *Денисова Н. М.* Дослідження санітарно-гігієнічних умов виробництва синтетичних волокон / Н. М. Денисова // Проблеми охорони праці в Україні : збірник наукових праць. – К. : ННДІПБОП, 2011. – Вип. 21. – С. 77–83.

7. *Методика* визначення соціально-економічної ефективності заходів щодо поліпшення умов і охорони праці. – К. : Основа, 1999. – 94 с.

УДК 620.179:534.6

О.П. Космач, канд. техн. наук
Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МОДЕЛЬНИХ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПІД ЧАС ЗМІНИ НАВАНТАЖЕННЯ ПАРИ ТЕРТЯ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

А.П. Космач, канд. техн. наук
Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАГРУЗКИ ПАРЫ ТРЕНИЯ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Oleksandr Kosmach, PhD in Technical Sciences
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

SPECTRAL ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION MODEL SIGNALS UNDER LOAD CHANGES OF FRICTION UNITS FROM COMPOSITE MATERIALS

Проведено моделювання результуючих сигналів акустичної емісії під час зміни величини контактного навантаження поверхонь фрикційного контакту із композиційних матеріалів з їх подальшим спектральним аналізом. Показано, що у разі збільшення навантаження на пару тертя із композиційних матеріалів відбувається зміна амплітуди та частоти спектральної складової результуючих сигналів акустичної емісії. Визначено, що контактне навантаження по-різному впливає на зміну амплітуди та частоти спектральної складової результуючих сигналів акустичної емісії. Встановлено, що зростання навантаження приводить до нелінійного зростання амплітуди спектральної складової результуючого сигналу акустичної емісії з одночасним лінійним падінням його відповідного частотного значення. З'ясовано, що під час зміни величини контактного навантаження поверхонь фрикційного контакту із композиційних матеріалів приріст амплітудного значення спектральної складової перевищує відповідне значення частотної складової сигналу акустичної емісії.

***Ключові слова**: акустична емісія, амплітуда, аналіз, композиційний матеріал, навантаження, перетворення.*

Проведено моделирование результирующих сигналов акустической эмиссии при изменении величины контактной нагрузки на поверхности фрикционного контакта из композиционных материалов с их последующим спектральным анализом. Показано, что при увеличении нагрузки на пару трения из композиционных материалов происходит изменение амплитуды и частоты спектральной составляющей результирующих сигналов акустической эмиссии. Определено, что приложенная нагрузка по-разному влияет на изменение амплитуды и частоты спектральной составляющей результирующих сигналов акустической эмиссии. Установлено, что возрастание нагрузки приводит к нелинейному росту амплитуды спектральной составляющей результирующего сигнала акустической эмиссии с одновременным линейным падением ее частотного значения. Выяснено, что при изменении величины нагрузки поверхностей фрикционного контакта из композиционных материалов прирост амплитудного значения спектральной составляющей превышает значение частотной составляющей сигнала акустической эмиссии.

***Ключевые слова:** акустическая эмиссия, амплитуда, анализ, композиционный материал, нагрузка, преобразование.*

The simulation of resultant acoustic emission signals at change of contact load of frictional contact with composite materials and their subsequent spectral analysis were conducted. Was shown what increasing of load on the friction pair with composite materials occurs changes of amplitude and frequency of spectral component of resultant acoustic emission signals. Was determined that contact load differently affects on amplitude and frequency of the spectral component of resultant acoustic emission signals. Was determined that the increase in load leads to nonlinear increase in amplitude of spectral component of resultant acoustic emission signals with simultaneous linear fall of their frequency values. Was determined that at change of contact load of frictional contact surfaces of the composite materials occurs increase of amplitude spectral component which exceeds corresponding values of frequency spectral component of acoustic emission signals.

***Key words**: acoustic emission, amplitude, analysis, composite material, tension, transformation.*

Постановка проблеми. За останні десятиріччя одним із перспективних напрямків підвищення довговічності рухомих з'єднань є утворення зносостійких покриттів на основному матеріалі робочих поверхонь елементів вузла. Широке використання в цьому напрямку знайшли композиційні матеріали (КМ) завдяки варіації своїх фізико-механічних властивостей, а також технології їх виготовлення та нанесення на основний матеріал. До найбільш розповсюджених груп таких матеріалів відносять мінералокерамічні, металокерамічні та полімерні матеріали. Слід зазначити, що для кожної групи КМ характерні деякі відмінності у застосуванні. Так, наприклад, мінералокерамічні матеріали частіше використовуються в рухомих високонавантажених з'єднаннях в умовах агресивного середовища. У свою чергу, полімерні КМ знайшли своє широке використання в медицині.

Питанню використання КМ як робочих поверхонь вузла тертя приділяється підвищена увага в науково-технічній літературі. При цьому основні дослідження спрямовані на оптимізацію вибору контактуючих типів КМ, оптимізацію режимів роботи самого вузла тертя, дослідження мікроструктурних змін поверхневих шарів КМ, виявлення та ідентифікація дефектів поверхневих шарів та ін. Водночас з цим є проблема контролю та діагностики стану таких вузлів тертя, що обумовлено як специфікою будови, так і особливостями зношування та руйнування поверхневих шарів КМ. Експериментальні дослідження показують, що використання традиційних лабораторних методів, в основі яких лежить аналіз традиційних механічних показників, дозволяє достовірно аналізувати лише повільні макропроцеси зношування та руйнування поверхневих шарів КМ. Проте з погляду контролю та діагностики поверхневих шарів вузлів тертя важливим завданням є фіксація мікропроцесів, які розвиваються на поверхнях фрикційного контакту і є початковими етапами зародження необоротного руйнування поверхневих шарів КМ. Слід зазначити, що такий аналіз процесів тертя та зношування першочергово повинен ґрунтуватися на методах, які дозволяють отримати великі об'єми інформації про процеси контактної взаємодії поверхонь фрикційного контакту.

Останніми роками під час дослідження процесів тертя та зношування поверхневих шарів фрикційного контакту з традиційних матеріалів та КМ використовуються методи неруйнівного контролю, які мають високу чутливість до мікропроцесів, що постійно змінюються та розвиваються. До таких методів можна віднести вихрострумовий метод, вібраційний метод, а також метод акустичної емісії (АЕ). Слід зазначити, що до основних переваг методу АЕ можна віднести його високу чутливість до процесів зношування та руйнування матеріалів, які відбуваються на мікрорівні; відсутність впливу власних вібрацій елементів вузла тертя на формований сигнал; інформування в режимі реального часу; інтегральність; велика проникаюча здатність; можливість автоматизації. Результати багатьох експериментальних досліджень показують, що формовані сигнали АЕ є відображенням кінетики процесів, які розвиваються на субмікро-, мікро- та макрорівнях. Така особливість може бути використана під час розроблення методів контролю та діагностики робочих поверхонь вузлів тертя, включаючи і вузли тертя з КМ. Проте низька інерційність та висока чутливість методу АЕ потребує визначення залежностей між параметрами акустичного випромінювання та параметрами процесів, які утворюються або розвиваються. Вирішення цього завдання повинно ґрунтуватися, передусім, на результатах теоретичних досліджень, які пов'язані з моделюванням акусти-

чного випромінювання під час зміни зовнішніх чинників. Такі дослідження дозволяють інтерпретувати акустичне випромінювання, визначити закономірності основних параметрів акустичного випромінювання при дії різних факторів, зокрема зміні неоднорідності фізико-механічних властивостей, зміні схильності до крихкого або пластичного руйнування та ін. Подібні закономірності є основою під час розроблення та вдосконалення методів контролю та діагностики вузлів тертя із КМ. Як показують результати багатьох досліджень, експлуатаційні показники вузла тертя, зокрема, контактне навантаження є одним із факторів, який впливає на характер процесу тертя та зношування, а отже, як результат, і на формований сигнал АЕ та його параметри. При цьому рівень напружень, який виникає в поверхневих шарах КМ, безпосередньо пов'язаний з межею його міцності. Це дозволяє проводити дослідження поверхневого шару КМ до стадії його необоротного руйнування та зношування. Однією з ключових проблем при цьому також залишається забезпечення завадостійкості діагностичного обладнання АЕ.

З урахуванням викладеного і з метою подальшого розвитку методу АЕ в контролі та діагностиці вузлів тертя із КМ, а також для теоретичного обґрунтування процесів формування акустичного випромінювання перспективним напрямком теоретичного дослідження є спектральний аналіз модельних результуючих сигналів АЕ під час зміни величини контактного навантаження поверхонь фрикційного контакту вузла тертя із КМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метод АЕ широко використовується під час дослідження процесів тертя та зношування поверхонь, які виготовлені з матеріалів із кристалічною структурою та КМ [1–4]. Результати досліджень показують складний характер зміни параметрів реєстрованих сигналів АЕ на різних стадіях розвитку процесу тертя та зношування поверхонь фрикційного контакту. Така видозміна акустичного випромінювання свідчить про низьку інерційність цього методу та його високу чутливість до мікропроцесів, які розвиваються в поверхневих шарах традиційних матеріалів та КМ. Однак на сьогодні інтерпретація цих процесів є ключовою проблемою, яка суттєво обмежує широке використання методу АЕ в діагностуванні фрикційних вузлів з традиційних матеріалів та КМ. При цьому таке завдання є достатньо складним через великий обсяг теоретичних та експериментальних досліджень, а також особливості використовуваного обладнання. Ця проблема знаходить своє часткове вирішення завдяки розробленню стохастичних моделей сигналів АЕ, проте істотні результати, а також встановлення узагальнених та об’єктивно наявних зв’язків між фізичними процесами, які відбуваються під час тертя поверхонь, ці моделі не дозволяють отримати.

Теоретичне дослідження акустичного випромінювання, яке формується під час тертя поверхонь матеріалів з традиційною структурою, розглянуто в роботах [5; 6]. Для дослідження акустичного випромінювання були використані моделі сигналів АЕ, які формуються у разі руйнування вторинних структур I та II типів, що характеризують схильність поверхневого шару матеріалу до крихкого та пластичного руйнування. Також було проведено моделювання сигналів АЕ, які формуються в умовах дії різних факторів. При цьому було показано, що сформовані результуючі сигнали АЕ є неперервними сигналами, які мають постійний середній рівень на стадії нормального зношування поверхонь фрикційного контакту. Результати проведених теоретичних досліджень дозволили визначити основні закономірності зміни амплітудних параметрів сигналів АЕ під час зміни факторів, що впливають.

У працях [7–9] були розглянуті результати моделювання імпульсних сигналів АЕ, які формуються у разі руйнування зразка КМ під дією статичної поперечної сили. За таких умов навантаження КМ формований сигнал АЕ було представлено виразом виду

$$U(t) = U_0 \upsilon_0[\sigma(t) - \sigma_0] \cdot e^{r[\sigma(t)-\sigma_0] - \upsilon_0 \int_{t_0}^{t} e^{r[\sigma(t)-\sigma_0]} dt}, \quad (1)$$

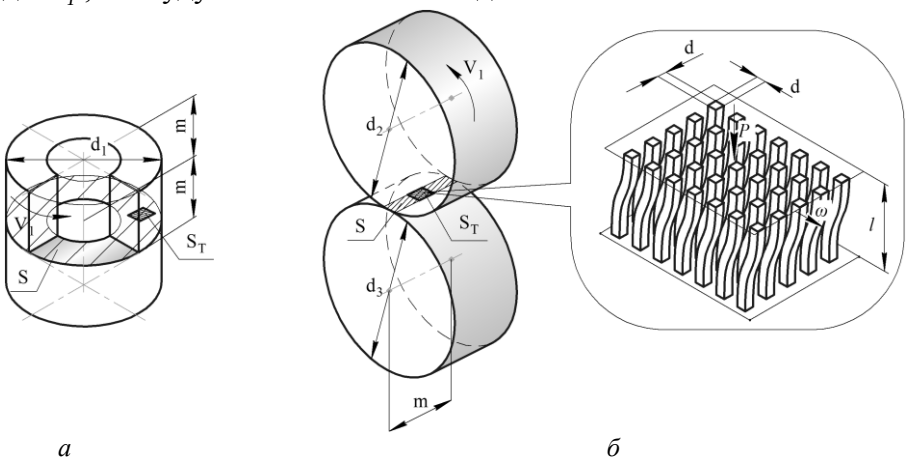
де $U_0 = N_0 \beta \delta_S$ – максимально можливе зміщення при миттєвому руйнуванні всіх елементів КМ; N_0 – вихідна загальна кількість елементів КМ; β – коефіцієнт пропорційності; δ_S – параметр, чисельне значення якого визначається формою одиночного імпульсу збурення у разі руйнування одиничного елементу КМ; $\sigma(t) = \alpha t(1-\alpha t)(1-g\sqrt{\alpha t})$ – еквівалентне напруження, яке виникає під час навантаження КМ; α – швидкість прикладення навантаження елементів КМ; t – поточне значення часу; g – коефіцієнт, який характеризує залежить від геометричних розмірів елементів КМ; σ_0 – порогове (граничне) напруження, яке відповідає часу початку руйнування t_0 елементів КМ; r, υ_0 – змінні, які залежать від фізико-механічних характеристик елементів КМ.

Розроблена модель сигналу АЕ (1) була використана як модель результуючого сигналу АЕ, який формується під час тертя поверхонь з КМ. При цьому результуючий сигнал АЕ [10] був представлений як сума імпульсних сигналів АЕ, які формуються на окремих площадках контактної взаємодії у вигляді виразу виду

$$U_p(t) = \sum_j U_j(t - t_j), \qquad (2)$$

де j – порядковий номер площадки контактної взаємодії (j = 1, 2, 3, ..., m); $U_j(t_j)$ – j-ий імпульсний сигнал АЕ, який формується на j площадці контактної взаємодії, згідно з виразом (1); t_j – момент часу появи j-го сигналу АЕ; m – загальна кількість імпульсних сигналів АЕ, які формуються за визначений період експлуатації вузла тертя згідно з прийнятою програмою випробування.

Вихідними даними під час моделювання сигналів АЕ згідно з (2) є наступне. Вузол тертя представляє собою сукупність двох поверхонь фрикційного контакту, одна з яких здійснює переміщення або обертання відносного іншої з постійною швидкістю (рис. 1, *а*). Площадка контактної взаємодії представляє собою певну малу та змінну в часі площадку S_T або площу, яка рівномірно заповнена виступами та впадинами в загальній площі S перекриття поверхонь із КМ (рис. 1, *б*). Слід зазначити, що незалежно від схеми випробування зразків тертя при рівномірно навантаженому з'єднанні по довжині контакту між поверхнями фрикційної взаємодії завжди будуть утворюватися площадки контактної взаємодії S_T, які будуть залежати лише від кількості елементів КМ.



а *б*

Рис. 1. Кінематичні схеми вузлів тертя у вигляді роликів із взаємодією по торцевим (а) та циліндричним поверхням (б): V_1 – швидкість обертання вузла тертя; S – загальна площа перекриття поверхонь фрикційного контакту; S_T – елементарна площадка контакту S_T у загальній площі перекриття поверхонь S пари тертя; m, d_1, d_2, d_3 – лінійні розміри зразків; d, l – лінійні розміри одиничного елементу композиційного матеріалу; P, ω – відповідно, осьове та поперечне навантаження, яке виникає при поперечному навантаженні елементів композиційних матеріалів

Під час зміни відносного розташування поверхонь фрикційного контакту в межах визначеної площадки контактної взаємодії S_T відбувається руйнування деякої визначеної кількості N_0 елементів КМ, які мають певні фізико-механічні характеристики та розміри, які відповідно визначаються параметрами моделі υ_0, r та g, що входять до виразу (1).

Зміна положення площадки контактної взаємодії в часі забезпечується відповідною швидкістю обертання вузла тертя, а величина контактної взаємодії поверхонь фрикційного контакту визначається відповідною швидкість їх навантаження. Задана швидкість обертання та прикладене навантаження на вузол тертя, з урахуванням розмірів елементів, визначають закономірність зміни еквівалентних напружень та порогового напруження σ_0 в часі при початку руйнування елементів КМ. Слід зазначити, що в розробленій моделі не враховуються крайові ефекти, які можуть бути пов'язані з нерівномірністю навантаження поверхонь фрикційного контакту. При цьому значною мірою не враховується нерівномірність навантаження поверхонь, відхилення форми поверхонь, а також вплив мастильного шару на рівномірність взаємодії поверхонь фрикційного контакту.

Момент часу t_j появи окремого імпульсного сигналу АЕ можна представити у вигляді суми стаціонарної та випадкової складових процесу

$$t_j = j \cdot \Delta t_j \pm \delta, \tag{3}$$

де Δt_j – інтервал часу між початком появи наступного та попереднього імпульсного сигналу АЕ; δ – випадкова складова в момент часу появи кожного наступного сигналу АЕ.

Введення складової δ обумовлено варіацією властивостей елементів КМ, а також нестабільністю положення площадки S_T у загальній площі перекриття S (рис. 1).

Згідно з рівнянням (2), з урахуванням (3), можна провести моделювання результуючих сигналів АЕ, які формуються в умовах тертя поверхонь із КМ під час зміни величини навантаження поверхонь фрикційного контакту з подальшим їх спектральним аналізом.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. У сучасній науковій літературі найчастіше проводиться спектральний аналіз лише експериментальних даних, наприклад [11; 12], що викликано відсутністю фізичних моделей сигналів АЕ, які формуються під час тертя поверхонь. Наявні спектральні дослідження модельних сигналів АЕ проводилися лише для тестового гармонічного сигналу, який не пов'язаний із процесами тертя та зношування [13], а також для розробленої спрощеної стохастичної моделі сигналу АЕ [14].

Формулювання мети статті. У роботі проведено спектральний аналіз модельних результуючих сигналів АЕ, які формуються під час тертя поверхонь із КМ, з урахуванням зміни величини їх контактного навантаження. Показано, що для прийнятої швидкості обертання пари тертя зростання навантаження приводить до нелінійного зростання амплітуди спектральної складової результуючого сигналу АЕ з одночасним лінійним зменшенням її частотного значення. При цьому показано, що під час зміни величини контактного навантаження поверхонь фрикційного контакту із КМ значення приросту амплітудного значення спектральної складової перевищує відповідне значення частотної складової результуючого сигналу АЕ на стадії нормального зношування вузла тертя.

Виклад основного матеріалу. Результати багатьох експериментальних досліджень показують, що зміна величини прикладеного навантаження до поверхонь вузла тертя з КМ приводить до зміни еквівалентних напружень, а також взаємопов'язаних механіч-

них параметрів, таких як момент обертання, момент тертя та сила тертя. Для навантаженої поверхні фрикційного контакту з КМ це означає, що під час збільшення порогової та кінетичної сил, внаслідок зростання прикладеного навантаження, відбувається зростання локальної швидкості зміни еквівалентних напружень. На рис. 2 представлено фактори, які враховуються під час моделювання сигналів АЕ та які впливають на результуючий сигнал АЕ, а, отже, і на характер тертя та зношування поверхонь фрикційного контакту із КМ.

У представленій роботі проводився спектральний аналіз амплітуди результуючого сигналу АЕ при величині навантаження (швидкості навантаження) та варіації положення площадки контактної взаємодії за умови постійності дії всіх інших перерахованих факторів. При цьому спектральний аналіз результуючих сигналів АЕ, які формуються під час тертя поверхонь із КМ в умовах зміни величини контактного навантаження, полягав у наступному. Спочатку проводилося моделювання чотирьох результуючих сигналів АЕ на стадії нормального зношування поверхонь тертя при різних значеннях величини контактного навантаження. Об’єм вибірки для всіх досліджуваних сигналів АЕ був однаковим та становив 1000 значення. На наступному етапі проводилося оброблення отриманих результуючих сигналів АЕ, яка полягала у прямому дискретному перетворенні Фур’є згідно із загальноприйнятими методиками цифрового оброблення сигналів [15]. При цьому був прийнятий прямокутний тип вагового (згладжуючого) вікна, тобто розглядався спектр дискретного амплітудного сигналу без додаткового згладжування. Слід зазначити, що вибір типу вагового вікна є окремим завданням, яке полягає в більш точному перетворенні амплітудних та частотних спектральних складових результуючого сигналу АЕ. В подальшому проводився спектральний аналіз результуючих сигналів АЕ з побудовою залежностей (спектрограм), які показують зміну амплітуди та частоти спектральних складових дискретного сигналу АЕ під час зміни величини контактного навантаження поверхонь фрикційного контакту із КМ. Після цього проводилася апроксимація отриманих залежностей з подальшим аналізом та узагальненням результатів дослідження.

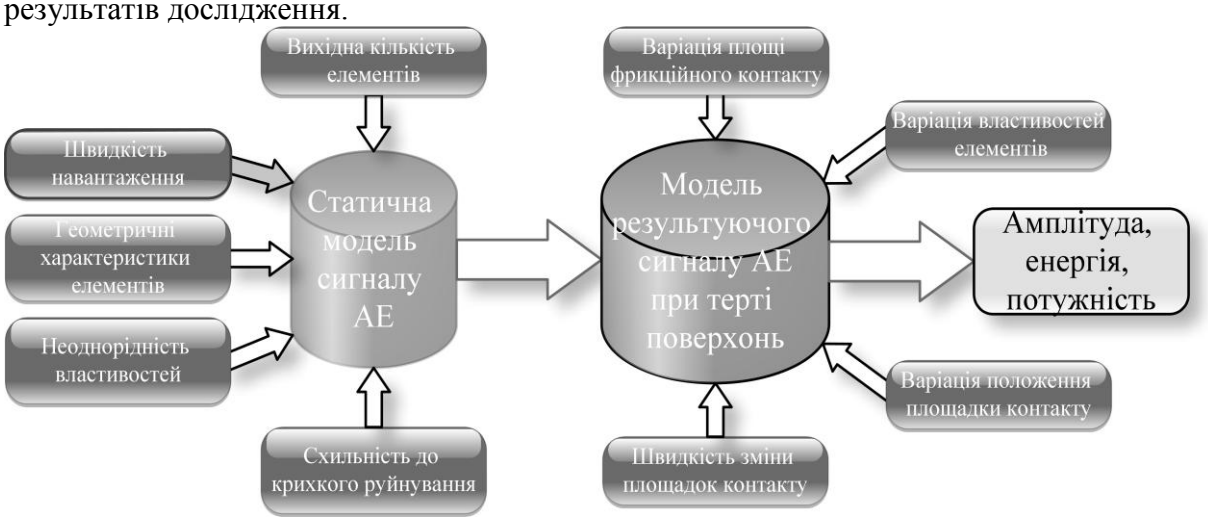


Рис. 2. Фактори, які впливають на результуючий сигнал акустичної емісії під час тертя поверхонь із композиційних матеріалів згідно з розробленими статичною та динамічною моделями сигналів акустичної емісії

Дослідження показують, що під час збільшення величин прикладеного навантаження [10] відбувається зменшення тривалості формованого імпульсного сигналу АЕ, а також зменшення величини випадкової складової його появи. Тому під час моделювання сигналів АЕ зі збільшенням значень контактного навантаження пари тертя пропорційно зменшувалися значення параметра δ для виразу (3).

З урахуванням прийнятих умов було проведено моделювання результуючих сигналів АЕ згідно з виразами (1–3) під час зміни величини прикладеного навантаження до пари тертя із КМ. Вважали, що для заданої початкової швидкості навантаження α величина прикладеного осьового навантаження змінювалася пропорційно, тобто $P = k \cdot \alpha$, а також, що зі зростанням навантаження P буде збільшувалася швидкість руйнування елементів КМ відносно її початкового значення α, тобто швидкість руйнування була такою: $\alpha_i = \alpha + \Delta\alpha_i$, де i – порядковий номер приросту навантаження. Під час моделювання всі параметри, які входили до виразів (1–3), були приведені до безрозмірних величин. Початкове мінімальне значення швидкості навантаження $\tilde{\alpha}$ прийняли рівним $\tilde{\alpha}$ =200, а значення прикладеного навантаження $\tilde{P}$ дорівнювало $\tilde{P}$ =200 для $k = 1$. За цих умов час початку руйнування $\tilde{t}_0$ першої площадки контактної взаємодії у відносних одиницях при $\tilde{\sigma}_0$ =0,1019419 згідно з [8] становив $\tilde{t}_0$ =0,0006. Значення параметрів υ_0, g і r, які входили до виразу (1), приймали рівними: $\tilde{\upsilon}_0 = 10^6$; $\tilde{g}$ = 0,1; $\tilde{r} = 10^4$. Моделювання проводилося у відносних одиницях для обмеження впливу чутливості вимірювального обладнання під час реєстрації сигналів АЕ. Слід зазначити, що контактне навантаження P не входило в явному вигляді до виразу (2). Його вплив визначався через зміну граничного напруження, величину якого розраховували у вигляді еквівалентного напруження, з урахуванням взаємозв'язку дотичного та нормального напружень. Для виконання розрахунків було визначено, що коефіцієнт тертя f =1, а осьове навантаження зростало від 200 до 260 з кроком 20. При цьому час $\tilde{t}_0$ початку руйнування елементів КМ зі зростанням значень $\tilde{P}$ залишався постійним. За отриманими значеннями $\tilde{\sigma}_0$ згідно з [8] за умови постійності $\tilde{t}_0$ визначали швидкість руйнування α_i.

Значення інтервалу часу $\Delta\tilde{t}_j$, який характеризує швидкість зміни площадок контактної взаємодії, а, отже, і швидкість обертання вузла тертя, для $\tilde{\alpha}$ =200 та $\tilde{P}$ =200 був прийнятий рівним $\Delta\tilde{t}_j = 1{,}1 \cdot 10^{-6}$ з урахуванням тривалості імпульсного сигналу АЕ, величина якої була визначена згідно з рівнянням (1). При цьому для прийнятого значення $\tilde{\alpha}$ величина δ змінювалася в межах $\tilde{\delta} = 0 \ldots 5 \cdot 10^{-7}$ псевдовипадковим способом. При постійності значення порогового напруження $\tilde{\sigma}_0$ час початку руйнування елементів КМ для прийнятих значень $\tilde{\alpha}$ визначався згідно з рівнянням, яке описує зміну еквівалентного напруження в часі та входить в (1). Виходячи з проведених розрахунків, час початку руйнування елементів КМ для інших швидкостей $\tilde{\alpha}$ при заданому значенні $\tilde{\sigma}_0$ дорівнював: для $\tilde{\alpha}$ =220 – $\tilde{t}_0$ =0,000545; для $\tilde{\alpha}$ =240 – $\tilde{t}_0$ =0,0005; для $\tilde{\alpha}$ =260 – $\tilde{t}_0$ =0,00046154. Під час моделювання вважали, що розміри та форма елементарної площадки контактної взаємодії S_T не змінюється в часі під час випробування зразків тертя із КМ. При цьому було прийнято, що поверхні фрикційного контакту повністю перекривалися між собою, тобто вважали, що $\tilde{S}_T$ =1. Слід зазначити, що розміри та форма елементарних площадок контактної взаємодії впливає на параметри формованого результуючого сигналу АЕ. При цьому зі зростанням величини навантаження поверхонь фрикційного контакту розміри елементарної площадки контактної взаємодії повинні змінюватися, починаючи з певного порогового значення. Проте в умовах динамічності процесу тертя математичний опис цих процесів є окремим та достатньо складним завданням. Тому під час моделювання вважалося, що у разі зростання величини навантаження поверхонь фрикційного контакту із КМ розміри та форма елементарної площадки контактної взаємодії не змінюються.

Результат моделювання сигналу АЕ для прийнятого мінімального значення контактного навантаження $\tilde{P} = 200$ у вигляді графіка зміни амплітуди $\tilde{U}$ у часі $\tilde{t}$ у відносних одиницях згідно з рівнянням (2) показано на рис. 3.

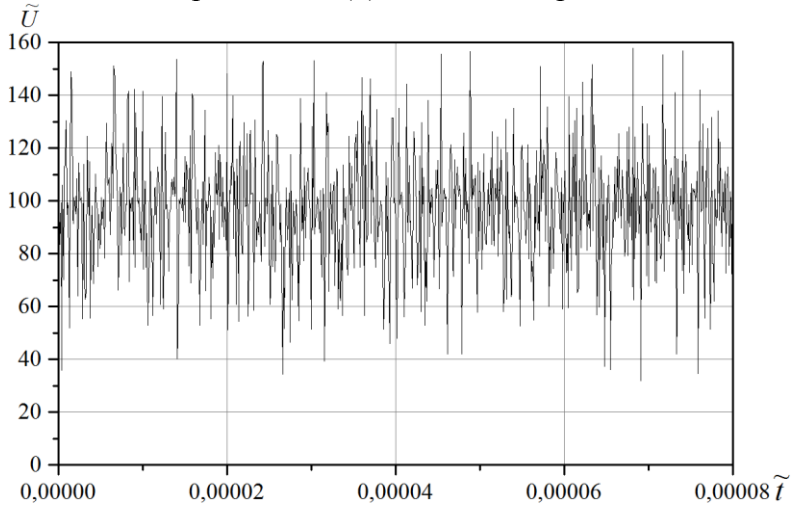


Рис. 3. Зміна амплітуди сигналу акустичної емісії у часі під час випробування дослідного вузла тертя із композиційних матеріалів на стадії його нормального зношування. Величина прикладеного навантаження $\tilde{P} = 200$, швидкість обертання вузла тертя обернено пропорційна величині $\Delta\tilde{t}_j$ =1,1·10^{-6}

Результати перетворення формованих сигналів АЕ для прийнятих значень прикладеного навантаження у вигляді спектрограм у нормалізованих одиницях показано на рис. 4. Нормування значень досліджуваних спектральних характеристик сигналу АЕ проводилася згідно з виразами $\tilde{U} = \tilde{U}_i / \tilde{U}_{\max}$ та $\tilde{f} = \tilde{f}_i / \tilde{f}_{\max}$, де $\tilde{U}_i$, $\tilde{f}_i$ – відповідно поточне значення амплітуди та частоти спектральних складових сигналу АЕ; $\tilde{U}_{\max}$ – максимальне значення амплітуди нульової гармоніки формованого результуючого сигналу АЕ за результатами серії експериментів; $\tilde{f}_{\max}$ – максимальне значення частоти спектра формованого результуючого сигналу АЕ за результатами програми випробування вузла.

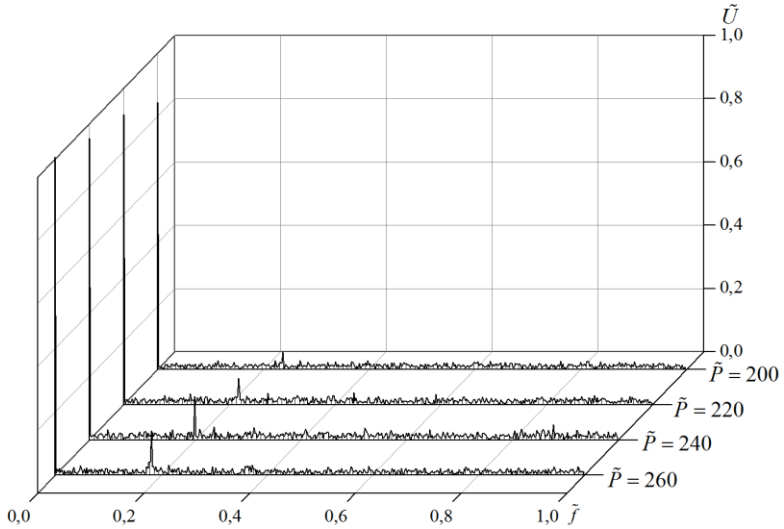
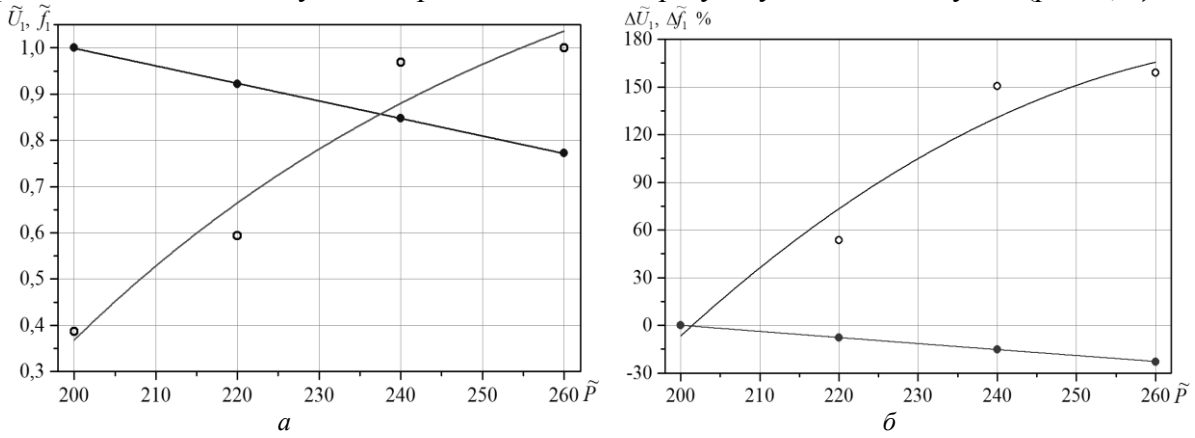


Рис. 4. Нормовані спектри результуючих сигналів акустичної емісії при різних значеннях величини прикладеного навантаження до поверхонь тертя із композиційних матеріалів на стадії їх нормального зношування

З отриманих результатів видно, що для прийнятої швидкості обертання пари тертя зростання навантаження приводить до зростання амплітуди спектральної складової результуючого сигналу АЕ (рис. 5, *а*).

У свою чергу, зростання величини навантаження поверхонь фрикційного контакту приводить до зменшення частотного значення спектральної складової результуючого сигналу АЕ, який формується на стадії нормального зношування поверхонь. Нормування значень досліджуваних спектральних складових проводилося аналогічно результатам, які представлені на рис. 4. З рис. 5, *а* видно, що зростання амплітуди спектральної складової результуючого сигналу АЕ під час зміни величини навантаження поверхонь відбувається нелінійно. Тоді зростання навантаження на поверхнях приводить до лінійного зменшення частоти спектральної складової результуючого сигналу АЕ. Слід також зазначити, що найбільший приріст значень у разі збільшення величини прикладеного навантаження спостерігається саме в амплітуді спектральної складової результуючого сигналу АЕ (рис. 5, *б*).



а *б*

Рис. 5. Закономірності зміни амплітудної та частотної спектральних характеристик сигналу акустичної емісії під час зміни прикладеного навантаження поверхонь (а) та зміна їх відсоткового приросту (б): о – амплітудна характеристика спектра сигналу акустичної емісії ($\tilde{U}_1$);

• – частотна характеристика спектра сигналу акустичної емісії ($\tilde{f}_1$)

Аналіз отриманих залежностей (рис. 5) з проведенням їх апроксимації показав, що закономірність амплітудної характеристики спектральної складової та контактного навантаження гарно описується нелінійною функцією (поліномом другого порядку). Коефіцієнт детермінації R^2 при цьому становив R^2=0,95. У свою чергу, закономірність частотної характеристики спектральної складової та контактного навантаження гарно описується лінійною функцією. При цьому коефіцієнт кореляції R при цьому становив R=0,99.

Висновки і пропозиції. Проведено моделювання результуючих сигналів АЕ під час зміни величини контактного навантаження поверхонь фрикційного контакту із КМ з їх подальшим спектральним аналізом. Отримані результати показали, що у разі збільшення навантаження на пару тертя із КМ відбувається зміна амплітудних та частотних характеристик спектральних складових результуючих сигналів АЕ. Слід зазначити, що контактне навантаження по-різному впливає на закономірності зміни амплітудних та частотних характеристик спектральних складових результуючих сигналів АЕ. Так під час зростання величини прикладеного навантаження до поверхонь фрикційного контакту із КМ відбувається нелінійне зростання амплітуди спектральної складової результуючого сигналу АЕ. У свою чергу, зростання величини навантаження поверхонь фрикційного контакту із КМ також приводить до зменшення частотного значення спектральної складової результуючого сигналу АЕ, який формується на стадії нормального зношування поверхонь. Аналіз отриманих результатів показав, що в області низьких навантажень приріст амплітуди спектральної складової більший у порівнянні з відповідними значеннями амплітуди в області з великими навантаженнями.

Найбільший приріст значень у разі збільшення величини прикладеного навантаження спостерігається в амплітуді спектральної складової результуючого сигналу АЕ. Під

час експериментальних досліджень з використанням спектрального аналізу сигналів АЕ під час збільшення величини контактного навантаження поверхонь фрикційного контакту із КМ найбільшого зростання та прирощення значень спектральних складових слід очікувати саме для амплітудних значень. При цьому спектральні складові знаходяться в низькочастотній області результуючого сигналу АЕ. Тому в реальному експерименті необхідно використовувати низькочастотні фільтри. Результати досліджень також показують, що в межах низьких контактних навантажень виникатиме складність у виявленні корисного сигналу з використанням спектрального аналізу сигналів АЕ.

Перспективним напрямком досліджень є спектральний аналіз сигналу АЕ, який формується на стадії нормального зношування поверхонь в умовах зміни швидкості обертання вузла тертя із КМ, а також при його переході зі стадії нормального зношування до стадії катастрофічного необоротного зношування та руйнування.

Список використаних джерел

1. *Liao C.,* Suo S., Wang Y., Huang W., Liu Y. Study on stick-slip friction of reciprocating o-ring seals using acoustic emission techniques // Tribology transactions. – 2012. – Vol. 55. – № 1. – P. 43–51.

2. *Hong E.*, Kaplin, B., You T., Suh M., Kim Y.S., Choe H. Tribological properties of copper alloy-based composites reinforced with tungsten carbide particles // Wear. – 2010. – Vol. 270. – P. 591–597.

3. *Rubtsov V. E.* The use of acoustic emission analysis for the wear in sliding friction / V. E. Rubtsov, A. V. Kolubaev, V. L. Popov // Letters to ZHTF. – 2013. – Vol. 4. – P. 79–86.

4. *Стадниченко В. Н.* Диагностика процессов изнашивания фрикционных узлов трансмиссий авиационных ГТД методом акустической эмиссии / В. Н. Стадниченко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. – 2010. – №1 (61). – С. 108–117.

5. *Колубаев Е. А.* Анализ акустической эмиссии при трении скольжения высокомарганцовистой стали / Е. А. Колубаев, А. В. Колубаев, О. В. Сизова // Письма в ЖТФ. – 2010. – № 16. – С. 55–61.

6. *Filonenko S. F.* Modeling of acoustic emission signals at the amount of material that came in plastic deformation / S. F. Filonenko, A. P. Stakhova, V. G. Kravchenko // Technological systems. – 2008. – № 1 (41). – P. 22–27.

7. *Filonenko S.* Destruction of composite material by shear load and formation of acoustic radiation / S. Filonenko, V. Kalita, A. Kosmach // Aviation. – 2012. – Vol. 16. – № 1. – P. 5–13.

8. *Філоненко С. Ф.* Вплив швидкості навантаження на амплітудні та енергетичні параметри сигналів акустичної емісії при руйнуванні композиційних матеріалів поперечною силою / С. Ф. Філоненко, О. П. Космач, Т. М. Косицька // Техологические системы. – 2012.– № 1 (58). – С. 46–51.

9. *Filonenko S. F.* Laws of change of time signal parameters of acoustic emission at destruction of composite material / S. F. Filonenko, O. P. Kosmach // Proceedings of Chernihiv State Technological University. – 2012. – № 2 (57). – P. 114–122.

10. *Filonenko S.* Impact of rotational speed of composite friction pair on energy accumulation in acoustic emission signal formation / S. Filonenko, O. Kosmach // Aviation. – 2013.– Vol. 17 (4).– P. 129–136.

11. *Деев А. А.* Акустические колебания в фрикционном контакте как способ контроля поверхностей трения на этапе приработки двигателей внутреннего сгорания / А. А. Деев // Вестник Рязанского государственного университета им. С. А. Есенина. – 2010. – № 29. – С. 1–16.

12. *Изучение* процессов разрушения поверхностей, деформируемых трением, методом акустической эмиссии / Д. Л. Мерсон, В. И. Полунин, Б. А. Чудинов и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 8. – С. 9–13.

13. *Овчарук В. Н.* Спектральный анализ сигналов акустической эмиссии / В. Н. Овчарук // Ученые заметки ТОГУ. – 2013. – № 4. – С. 974–986.

14. *Маленко П. И.* Исследование методом акустической эмиссии поверхностей трения в условиях смазывания / П. И. Маленко // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2011. – № 2. – С. 164–171.

15. *Сергиенко А. Б.* Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб., 2006. – 751 с.

УДК 331.454;504.75;574

Т.М. Таірова, канд. хім. наук
ДУ «Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці», м. Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОЕФФІЦІЄНТА ТЯЖКОСТІ ВИРОБНИЧОГО ТРАВМАТИЗМУ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ХІМІЧНОГО КОМПЛЕКСУ

Т.Н. Таирова, канд. хим. наук
ГУ «Национальный научно-исследовательский институт промышленной безопасности и охраны», г. Киев, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЭФИЦИЕНТА ТЯЖЕСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Tamara Tairova, PhD in Chemical Sciences
SI «National Research Institute of Industrial safety and health», Kyiv, Ukraine

THE MATHEMATICAL MODEL OF GRAVITY COEFFICIENT OF OCCUPATIONAL INJURIES IN CHEMICAL INDUSTRY

За результатами аналізу виробничого травматизму на підприємствах хімічної промисловості побудовано математичні моделі ризику виробничого травматизму і коефіцієнта тяжкості. Запропоновано новий підхід до визначення факторів, що найбільш значущо впливають на рівень виробничого травматизму з тяжким наслідком і розроблено математичну модель залежності коефіцієнта тяжкості від травмонебезпечних факторів. Отримані результати дають змогу прогнозувати показники ризику загального травматизму і коефіцієнта тяжкості та своєчасно вживати заходи запобігання виробничого травматизму на підприємствах хімічного комплексу.

Ключові слова: *математична модель, коефіцієнт тяжкості, ризик виробничого травматизму, травмонебезпечні фактори.*

По результатам анализа производственного травматизма на предприятиях химической промышленности построено математические модели риска производственного травматизма и коэффициента тяжести. Предложено новый подход к определению факторов, которые наиболее значимо влияют на уровень производственного травматизма с тяжелыми последствиями, разработана математическая модель зависимости коэффициента тяжести от травмоопасных факторов. Полученные результаты дают возможность прогнозировать показатели риска травматизма и коэффициента тяжести с целью своевременного принятия мер по предотвращению производственного травматизма на предприятиях химического комплекса.

Ключевые слова: *математическая модель, коэффициент тяжести, риск производственного травматизма, травмоопасные факторы.*

On the basis of analysis of occupational injuries in the chemical industry the mathematical relational models of risk of occupational injuries and gravity of coefficient have been offered. A new approach was proposed to identify the factors that most significantly have influence on the level of occupational injuries with severe consequences, the mathematical model of gravity coefficient from the traumatic factors has been offered was built. The results give the opportunity to predict injury risk and the gravity of coefficient in order to prevent occupational injuries at chemical enterprises.

Key words*: mathematical model, the coefficient of gravity, the risk of accidents, traumatic factors.*

Постановка проблеми. Хімічна, нафтохімічна і нафтопереробна промисловість (далі – хімічний комплекс) є однією з найважливіших галузей економіки в Україні. Практично на всіх підприємствах хімічного комплексу, в основному, зосереджені об’єкти підвищеної небезпеки (далі – ОПН), тобто такі об’єкти, на яких використовуються, виготовляються і зберігаються одна або кілька небезпечних речовин у кількості, що дорівнює або перевищує нормативно встановлені порогові маси, та які є реальною загрозою виникнення надзвичайної ситуації техногенного та природного характеру [1].

Ймовірність виникнення нещасних випадків на підприємствах хімічного комплексу (у т. ч. на об’єктах підвищеної небезпеки) щороку зростає, що зумовлено застосуванням застарілих систем протиаварійного захисту, потенційно небезпечних технологічних процесів і ресурсним зношенням технологічного обладнання, яке за оцінюванням експертів становить від 60 до 80 %. Оскільки настання нещасних випадків на виробництві стається за умови наявності як джерела небезпеки, так і перебування працівника в зоні його дії, тому актуальними для хімічного комплексу залишаються поглиблені дослідження, що стосуються визначення небезпечних, характерних для підприємств хіміч-

ного комплексу подій і причин, що призводять до нещасних випадків, особливо з тяжким та смертельним наслідком.

Аналіз статистичних даних щодо взаємодії людини з технічними засобами виробництва, їх впорядкування і спеціальне оброблення дозволяє ідентифікувати небезпечні і шкідливі фактори, визначити зв'язок між ними та встановити фактори, що мають постійний характер. Повне використання цієї інформації значною мірою залежить від методів оброблення та аналізу, використання елементів теорії ймовірності та методів математичної статистики.

Аналіз досліджень і публікацій. Питанням управління безпекою, аналізу і прогнозуванню аварій на підприємствах хімічного комплексу присвячено багато публікацій у вітчизняних та іноземних виданнях таких учених, як: L. Korzeniowski, М. В. Лісанов, А. С. Печеркін, В. І. Сидоров, В.В. Бєгун та ін. [2–5]. Проте поглибленому вивченню причин нещасних випадків на підприємствах хімічного комплексу, особливо тих, що стались через неправильні дії працівника, і які можна розглядати як передвісники надзвичайних ситуацій, приділялось мало уваги. Адже в умовах роботи на ОПН особливе значення має висока відповідальність людини за кожне рішення, при цьому ймовірнісні дії працівника залежать від різних чинників: рівня його теоретичної і практичної підготовки, стажу роботи за спеціальністю тощо.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є побудова математичних моделей коефіцієнта тяжкості і ризику виробничого травматизму на підприємствах хімічного комплексу залежно від найбільш травмонебезпечних факторів, що впливають на рівень травматизму в галузі.

Виклад основних результатів досліджень. Дослідження виробничого травматизму на підприємствах хімічного комплексу проводили на основі звітів Держгірпромнагляду України і даних електронної бази, створеної за результатами аналізу матеріалів спеціального розслідування нещасних випадків на виробництві з тяжким і смертельним наслідками за 2006–2013 роки. З метою виявлення типових закономірностей настання нещасних випадків на підприємствах хімічного комплексу проводили структурне групування статистичного матеріалу за віковими групами і типологічне за такими критеріями групування, як події і причини, що призвели до настання нещасних випадків з тяжким і смертельним наслідками тощо. Для групування за віком використовували принцип рівності інтервалів, ширина інтервалу дорівнювала 5 років. Під час проведення порівняльного аналізу обчислювали відносні величини, що представляли відношення між розмірами частин до цілого. Базою порівняння слугували максимальні значення за сукупністю в цілому. Для прогнозування використовували методологічні принципи багатофакторного регресивного аналізу.

На підставі вивчення статистичних даних показників ризику виробничого травматизму і коефіцієнта тяжкості (середня кількість днів непрацездатності, що припадає на один нещасний випадок) на підприємствах хімічного комплексу за період 2006–2013 роки визначено їх основну тенденцію (тренд). Так, лінія тренду ризику виробничого травматизму вказує на зниження рівня досліджуваного показника у часі, а лінія тренду коефіцієнта тяжкості (середня кількість днів непрацездатності, що припадає на один нещасний випадок), навпаки – до його зростання, що свідчить про зростання тяжкості травм на підприємствах хімічного комплексу останніми роками. Для згладжування короткострокових коливань і виявлення основних тенденцій рядів динаміки використовували метод ковзної середньої (рис.). На підставі логічного аналізу розвитку досліджуваних показників із плином часу із заданого масиву функцій були вибрані рівняння, які найбільш точно відображають загальну тенденцію змін ризику виробничого травматизму і коефіцієнта тяжкості (1; 3).

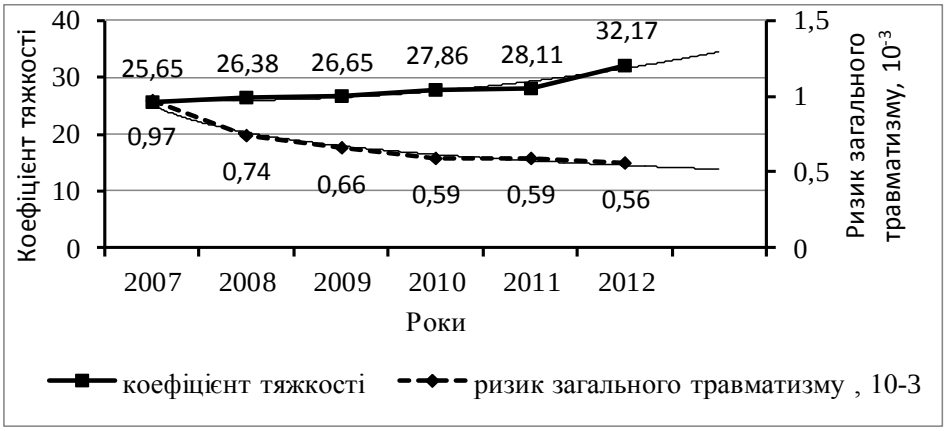


Рис. Тенденції змін ризику загального травматизму і коефіцієнта тяжкості

Остаточне рішення про вид апроксимуючої функції приймали після визначення її параметрів методом найменших квадратів, проведення оцінювання адекватності моделі досліджуваному процесу і точності. Рівняння тренду ризику виробничого травматизму (у) на підприємствах хімічного комплексу має вигляд:

$$y = 0{,}94 \cdot t^{-0{,}306}. \quad (1)$$

Оскільки закономірність досліджуваного процесу знаходить відображення у наявності певних статистичних властивостей залишкової компоненти, то для визначення наявності автокореляції між залишками використовували тест Дарбіна-Уотсона, який показав на відсутність автокореляції залишків. Оскільки модель адекватна, визначили точковий прогноз при t = 2,79 (0,69) та інтервальний (0,57; 0,81). Індекс детермінації свідчить про високу точність вибору рівняння тренду:

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(y_i - y_t)^2}{\Sigma(y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{0{,}0052}{0{,}21} = 0{,}98. \quad (2)$$

Таким чином, усі розрахункові коефіцієнти моделі є значущими, модель адекватна, розраховуємо зміну показників у часі для t = 2013; x = 2013 – 2007 = 6. Відповідно $y_{n+1} = 0{,}94 \cdot t^{-0{,}306} = 0{,}94 \cdot 6^{-0{,}306} = 0{,}53$. Розрахункове прогнозоване значення ризику виробничого травматизму на 2014 рік становить $0{,}53 \cdot 10^{-3}$, тобто передбачається зменшення кількості травмованих за умови збереження кількості працюючих у галузі на рівні 2013 року.

Аналогічним чином було визначено рівняння тренду коефіцієнта тяжкості ($K_т$) виробничого травматизму на підприємствах хімічного комплексу, яке має такий вигляд:

$$K_т = 0{,}299 \cdot t^2 - 0{,}971 \cdot t + 26{,}68. \quad (3)$$

Якість рівняння тренду оцінювали за допомогою помилки абсолютної апроксимації

$$\bar{A} = \frac{\Sigma \frac{|y_t - y_i|}{y_i}}{n} \cdot 100\ \% = \frac{0{,}11}{6} \cdot 100\ \% = 1{,}82\ \%. \quad (4)$$

Оскільки помилка апроксимації знаходилась у межах 5…7 %, то був зроблений висновок про правильний вибір рівняння тренду до вихідних даних.

Індекс детермінації свідчить про високу точність вибору рівняння тренду:

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(y_i - y_t)^2}{\Sigma(y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{2{,}2}{27{,}42} = 0{,}92. \quad (5)$$

Стандартну помилку прогнозу розраховували за формулою:

$$K_1 = 2{,}776 \cdot 0{,}66 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{6} + \frac{3 \cdot (6 + 2 \cdot 1 - 1)^2}{6 \cdot (6^2 - 1)}} = 2{,}5. \quad (6)$$

Точковий прогноз, t = 7: $y(7) = 0{,}3 \cdot 7^2 - 0{,}97 \cdot 7 + 26{,}68 = 34{,}51$, інтервальний прогноз становив 32,01; 37,01.

Як показали наші попередні дослідження, виробничий травматизм в Україні має певні, характерні для кожної галузі державного нагляду особливості, пов'язані з динамікою змін загального та смертельного травматизму, причинами і подіями, віковою диференціацією загиблих, професіями та іншими критеріями оцінювання виробничого травматизму [6].

Нещасні випадки з тяжким та смертельним наслідками в хімічному комплексі стаються в основному через п'ять подій, сумарна питома вага яких становить 67,1 %. Це дорожньо-транспортна пригода, падіння потерпілого, падіння, обрушення, обвалення предметів, матеріалів, породи ґрунту, дія рухомих і таких, що обертаються, деталей, обладнання, машин і механізмів і ураження електричним струмом. Однак характерною відмінністю смертельного і тяжкого травматизму на підприємствах хімічного комплексу є наявність ще чотирьох «хімічних» подій, притаманних саме цій галузі, таких як: дія температур, дія шкідливих речовин, пожежа і вибух. Сумарна питома вага цих подій у загальній кількості подій, що призводять до нещасних випадків з тяжким і смертельним наслідком у хімічному комплексі, становить понад 24,0 %.

Аналіз причин виробничого травматизму на підприємствах хімічного комплексу показав, що, починаючи з 2009 року, реєструються суттєві зміни у структурі причин настання нещасних випадків. Так, відзначається зростання технічної складової причин з 20,0 % у 2009 році до 35,7 % у 2012 році і до зниження організаційної – з 72,0 до 57,1 %. Основними технічними причинами настання нещасних випадків з тяжким і смертельним наслідком у хімічному комплексі є незадовільний технічний стан виробничих об'єктів, будівель, засобів виробництва, транспортних засобів – 9,7 %, неякісне розроблення проектної документації на будівництво, реконструкцію виробничих об'єктів, будівель, споруд, інженерних комунікацій, обладнання, устаткування тощо 5,1 %, і конструктивні недоліки, недосконаліть, недостатня надійність засобів виробництва – 4,3 %. Зазначене свідчить про недостатню увагу з боку роботодавців питанням створення безпечних умов праці.

Для визначення показників, що характеризують дії або бездіяльність роботодавця щодо створення безпечних умов праці і неправильні дії потерпілих, що призводять до настання нещасних випадків на виробництві, автором було розроблено методику оцінювання вказаних показників. Використання зазначеної методики оцінювання дозволило визначати щорічно відносну кількість нещасних випадків на підприємствах хімічного комплексу, що сталися через бездіяльність роботодавця або через неправильні дії працівника. Так, за період з 2005–2012 роки у середньому щорічно через дії або бездіяльність роботодавця ставалось понад 32,3 %, а через дії або бездіяльність потерпілого – 22,8 % нещасних випадків з тяжким наслідком. Тільки у 2013 році на підприємствах хімічного комплексу через дії або бездіяльність роботодавця сталось 89,2 % нещасних випадків з тяжким наслідком.

Використання багатофакторного кореляційно-регресивного аналізу дозволило одержати адекватну математичну модель за вибраними показниками і встановити їх вплив на коефіцієнт тяжкості виробничого травматизму на підприємствах хімічного комплексу. Математична модель має такий вигляд:

$$Y = 16{,}46 + 0{,}23 \cdot X_1 + 0{,}14 \cdot X_2, \quad (7)$$

де Y – коефіцієнт тяжкості;

X_1 – показник, що характеризує дії або бездіяльність роботодавця;

X_2 – показник, що характеризує дії або бездіяльність потерпілого.

Згідно з розрахунковими даними загальний коефіцієнт детермінації R на 84 % пояснює загальну варіацію коефіцієнта тяжкості варіацією двох факторів: дії або бездіяльність роботодавця і дії або бездіяльність потерпілого, що призвели до настання нещасного випадку з тяжким наслідком. Під час визначення залежності між факторами було встановлено, що всі парні коефіцієнти кореляції $|r|<0,7$, тобто мультиколінеарність факторів відсутня. Аналіз стандартизованих коефіцієнтів бета показав, що найбільший вплив на коефіцієнт тяжкості має показник, що характеризує дії або бездіяльність роботодавця щодо створення безпечних умов праці ($\beta_1 = 1,142$), а за ним іде показник, що характеризує дії або бездіяльність потерпілого; ($\beta_2 = 0,469$). Значення коефіцієнта β_i дають підставу стверджувати, що зі збільшенням відносної кількості травмованих через дії або бездіяльність роботодавця на 1 % за умови, що інші факторні ознаки лишаються незмінними, середнє значення коефіцієнта тяжкості збільшується на 0,23, а зі збільшенням відносної кількості травмованих через дії або бездіяльність працівника – на 0,14.

Перевірка моделі на істотність довела наявність невипадкової залежності, а також високий рівень адекватності побудованої регресійної моделі (фактичний рівень F-Фішера більше за табличне значення $F\ (12,67) > F_{табл}\ (5.79)$, тобто коефіцієнт детермінації статистично значущий і рівняння регресії статистично надійно. Для перевірки значущості рівняння і його коефіцієнтів досліджували абсолютні і відносні помилки апроксимації. Середня помилка апроксимації становить:

$$A = \frac{\Sigma\left|\frac{\varepsilon}{Y}\right| \cdot 100\,\%}{n} = \frac{0,751 \cdot 100\%}{8} = 9,382. \qquad (8)$$

Довірчі інтервали для коефіцієнтів рівняння регресії з надійністю 95 % такі:

$b_0 = (11,11; 21,81)$, $b_1 = (0,15; 0,32)$, $b_2 = (0,0134; 0,26)$.

Аналіз корельованості відхилень за статистикою Дарбіна-Уотсона показав, що автокореляція залишків відсутня і математична модель адекватна.

Висновки. Розроблено адекватні математичні моделі показників виробничого травматизму з тяжким наслідком на підприємствах хімічного комплексу, які дозволяють не тільки передбачати розвиток виробничого травматизму у часі, але дають можливість одержати більш повне оцінювання стану охорони праці на підприємствах хімічного комплексу і є основою для вироблення оптимальних управлінських рішень.

Список використаних джерел

1. *Порядок* декларування безпеки об’єктів підвищеної небезпеки: НПАОП 0.00-6.22-02 : затв. Постановою КМУ від 11.07.02 № 956.

2. *Korzeniowski L.* Zarządzanie bezpieczeństwem. Od ryzyka do systemu / L. Korzeniowski. – Kraków : LIPORT LFK, 2001. – S. 21–26.

3. *Сидоров В. И.* О декларировании промышленной и пожарной безопасности на опасных производственных объектах нефтегазового комплекса / В. И. Сидоров, М. В. Лисанов // Безопасность труда в промышленности. – 2009. – № 11. – С. 44–51.

4. *Таірова Т. М.* Кількісна оцінка ризику виникнення аварії на об’єкті підвищеної небезпеки / Т. М. Таірова // Проблеми охорони праці в Україні. – К. : ННДІПБОП, 2007. – Вип. 13. – С. 43–50.

5. *Бєгун В. В.* Безпека життєдіяльності (забезпечення соціальної, техногенної та природної безпеки) : навчальний посібник / В. В. Бєгун, І. М. Науменко. – К., 2004. – 328 с.

6. *Таірова Т. М.* Аналіз та прогнозування вікової диференціації виробничого травматизму в Україні / Т. М. Таірова // Проблеми охорони праці в Україні. – К. : ННДІПБОП, 2012. – Вип. 24. – С. 49–58.

УДК 620.197.3

В. І. Воробйова, аспірант
О.Е. Чигиринець, д-р техн. наук
Ю.Ф. Фатєєв, канд. хім. наук
НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна
Г.О. Татарченко, д-р техн. наук
Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м. Луганськ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ЗАХИСНОЇ ПЛІВКИ НА ПОВЕРХНІ МЕТАЛУ ІЗ ПАРОВОЇ ФАЗИ ЕКСТРАКТУ ШИШОК ХМЕЛЮ

В.И. Воробьева, аспирант
Е.Э. Чигиринец, д-р техн. наук
Ю.Ф. Фатеев, канд. хим. наук
НТУУ «КПИ», г. Киев, Украина
Г.О. Татарченко, д-р техн. наук
Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск, Украина

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИТНОЙ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ИЗ ПАРОВОЙ ФАЗЫ ЭКСТРАКТА ШИШЕК ХМЕЛЯ

ViktoriiaVorobiova, PhD student
Olena Chyhyrynets, Doctor of Technical Sciences
Yurii Fatieiev, PhD in Chemical Sciences
NTUU «KPI», Kyiv, Ukraine
Halyna Tatarchenko, Doctor of Technical Sciences
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Luhansk, Ukraine

FEATURES OF FORMATION OF PROTECTIVE FILMS ON THE METAL SURFACE FROM THE VAPOR PHASE OF THE HOP CONES EXTRACT

На підставі даних газової хромато-мас-спектрометрії та ІЧ-спектроскопії досліджено зміну якісного хімічного складу екстракту шишок хмелю в процесі самочинного випаровування. Встановлено, що в першу чергу випаровуються кетони, альдегіди, терпени та їх кисневмісні похідні. Далі відбувається сумісне випаровування флавоноїдів та залишку вищезазначених органічних сполук. З'ясовано залежність між порядком випаровування летких сполук екстракту та захисними властивостями адсорбційної плівки. Визначено, що екстракт шишок хмелю є летким інгібітором корозії змішаного типу, який гальмує як катодну, так і анодну реакції корозійного процесу. Оптимальним та достатнім часом для формування захисної плівки на поверхні металу є попереднє оброблення зразка протягом 48 годин у паровій фазі екстракту рослинної сировини.

Ключові слова: *леткий інгібітор, атмосферна корозія, сталь, екстракт шишок хмелю.*

На основании данных газовой хромато-масс-спектрометрии и ИК-спектроскопии исследовано изменение качественного химического состава экстракта шишек хмеля в процессе самопроизвольного испарения. Установлено, что в первую очередь испаряются кетоны, альдегиды, терпены и их кислородсодержащие производные. Далее происходит совместное испарение флавоноидов и остатка вышеуказанных органических соединений. Выяснена зависимость между порядком испарения летучих соединений экстракта и защитными свойствами адсорбционной пленки. Выяснено, что экстракт шишек хмеля является летучим ингибитором коррозии смешанного типа, который тормозит как катодную, так и анодную реакции коррозионного процесса. Оптимальным и достаточным временем для формирования защитной пленки на поверхности металла является предварительная обработка образца в течение 48 часов в паровой фазе экстракта растительного сырья.

Ключевые слова: *летучий ингибитор, атмосферная коррозия, сталь, экстракт шишек хмеля.*

Based on the data of gas chromatography - mass - spectrometry and IR - spectroscopy studies changes in the chemical composition of high-quality extract of hop cones in the process of spontaneous evaporation. It has been established that mainly evaporate ketones, aldehydes, terpenes and oxygenated derivatives thereof. Further co- evaporation takes place and the remainder of the above flavonoid organic compounds .The last go over into gas-vapour phase phenol and carboxylic acid. The interrelation between the order of evaporation of volatile compounds extract and protective properties of the adsorption films was investigated. Based on the study of the kinetics of the electrode reactions found that the extract of hop cones is a volatile corrosion inhibitor of the mixed type that inhibits both the cathode and the anode reaction of the corrosion process. Optimal and sufficient time to form a protective film on the metal surface is pre- treatment of the sample for 48 hours in a vapour phase feedstock vegetable extract.

Key words: *volatile corrosion inhibitor, atmospheric corrosion, steel, extract of hop cones.*

Вступ. Нині особливе місце серед інгібіторів атмосферної корозії займають леткі або парофазні (ЛІАК), які, випаровуючись при температурі навколишнього середовища, у

вигляді пари досягають металу і, адсорбуючись на його поверхні, забезпечують надійний захист металевого виробу [1]. Актуальним є питання створення нових парофазних інгібіторів атмосферної корозії, що відрізняються не тільки простотою отримання та ефективністю інгібування, але й екологічною безпекою. Тому на сьогодні для створення протикорозійних засобів перспективним є використання рослинної сировини, що вже є джерелом природно синтезованих органічних сполук, які відрізняються не тільки безпечністю, але й щорічною поновлюваністю та низькою собівартістю. Так, авторами було встановлено [2], що джерелом протикорозійно активних органічних сполук для створення ЛІАК може слугувати Хміль звичайний – *Humulus lupulus L.* Показано, що ізопропанольний екстракт шишок хмелю забезпечує ефективний протикорозійний захист сталі від атмосферної корозії [3].

Загальновизнано [1], що формування адсорбційної плівки з газопарової фази ЛІАК може відбуватися протягом деякого часу. При цьому швидкість процесу формування захисної плівки та її захисні властивості будуть залежати як від хімічної природи складових композиції леткого інгібітора, так і від властивостей поверхні. Оскільки авторами встановлено [2], що газопарова фаза екстракту шишок хмелю має багатокомпонентний склад, то напевно, що й випаровування летких сполук ізопропанольного екстракту буде відбуватись у певній послідовності залежно від фізико-хімічних властивостей його складових сполук. Ймовірно це, у свою чергу, буде позначатися й на захисних властивостях адсорбційної плівки, що формується на поверхні металу, залежно від часу експозиції зразка в паровій фазі екстракту. Тому метою роботи стало визначення компонентів рослинних екстрактів, які вносять основний внесок у формування захисного шару завдяки дослідженню зміни складу екстракту в процесі випаровування його летких сполук та захисних властивостей сформованої плівки на поверхні металу залежно від часу її формування.

Методика експерименту. Для екстрагування хімічно активних речовин з рослинної сировини використали ізопропіловий спирт (співвідношення 1 г сухої маси на 10 мл розчинника). Компонентний склад летких речовин рослинного екстракту вивчали методом хромато-мас-спектрометрії (ГХ-МС) на газовому хроматографі FINIGAN FOCUS з масселективним детектором фірми Termo Electronics. Відносний кількісний вміст хімічних компонентів екстракту розраховували методом внутрішньої нормалізації площ піків без коригувальних коефіцієнтів чутливості. Реєстрацію ІЧ-спектрів екстрактів рослинної сировини здійснювали на ІЧ-Фур'є-спектрометрі Jasco FT/IR – 4000. Умови дослідження такі: діапазон реєстрації спектра – 4000 – 400 см–1; роздільна здатність – 4 см–1; кількість сканів – автоматично; швидкість сканування – 1 мм/с; режим сканування – у прохідному світлі; детектор – TGS. Для досліджень були взяті свіжоприготовані ізопропанольні екстракти та екстракти після витримки протягом 24, 48, 72 та 96 годин на відкритому повітрі за температури 25 °С. Для природного випаровування об'єм екстракту становив 10 мл, площа дзеркала поверхні випаровування – 1см^2.

Поляризаційні електрохімічні дослідження проводили на установці, що включає потенціостат ПИ-50-1 та програматор ПР-8 у потенціостатичному режимі. Значення потенціалу задавали від стаціонарного потенціалу із заданим кроком в анодну і катодну області. Потенціали вимірювали відносно насиченого сульфатно-закисного електрода порівняння, переводячи потім дані у нормальну водневу шкалу. Дослідження проводили у трьохелектродній електрохімічній комірці з об'ємом робочого розчину 60 мл, що складалась з робочого електрода із сталі Ст 3 циліндричної форми з площею 0,385 см^2, запресованого у тефлон, електрода порівняння – сульфатно-закисного, а також допоміжного електрода – платинового. Робочий електрод перед обробленням у парі ЛІАК механічно полірували і знежирювали етиловим спиртом. Особливістю цієї роботи було те,

що електрохімічні вимірювання проводили не при повному зануренні зразка в об'єм електроліту, а при його розміщенні у поверхневому шарі робочого розчину перпендикулярно до дзеркала поверхні під час занурення приблизно на 1-2 мм (ГОСТ 9.509–89), що дозволяє більш точно змоделювати умови атмосферної корозії металу, що створюються у тонких шарах електроліту. Також слід зазначити, що при вимірюваннях використовувався спеціально виготовлений капіляр для електрода порівняння, що був підведений до робочої поверхні електрода. У роботі досліджували електрохімічну поведінку сталі після формування захисної плівки протягом 24, 48, 96 та 72 годин у присутності однакової кількості інгібітора в замкнутому об'ємі.

Результати досліджень та їх обговорення. Аналіз поляризаційних кривих (рис. 1) показав, що досліджуваний екстракт шишок хмелю є летким інгібітором корозії змішаного типу, що гальмує як катодну, так і анодну реакції корозійного процесу, а оптимальним та достатнім часом для формування захисної плівки на поверхні металу є попереднє оброблення зразка протягом 48 годин у паровій фазі екстракту рослинної сировини.

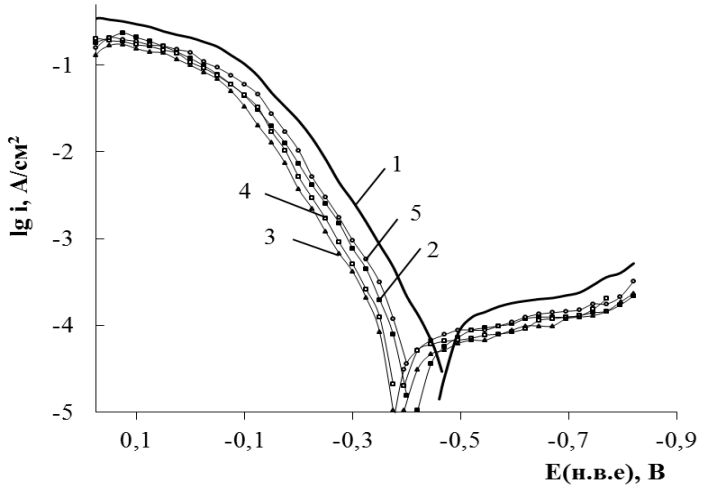


Рис. 1. Анодні (1–5) і катодні поляризаційні криві на сталі Ст3 у розчині 1 н Na2SO4 без (1) і з плівкою, отриманою після формування 24, 48, 72, 96 годин (2–5) у паровій фазі екстракту шишок хмелю

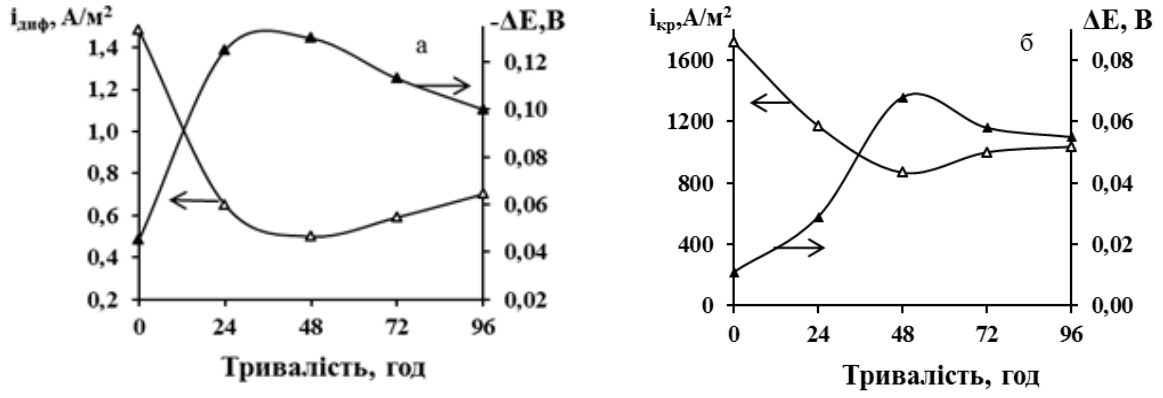
Незалежно від часу оброблення сталі леткий інгібітор в умовах вільної корозії впливає переважно на анодний процес розчинення сталі, незначно зміщуючи стаціонарний потенціал у позитивний бік. Однак під час накладення поляризації сформована попередньо захисна плівка більшою мірою гальмує катодну реакцію корозійного процесу, ніж анодну. Так, після попереднього оброблення зразка екстрактом шишок хмелю протягом 24 годин спостерігається зсув анодної поляризаційної кривої у напрямку більш позитивних потенціалів (рис. 1).

Величина анодної поляризації сталі при i = 0,175 ·10-4 А/см^2 становить 0,03 В, а катодної поляризації при тій же щільності струму сягає -0,12 В (рис. 2). На катодній поляризаційній кривій спостерігається зменшення значення густини струму в катодній області в 2,37 рази. Сталь, попередньо оброблена екстрактом шишок хмелю протягом 48 годин, має більш позитивне значення безструмового потенціалу ($E_{ст}$ = - 0,430 В), менший струм анодного розчинення. При цьому спостерігається максимальна поляризація електрода та інгібуюча ефективність захисної плівки (рис. 2).

Так, величина анодної поляризації сталі після оброблення леткими сполуками екстракту шишок хмелю становить 0,07 В, а величина катодної поляризації сягає -0,13 В, що свідчить про більше гальмування катодного процесу.

На катодній поляризаційній кривій спостерігається ще більш помітне зменшення значення густини катодного струму (в 3 рази) у порівнянні зі зразком, не обробленим

інгібітором (рис. 2, *а*). З подальшим збільшенням часу оброблення металу до 72 та 96 годин спостерігається незначне зменшення захисних властивостей плівки.



а *б*

Рис. 2. Залежність густини струму для катодної області (ік) (а) та для анодної області (при Е = -0,3В) (іа) (б) і електродної поляризації (ΔЕ) на Ст3 у розчині 1 н Na2SO4 залежно від тривалості оброблення сталі в паровій фазі рослинних екстрактів

Отже, аналіз поляризаційних кривих показує, що залежність фізико-хімічних властивостей плівок, утворених на поверхні сталі протягом різного часу витримки в парі летких компонентах шишок хмелю, має екстремальний характер. Слід зазначити, що оброблення зразків індивідуально в атмосфері ізопропанольного екстракту не приводить до інгібування корозійного процесу.

До того ж авторами [2] в більш ранніх дослідженнях було встановлено, що екстракт шишок хмелю є сумішшю органічних сполук, серед яких домінують флавоноїди, а саме кемпферол (1,1 %) та кверцетин (2,5 %), тимол (12,3 %); а також ментол (7,4 %), карвакрол (3,7 %), ванілін (7,0 %); карбонові та фенолкарбонові кислоти: масляна (1,3 %), валер'янова (4,7 %), лінолева (0,3 %), олеїнова (3,1 %); кетони: ундекан-2-он (5,3 %), 2-бутанон (4,4 %), 3-гідроксіметил (0,5 %), 2-тридеканон (1,0 %). Тому доцільним було дослідження зміни складу екстракту в процесі випаровування його летких сполук для вивчення особливостей динамічного процесу формування плівки.

Методом газової хромато-мас-спектрометрії (рис. 3) та ІЧ-спектроскопії (табл.) була досліджена зміна складу рідкої фази у часі випаровування свіжоприготовлених ізопропанольних екстрактів шишок хмелю, а також нелеткі залишки, утворені після випаровування екстракту. Для вихідного екстракту шишок хмелю характерні смуги поглинання в області 3000–2800 $см^{-1}$, що, вірогідно, свідчить про наявність міжмолекулярного водневого зв'язку.

З аналізу представлених даних також видно, що в екстракті наявні аліфатичні CH_3-і CH_2-групи, про що свідчать смуги поглинання в області 2930-2850 $см^{-1}$ (валентні коливання CH_3- й CH_2 -груп) і області 1463-1377 $см^{-1}$ (деформаційні коливання). Також на спектрі наявні характерні смуги поглинання в області 900–700 $см^{-1}$, які також відносяться до коливань ароматичного заміщення (деформаційні коливання зв'язку С–Н, а також деформаційні коливання 1300–1200 $см^{-1}$, які відповідають спиртовим групам).

В області 1400–1250 $см^{-1}$ проявляється інтенсивна смуга поглинання, пов'язана з деформаційними коливаннями групи-ОН, що підтверджує наявність в екстракті стероїдів, а саме ситостеролу та кампестеролу, що відносяться до тетрациклічних спиртів, а також підтверджує наявність в екстракті одноненасичених дитерпенових спиртів. Інтенсивне поглинання ν(О–Н) і ν(С–О) в області 1420–1200 $см^{-1}$ вказує на наявність карбонових кислот у досліджуваному екстракті. Так само смуги поглинання в області 3550–3200 $см^{-1}$ відносяться до пов'язаних валентних коливань спиртів, фенолів та вуглеводів,

що свідчить про наявність цих сполук у досліджуваному екстракті і збігається з даними ранніх досліджень газової хромато-мас-спектрометрії [2]. З наведених даних (рис. 3) видно, що після 24 годин самочинного випаровування екстракту якісний склад летких сполук значно відрізняється від вихідного зразка.

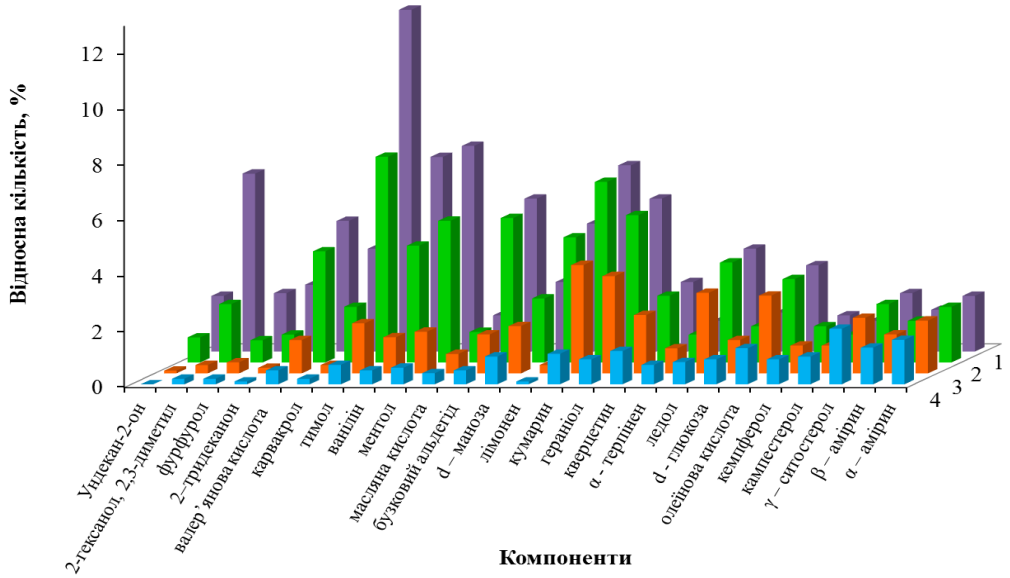


Рис. 3. Хроматограма вихідного складу екстракту шишок хмелю (1) та після 24–72 (2–4) годин самочинного випаровування летких сполук

Таблиця

Віднесення смуг поглинання ($см^{-1}$) в ІЧ-спектрах екстрактів шишок хмелю

Смуги поглинання функціональних груп		Екстракт шишок хмелю	Склад після випаровування, годин			
			24	48	72	96
ν_{OH-} валентні δ_{OH-} деформаційні	3650–3590 1450–1250	1388, 1377, 1365, 1299, 1319,1365	1114 1126 1531 1291	1280 1290 1380	1300 1344 1389	1363, 1271
ν_{OH-} пов'язані Н зв'язком	3550–3200 2700–2500 (широка)	3314	3306	3292	3292	3299
νC-H sp^3 ν_{OCH3}	2975-2810 (сильні)	2927, 2968, 2875	2919 2917 2967	2917 2810 2897	2915, 2936	2900, 2920
δ C-H sp^3	1470–1430 (середні) 1380-1370 (сильні)	1463 1377	1484 1370	1420, 1358	1437, 1363	1406 1350
ν_{CHO} (2 смуги)	2900–2820 (слабка) 2775–2700 (слабка)	2875	2869 2967 2921	2860	2847	2840
$\delta(=CH_2)$ sp^2	1420–1410 995–985 915–905	949	949	–	–	940 876
$\nu_{C=O}$ ν(CPh) арени	1750–1600	1609	1597 1738	1600	1772	1698
$\nu_{C=O}$	1705–1600	1609	–	–	–	1607
$\nu_{as\ (CO)}$ Полуторні	1470–1430	1463	–	–	1491	–

Відносна кількість майже всіх компонентів зменшується, що може свідчити про певне випаровування майже всіх сполук екстракту. В той же час відмінною рисою компо-

нентного складу після 24 годин випаровування є значно знижений вміст саме кетонів, альдегідів – бузкового альдегіду та фурфуролу, монотерпенового фенолу – тимолу; ментолу, карвакролу, ледолу, а також підвищений вміст кислот.

Також слід зазначити, що у терпеновій частині спектра спостерігається зменшення деяких аліфатичних монотерпенів та їх кисневмісних похідних. Отримані результати узгоджуються з даними ІЧ-спектроскопії. Більш помітна зміна інтенсивності смуг поглинання зафіксована в області 900–700 $см^{-1}$, що відносяться до коливань ароматичного заміщення, деформаційні коливання зв'язку С–Н, а також деформаційні коливання 1300–1200 $см^{-1}$, що відповідають спиртовим групам. Зменшення інтенсивності коливань в області 1750–1600 $см^{-1}$, характерних для валентних коливань ν(С=О) груп, також свідчить про випаровування частини кетонів. Оскільки кількість кетонів в екстракті є значущою, можна прогнозувати, що одними із перших у парову фазу перейшли молекули кетонів з меншою молекулярної масою, а саме ундекан–2–он,2 –гексанол, 2,3 диметил, 2-тридеканон.

Сумісний розгляд цієї області й області 3800–2800 $см^{-1}$, де знаходяться смуги валентних коливань ОН-груп та результати ГХ-МС, дозволяє очікувати, що карбонові кислоти ще не перейшли в парову фазу. В спектрі досліджуваної рослинної сировини спостерігається зміна в смугах поглинання в області 1550–1400, та 3300 см-1, що характерно для коливання ароматичних структур. Це дає змогу прогнозувати, що такі сполуки, як ванілін, фурфурол, карвакрол, кумарин, ледол, тимол, лімонен та α- ерпінен частково перейшли в парову фазу. Але поява чітко вираженої смуги поглинання в області 1600–1450 $см^{-1}$, яка відноситься до валентних коливань карбонільної групи кетонів, коливань ароматичного кільця, а також вільних і пов'язаних карбоксильних груп свідчить також про достатню кількість цих сполук у досліджуваному екстракті. Як видно із спектрів хромато-мас-спектральних досліджень, отриманих після 48 годин випаровування ізопропанольного екстракту шишок хмелю, спостерігається помітне розходження компонентного складу в порівнянні як зі свіжоприготовленим, так і після 24 годин випаровування. Особливістю цього складу є майже повна відсутність кетонів, альдегідів (фурфурол, бузковий альдегід) ментолу, тимолу, карвакролу, ваніліну та знижена кількість гераніолу і кумарину.

Звертає на себе увагу повна відсутність лімонену на фоні значної кількості деяких інших терпенових вуглеводнів та їх кисневмісних похідних. Найбільшим розкидом за відносним вмістом кислот у цьому складі виділяється валер'янова кислота. Також спостерігається певне зменшення спиртів та дитерпенових ациклічних спиртів (фітол, 1-докосанол), а також монотерпенів, оскільки вони є найбільш леткою частиною ефірних олій. Тому ймовірно, що ці сполуки випаровуються швидше від інших, їх вміст у екстракті зменшується, а відносна частка менш летких сполук (кисневмісних терпеноїдів та сесквітерпенових сполук) у залишку збільшується. Додатковим аргументом, що підтверджує такий висновок, можуть буди результати ІЧ-спектроскопії.

Так, майже повна відсутність смуг поглинання в області 3550–3200 $см^{-1}$ свідчить про випаровування спиртів, фенольних сполук (тимолу, гераніолу, карвакролу, кемпферолу та кверцетину) та частково карбонових кислот з екстракту хмелю. Також малоінтенсивна смуга поглинання при 1610 $см^{-1}$ свідчить про наявність у зразку меншої кількості сполук, що містять у молекулі бензольне кільце. Майже повна відсутність інтенсивних смуг поглинання в області 1450–1250 $см^{-1}$, що відносяться до деформаційних коливань δ ОН-, вказує на велику вірогідність відсутності в екстракті таких сполук, як ментол.

Так само менш інтенсивні смуги поглинання в області 1750–1600 $см^{-1}$, що відносяться до валентних коливань карбонільної групи кетонів та коливань ароматичного

кільця, також вказують на ймовірність випаровування кетонів та альдегідів (бузковий альдегід, фурфурол, ванілін). Поява широкої та інтенсивної смуги поглинання в області 1075–1000 $см^{-1}$, що відноситься до валентних коливань С-О, вказує на велику вірогідність наявність в екстракті сапонінів із залишком цукру (d-маноза, глюкоза).

Порівняння отриманих даних за складом летких сполук після 72 та 96 годин свідчить, що в обох досліджуваних зразках домінуючими компонентами є терпенові сполуки, а їх співвідношення близькі. Винятком для цих двох досліджуваних зразків є різний загальний кількісний вміст валер'янової, масляної та олеїнової кислот, що зменшується зі збільшенням часу самочинного випаровування екстракту, та для 96 годин випаровування характерним є збільшений вміст дитерпенів, що є складовою частиною смолистих сполук екстракту хмелю.

На ІЧ-спектрах після 72 та 96 годин випаровування ще більш помітна різниця у порівнянні з попередніми зразками. Для досліджуваних зразків після 72 та 96 годин випаровування характерні смуги поглинання при 900, 922, 987 $см^{-1}$ (спірокетальне угруповання), що характеризує відсутність смуг поглинання валентних коливань в області 1750–1700 $см^{-1}$ та інтенсивних смуг поглинання в області 1620–1470 $см^{-1}$ свідчить про вірогідну відсутність кумарину в залишку екстракту після 72 годин випаровування. Висока інтенсивність коливань в області 1750–1600 $см^{-1}$, що характерні для валентних коливань ν(С =О) груп, свідчить, що деяка частина карбонільних сполук навіть після досить довготривалого часу випаровування не перейшла в парову фазу. Але наявність цих смуг поглинання не можна однозначно віднести до решти альдегідів, кетонів і кислот у залишку, а скоріше до часткових продуктів їх взаємодії та ароматичних стероїдів, які, як відомо, майже нелеткі. Також поява смуг поглинання в областях ν С-Н ~ 3000 $см^{-1}$, скелетні коливання С-С зв'язку при 1600–1500 $см^{-1}$ та δ С-Н нижче 900 $см^{-1}$ свідчить про залишок в екстракті молекул деяких ароматичних сполук. Нелеткий осад, що залишився, являє собою смолянисту в'язку рідину і становить 2–3 % від початкової маси екстракту.

Таким чином, у загальній динаміці зміни якісного хімічного складу екстракту шишок хмелю при самочинному випаровуванні можна виділити такі етапи: 1 етап (у перші 24 години) – часткове випаровування більш летких органічних сполук: кетонів, альдегідів, терпенів та їх кисневмісних похідних, 2 етап (24–48 годин) – сумісне випаровування флавоноїдів та залишку вищезазначених органічних сполук; 3 етап (48–96 годин) – випаровування малолетких карбонових та фенолкарбонових кислот.

Співставленням результатів електрохімічних досліджень, даних хромато-масспектрометрії та ІЧ-спектроскопії можна зробити висновок, що від початку експозиції металу в паровій фазі екстракту рослинної сировини протягом перших 24 годин відбувається основний процес формування первинної плівки за рахунок адсорбції найбільш летких та хімічно активних компонентів рослинного екстракту, а саме кетонів, альдегідів, терпенів та терпеноїдів. Після першої доби (в період з 24–48 години експонування) процес подальшого формування та ущільнення плівки продовжується за рахунок випаровування та адсорбції додатково флавоноїдів та терпенів (у тому числі лімонену, монотерпену та ін.). Це приводить до отримання плівкою максимальних захисних властивостей. При подальшій експозиції металевого зразка в паровій фазі (від 72 до 96 годин) спостерігається незначне зменшення рівня захисту металу та стабілізація захисних властивостей плівки. Такий ефект може бути пов'язаний з тим, що в цей період відбувається випаровування найменш летких карбонових та фенолкарбонових кислот, які мають досить непогану спорідненість до металевої поверхні.

Причинами зменшення захисних властивостей плівки під час адсорбції цих сполук у третьому періоді може бути декілька причин. З одного боку, з урахуванням багатоком-

понентного складу екстракту можливе формування не тільки моношару, але й інших шарів, що утримуються на поверхні фізично. Під час адсорбції карбонових та фенолкарбонових кислот, вірогідно, відбувається часткова десорбція сполук, які слабко утримуються, що і приводить до збільшення пористості плівки. З іншого боку, за рахунок збільшення терміну адсорбції можлива переорієнтація молекул поверхневого шару, що незначно зменшує його щільність.

Висновки. Встановлено, що залежність фізико-хімічних властивостей плівки, утвореної на поверхні сталі протягом різного часу витримки в парі летких фракцій шишок хмелю, має екстремальний характер з максимумом інгібуючої ефективності після ~48 годин оброблення ЛІАК. Досліджуваний леткий інгібітор є інгібітором катодно-анодного типу. Більшість летких сполук ізопропанольного екстракту шишок хмелю переходять у газопарову фазу за 48 годин самочинного випаровування. Результати проведених досліджень дають змогу прогнозувати, що передусім випаровуються сполуки, які мають меншу молекулярну масу та більшу леткість. Це кетони, альдегіди, терпени та їх кисневмісні похідні, а також флавоноїди. Вірогідно, саме ці сполуки роблять основний внесок у формування захисної плівки на поверхні металу.

Список використаних джерел

1. *Андреев Н. Н.* Физико–химические аспекты действия летучих ингибиторов коррозии металлов / Н. Н. Андреев, Ю. И. Кузнецов // Успехи химии. – 2005. – Т. 24, № 8. – С. 755–767.

2. *Протикорозійні* властивості шишок хмелю / О. Е. Чигиринець, Г. Ю. Гальченко, В. І. Воробйова та ін. // Наукові вісті «КПІ». – 2012. – № 2. – С. 137–148.

3. *Воробйова В. І.* Дослідження протикорозійних властивостей летких інгібіторів атмосферної корозії на основі продуктів рослинної сировини / В. І. Воробйова, О. Е. Чигиринець, Е. О. Чигиринець // Наукові вісті «КПІ». – 2013. – № 1. – С. 123–128.

РОЗДІЛ ІІІ. ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА АВТОТРАНСПОРТУ

УДК 621.922

В.І. Кальченко, д-р техн. наук
В.В. Кальченко, д-р техн. наук
А.М. Єрошенко, канд. техн. наук
А.В. Кологойда, асистент
Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

3D МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАТОЧУВАННЯ ГОЛЧАСТОЇ ГАРНІТУРИ БАРАБАНІВ ТА ВАЛИКІВ ТЕКСТИЛЬНИХ МАШИН

В.И. Кальченко, д-р техн. наук
В.В. Кальченко, д-р техн. наук
А.М. Ерошенко, канд. техн. наук
А.В. Кологойда, ассистент
Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАТОЧКИ ИГОЛЬЧАТОЙ ГАРНИТУРЫ БАРАБАНОВ И ВАЛИКОВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАШИН

Vitalii Kalchenko, Doctor of Technical Sciences
Volodymyr Kalchenko, Doctor of Technical Sciences
Andrii Yeroshenko, PhD in Technical Sciences
Antonina Kolohoida, assistant
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

3D MODELING OF GRINDING OF NEEDLE SETS OF DRUMS AND ROLLERS OF TEXTILE MACHINES

На текстильних підприємствах широко використовуються чесальні агрегати для прочісування вовни, основним робочим елементом яких є голчаста гарнітура. Якість заточування голчастої поверхні значним чином впливає на якість продукції, що випускається, та відсоток браку. Головною проблемою під час її заточування є виникнення задирки на кінчиках голок, які в процесі роботи агрегату викликають розрив вовни. Розмір та положення задирки головним чином залежить від швидкості та методу оброблення. В роботі побудована термомеханічна 3D модель процесу заточування голчастої гарнітури з використанням програмних продуктів SolidWorks, LS-DYNA та ін., що дало можливість визначити контактні напруження у процесі оброблення та температуру в зоні різання. Використання отриманих результатів дозволить оптимізувати процес заточування голчастої гарнітури.

Ключові слова: *шліфування, 3D моделювання, голчаста гарнітура, температура, контактні напруження.*

На текстильных предприятиях широко используются чесальные агрегаты для прочесывания шерсти, основным рабочим элементом которых выступает игольчатая гарнитура. Качество заточки игольчатой поверхности главным образом влияет на качество выпускаемой продукции и процент брака. Главной проблемой при ее заточке является возникновение заусенцев на кончиках иголок, которые в процессе работы агрегата вызывают разрыв шерсти. Размер и положения заусенца главным образом зависит от скорости и метода обработки. В работе предложена термомеханическая 3D модель процесса заточки игольчатой гарнитуры с использованием программных продуктов SolidWorks, LS-DYNA и др., что дало возможность определить контактные напряжения в процессе обработки и температуру в зоне резания. Использование полученных результатов дает возможность оптимизации процесса заточки игольчатой гарнитуры.

Ключевые слова: *шлифование, 3D моделирование, игольчатая гарнитура, температура, напряжения.*

In the textile enterprises used carding machines for carding wool, the main working element which acts card clothing. Quality sharpening the needle surface is mainly influenced by the quality of its products and the percentage of defects. The main problem with it is the appearance of grinding burrs on the tips of the needles, which are in the process of operation of the unit causing the gap wool. The size and position of the burr is mainly dependent on the speed and processing method. We propose a 3D model process of sharpening card clothing using software SolidWorks, LS-DYNA and others, which made it possible to determine the contact stress during handling and temperature in the cutting zone. Using the results obtained enables process optimization sharpening card clothing.

Key words: *grinding, 3D modeling, card clothing, temperature, contact stresses.*

Постановка проблеми. На текстильних підприємствах широко використовуються чесальні агрегати, основним робочим елементом яких є голчаста поверхня барабанів та

валиків. На якість продукції, що випускається, та відсоток браку головним чином впливає якість заточування голчастої поверхні. Основними характеристиками заточуваної поверхні є величина задирки на одній голці та форма її робочої частини. За відомими методами заточування голчастої гарнітури відбувається за пружною схемою, де в процесі формування натягу в системі «голчаста гарнітура – шліфувальний інструмент» майже весь припуск знімається за один оберт, причому температура в зоні оброблення значно підвищується, голки оплавляються і на їх кінчиках утворюються задирки, які при подальшому обробленні практично не знімаються.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1; 2] досліджені різні методи заточування голчастої поверхні барабанів та валиків текстильних агрегатів. Запропоновані нові методи оброблення, які зменшують розміри задирки, що утворюється на кінчику голки під час заточування.

Проведено динамічне 3D моделювання процесу шліфування у режимі самозаточування [3], запропонована методика використання вирішувача LS-DYNA при динамічному моделюванні процесу алмазно-абразивного оброблення. У роботі [4] з використанням спеціалізованого пакету програм CosmosWorks, на базі запропонованої 3D моделі системи «зв'язка – зерно – металофаза – заготовка» розраховано еквівалентні напруження, які виникають у процесі оброблення.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Однак у запропонованих роботах не проведені ґрунтовні дослідження, які б показували, як залежить величина задирки від швидкості оброблення та припуску, що знімається, не наведені оптимальні швидкості різання та не визначено методику їх призначення. Незрозуміло, якої деформації зазнає одна голка в процесі заточування і яким чином впливає на форму та якість робочої поверхні.

У розроблених 3D моделях процесу шліфування основна увага приділяється властивостям інструменту і, головним чином, досліджуються його оптимальні характеристики. При цьому не з'ясована поведінка деталі з врахуванням її не жорсткого закріплення та пружних деформацій, яких вона зазнає у процесі оброблення.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є розроблення термомеханічної моделі процесу заточування голчастої гарнітури, яка дозволить з'ясувати вплив різних параметрів на процес формування та розміри задирки, а також на форму робочої поверхні голки.

Виклад основного матеріалу. Голчаста гарнітура (рис. 1) складається з набору скоб, закріплених у визначеному порядку на основі, яка виготовляється за допомогою склеювання декількох шарів тканини і шару повстини або гуми товщиною 4±0,5 мм. Скобки голчатої стрічки представляють собою проволоку круглого перерізу і мають П-подібну форму. Їх плечі називаються силами. Місце з'єднання двох суміжних сил називається сідлом скоби. Робочою частиною голок є їх вершина і боки. Звичайно скоби виготовляють з проволоки діаметром $d=0,2\text{-}0,4$ *мм* зі сталі У7А. Заточування голчастої поверхні виконують абразивним кругом зернистістю 160/125.

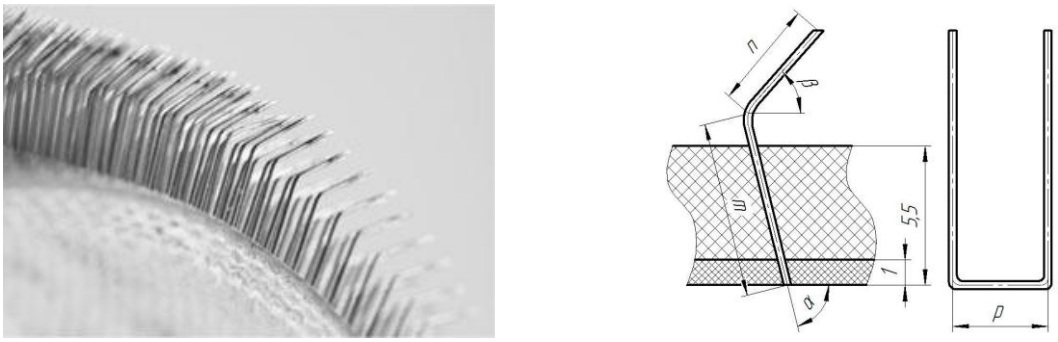


Рис. 1. Загальний вигляд та основні розміри голчастої гарнітури

З метою побудови термомеханічної моделі процесу заточування голчастої гарнітури абразивним кругом, більш детально розглянемо процес різання одним абразивним зерном однієї голки. Побудову 3D моделей та розрахунок процесу будемо виконувати з використанням таких програмних продуктів, як SolidWorks, ANSYS WorkBench, LSPrePost та розрахункового модуля LS-DYNA, за методикою, запропонованою у роботі [5].

3D модель тіла голки була створена у пакеті SolidWorks (рис. 2, *а*) за основні розміри було прийнято: *d=0,3 мм*, *m=7 мм*, *n=4,5 мм*, α=77º, β=48º. Під час заточування голчастої поверхні значний вплив на поведінку голки при входженні її в зону оброблення має демпфуючий шар основи, який зменшує величину пружних деформацій голки та відхилення її від початкового положення. Під час моделювання процесу оброблення основу, в якій закріплено голки, зображуємо у вигляді циліндра діаметром d_c*=1 мм* та висотою h_c*=5,5 мм*, пружні властивості якого відповідають пружним характеристикам повстини.

Сітку скінченних елементів створюємо у програмному модулі CosmosWorks, при цьому з метою оптимізації процесу розрахунків розміри сітки скінченних елементів голки приймаємо меншими за розміри основи (рис. 2, *б*).

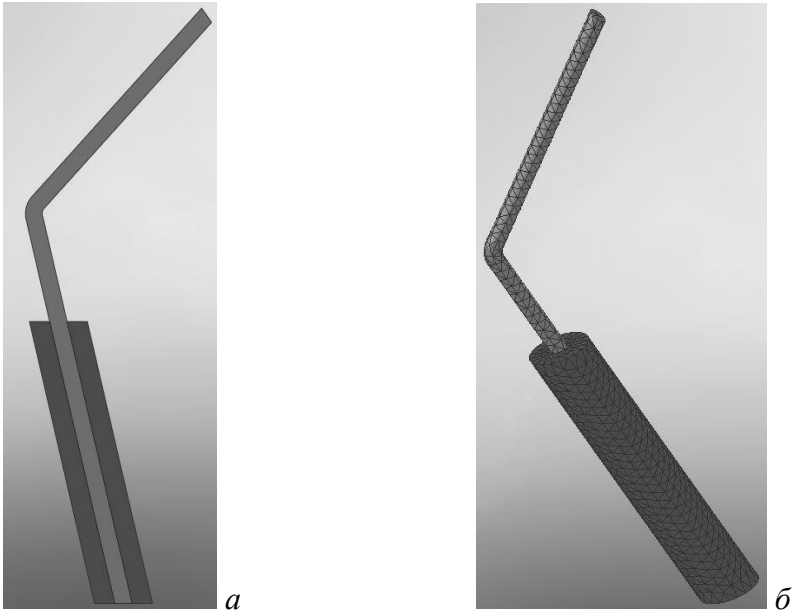
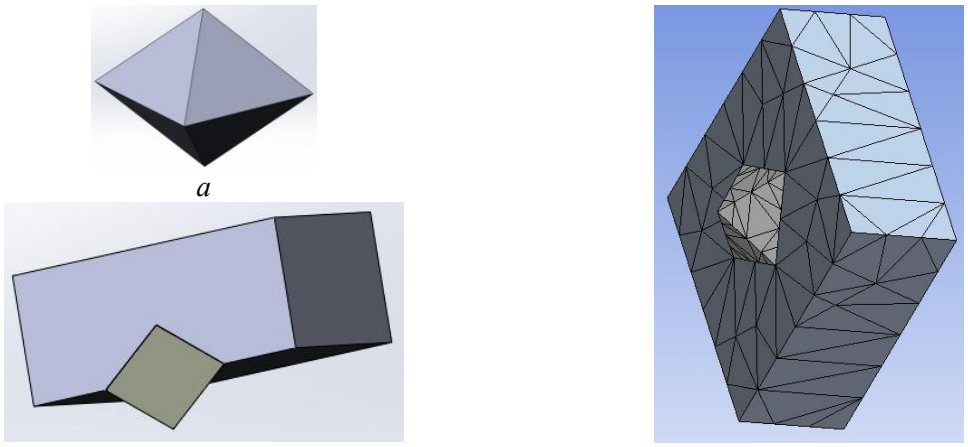


Рис. 2. 3D модель та сітка скінченних елементів заготовки:
а – 3D модель деталі; б – сітка скінченних елементів деталі

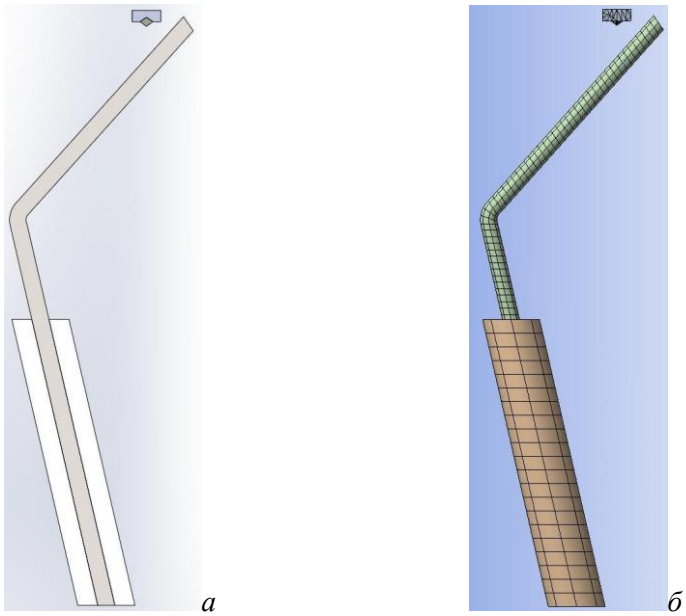
На адекватність моделювання процесу заточування голчастої гарнітури значно впливає правильність вибору та побудови моделі інструмента. Авторами [6; 7] пропонуються моделювати абразивні зерна у формі прямокутного паралелепіпеда, конуса, сфероїда, еліпсоїда, октаедра та ін. Використовуючи критерії, наведені у роботі [7], для моделювання заточування голчастої гарнітури абразивним інструментом із середнім розміром зерен *160 мкм* як геометричну модель зерна приймаємо октаедр з розміром головної діагоналі *160 мкм* (рис. 3, *а*). З метою найбільш повного відображення умов закріплення зерна у зв'язці та надання зерну необхідної орієнтації змоделюємо зв'язку у вигляді паралелепіпеда, властивості матеріалу якого вибираємо найбільш близькими до властивостей керамічної зв'язки (рис. 3, б). Сітку скінченних елементів на поверхні інструмента створюємо засобами програмного модуля CosmosWorks (рис. 3, *в*), при цьому розмір елементів зерна приймаємо меншим за розміри елементів зв'язки з метою зменшення машинного часу розрахунку системи та враховуємо незначні втрати точності на зв'язці.



а *б* *в*

Рис. 3. Моделювання робочої поверхні інструмента:
а – 3D модель ріжучого зерна; б – метод закріплення зерна у зв'язці;
в – сітка скінченних елементів інструмента

Складальну модель (рис. 4) створюємо у програмі SolidWorks. Початкові параметри процесу (швидкість та глибина різання) та властивості матеріалу задаємо у препроцесорі LSPrePost. Вважаючи, що швидкість різання направлена по дотичній до радіуса валика текстильної машини, абразивне зерно розміщуємо на відстані припуску на оброблення та надаємо йому швидкості у горизонтальному напрямку, всі інші рухи обмежуємо, накладаючи відповідні зв'язки. Рух деталі обмежуємо, забороняючи переміщення нижнього торця голки та основи, а також будь-які переміщення зовнішнього циліндра демпфера.



а *б*

Рис. 4. Складальна 3D модель оброблення:
а – 3D обробляючої системи; б – створення сітки скінченних елементів системи

На практиці швидкість обертання шліфувального круга найчастіше приймають у діапазоні 20…35 м/с, швидкість обертання деталі 1…12 м/с, повздовжню подачу 200…1200 мм/хв. З метою отримання найбільш повної інформації щодо особливостей процесу заточування голчастої гарнітури проведемо повне факторне планування експерименту. Як фактори експерименту приймаємо швидкість оброблення, подачу та глибину різання (табл. 1).

Таблиця 1

Кодування факторів експерименту

Інтервал варіювання та рівні факторів	Натуральні значення факторів			Кодове значення факторів		
	V, м/с	S, мм/с	t, мм	X_1	X_2	X_3
Нульовий рівень	30	400	2	0	0	0
Інтервал варіювання	15	200	2			
Верхній рівень	45	600	4	+	+	+
Нижній рівень	15	200	0	–	–	–

За відомою методикою складемо матрицю планування експерименту. При цьому рядки матриці будуть відповідати різним експериментам, а стовбці – різним значенням факторів. Складання матриці експерименту здійснюємо за правилом чергування знаків: для першого значення рівні чергуються в кожному експерименті, для другого – через 2 експерименти, а для третього – через 4 експерименти.

При цьому кількість можливих експериментів визначається за формулою:

$$N = p^k = 2^3 = 8.$$

У випадку моделювання експерименту по заточуванню голчастої гарнітури необхідно врахувати те, що ефект одного фактора буде залежати від рівня, на якому знаходиться інший фактор. У цьому випадку матриця планування експерименту буде мати вигляд табл. 2, а математична модель записується у вигляді рівняння:

$$Y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_3 \cdot X_3 + B_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + B_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + \\ + B_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + B_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3.$$

Таблиця 2

Матриця планування повного факторного експерименту 2^3

№ експерименту	X_1	X_2	X_3	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1X_2 X_3$	Y
1	–	–	–	+	+	+	–	Y_1
2	+	–	–	–	–	+	+	Y_2
3	–	+	–	–	+	–	+	Y_3
4	+	+	–	+	–	–	–	Y_4
5	–	–	+	+	–	–	+	Y_5
6	+	–	+	–	+	–	–	Y_6
7	–	+	+	–	–	+	–	Y_7
8	+	+	+	+	+	+	+	Y_8

Під час заточування голчастої гарнітури на голки діють певні сили (рис. 5). Чисельне значення сил різання (P_y, P_z) та сили тертя залежить від режимів оброблення, матеріалу деталі та шліфувального круга. Сила протидії основи деформації голки Q залежить від пружних властивостей повстини та сил різання і тертя. Визначення пружних властивостей основи є складною технічною задачею, для вирішення якої було проведено експериментальне дослідження за схемою, наведеною на рис. 6.

У результаті оброблення експериментальних результатів було виявлено, що при дії сили різання величиною 1 Н розподілене навантаження, з яким повстина тисне на голку, становить 1,492 Н/мм.

Значення сили різання визначається за відомими формулами і в цьому випадку становить P_z=0,023 Н, отже навантаження, з яким повстина діє на голку, дорівнює:

$$Q = 1{,}492 \cdot 0{,}023 = 0{,}0343\, H.$$

Сила тертя:

$$F_{тр} = 0{,}2 \cdot 0{,}023 \cdot 1{,}088 = 5 \cdot 10^{-3}\ H.$$

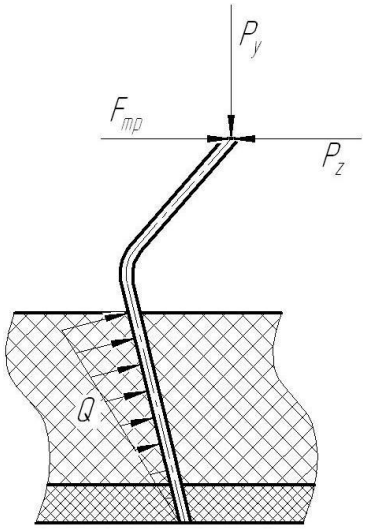
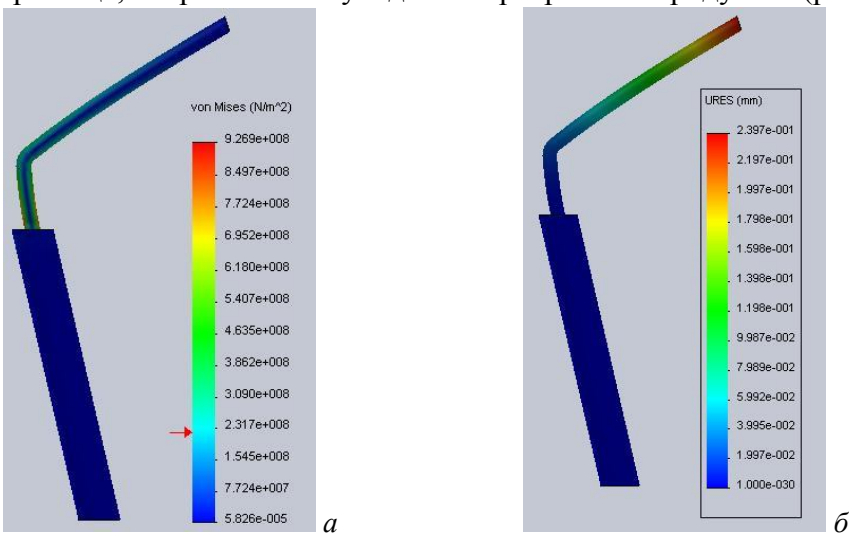


Рис. 5. Результати розрахунку 3D моделі процесу оброблення

Рис. 6. Визначення сили протидії повстини деформації голки

Знаючи всі сили, що діють на голку, стає можливим визначення сил та деформацій, які виникають під час заточування голчастої гарнітури, методом скінченних елементів або скінченних різниць, які реалізовані у відомих програмних продуктах (рис. 7).



а *б*

Рис. 7. Результати розрахунку 3D моделі процесу оброблення:
а – контактні напруження в деталі; б – пружні переміщення деталі

Висновки і пропозиції. Запропонована комп'ютерна 3D модель нежорсткої системи «оброблювана деталь – зерно – зв'язка» з використанням методу скінченних елементів. Визначено сили, які діють на одну голку у процесі заточування голчастої гарнітури, експериментально визначена сила протидії основи деформації голки. Досліджена поведінка однієї голки при взаємодії з одним абразивним зерном, встановлено контактні напруження в системі та характер пружних переміщень деталі. Надалі планується, на основі отриманої моделі, запропонувати методику вибору оптимальної швидкості оброблення за умови формування мінімальної задирки. Встановити зв'язок форми робочої поверхні голки залежно від швидкості заточування.

Список використаних джерел

1. *Кальченко В. І.* Особливості процесу заточки голок валків чесальних машин зі схрещеними осями інструмента та деталі / В. І. Кальченко, В. В. Кальченко, А. В. Кологойда // Вісник Сумського державного університету. – Суми : СумДУ, 2010. – № 4. – С. 55–60.

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. *Бабенко Е. А.* 3D моделирование процесса алмазного шлифования методом конечных элементов / Е. А. Бабенко, В. А. Федорович // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Х. : НТУ «ХПИ», 2010. – Вып.78. – С. 15–23.

4. *Федорович Д. О.* Динамическое 3D моделирование процесса шлифования в режиме самозатачивания / Д. О. Федорович, Д. В. Криворучко, В. А. Федорович // Різання та інструмент в технологічних системах : сборник научных работ НТУ «ХПИ». – Х., 2012. – № 82.

5. *Криворучко Д. В.* 3D Моделирование рабочих процессов резания методом конечных элементов : учебное пособие / Д. В. Криворучко, В. А. Залога, В. Г. Корбач. – Сумы, 2008. – 326 с.

6. *Грабченко А. И.* 3D-моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования : учебное пособие / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, В. А. Федорович. – Х. : НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с.

7. *Сафронова М. Н.* Критерий для выбора геометрической модели абразивного зерна / М. Н. Сафронова // Известия Самарского науч. центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, №1 (2). – С. 432–434.

УДК 621.822.172:621.7.079

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

ТИСК У КАРМАНАХ РАДІАЛЬНИХ ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОР З УРАХУВАННЯМ НЕІДЕАЛЬНОЇ ГЕОМЕТРІЇ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ

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

ДАВЛЕНИЕ В КАРМАНАХ РАДИАЛЬНЫХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР С УЧЕТОМ НЕИДЕАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ

Dmytro Fedorynenko, Doctor of Technical Sciences
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

THE PRESSURE IN THE CHAMBERS OF RADIAL HYDROSTATIC BEARINGS WITH REGARD TO NON-IDEAL GEOMETRY OF THE FLOW PART

Одним з найбільш перспективних типів шпиндельних опор для забезпечення прецизійного оброблення на верстатах є гідростатичні опори. Основою для визначення експлуатаційних параметрів гідростатичних опор є функція розподілу тиску на опорних поверхнях. У роботі розроблено математичну модель для визначення тиску у карманах опор з урахуванням одночасного впливу похибок форми, похибок, обумовлених пружними та температурними деформаціями спряжених поверхонь. Отримано узагальнену просторову функцію радіального зазору для опису неідеальної геометрії проточної частини, яка може бути використана для аналізу робочих процесів у опорах ковзання широкої номенклатури технологічних машин. У результаті розрахунку засобами пакету MathCAD з'ясовано закономірності формування тиску у карманах опор залежно від геометричних відхилень та пружних деформацій

опорних поверхонь. Встановлено, що урахування неідеальної геометрії спряжених опорних поверхонь дозволило підвищити точність визначення характеристик тиску у карманах підшипників у 1,5–2 рази.

Ключові слова *гідростатична опора, тиск, карман, похибки форми, пружні деформації, радіальний зазор.*

Одним из наиболее перспективных типов шпиндельных опор для обеспечения прецизионной обработки на станках являются гидростатические опоры. Основой для определения эксплуатационных параметров гидростатических опор является функция распределения давления на опорных поверхностях. В работе разработана математическая модель для определения давления в карманах опор с учетом одновременного влияния погрешностей формы, погрешностей, обусловленных упругими и температурными деформациями сопряженных поверхностей. Получена обобщенная пространственная функция радиального зазора для описания неидеальной геометрии проточной части, которая может быть использована для анализа рабочих процессов в опорах скольжения широкой номенклатуры технологических машин. В результате расчета средствами пакета MathCAD установлены закономерности формирования давления в карманах опор в зависимости от геометрических отклонений, упругих деформаций опорных поверхностей. Установлено, что учет неидеальной геометрии сопряженных опорных поверхностей позволил повысить точность определения характеристик давления в карманах подшипников в 1,5–2 раза.

Ключевые слова: *гидростатическая опора, давление, карман, погрешности формы, упругие деформации, радиальный зазор.*

One of the most promising types of spindle poles to ensure precision machine are hydrostatic bearings. The basis for the definition of operational parameters of the hydrostatic bearing is a function of pressure distribution on the contact area. In the work the mathematical model is created for determine the pressure in the chambers of the supports given the simultaneous influence of form variation, due to the elastic and thermal deformations of the mating surfaces. The obtained generalized spatial function of radial clearance to describe non-ideal geometry of the flow part, which can be used for analysis of working processes in the sliding bearings of a wide range of technological machines. The result of calculation by means of MathCAD determined the formation pressure in the chambers of supports depending on deviations geometric and elastic deformations of bearing surfaces. It is established that the accounting of non-ideal geometry of paired bearing surfaces is allowed to increase accuracy of pressure characteristics definition in the bearings chambers from 1.5 till 2 times.

Key words: *hydrostatic bearing, pressure, chamber, form variation, elastic deformation, radial clearance.*

Постановка проблеми. Проблема підвищення якості машинобудівних виробів тісно пов’язана з точністю механічного оброблення, і, передусім, з точністю та робочими швидкостями шпиндельних вузлів як однієї з основних формоутворюючих ланок динамічної системи верстата.

Одними з найбільш перспективних типів шпиндельних опор для забезпечення прецизійного оброблення є гідростатичні опори (ГСО), які разом з високою жорсткістю та демпфіруючою здатністю дозволяють керувати вихідними параметрами точності обертання шпинделя. Основою для визначення експлуатаційних параметрів ГСО є функція розподілу тиску на опорних поверхнях. Наявні підходи до визначення функції розподілу тиску в ГСО мають недостатню точність, оскільки ґрунтуються на ідеалізації опорних поверхонь підшипника і не дозволяють визначати експлуатаційні характеристики опор при одночасному впливі геометричних відхилень, пружних та температурних деформацій спряжених опорних поверхонь підшипника. Це приводить до формування суттєвих похибок розрахунку і значно ускладнює обґрунтований вибір експлуатаційних параметрів опор. Тому підвищення точності визначення розподілу тиску на опорних поверхнях під час проектування ГСО є актуальним завданням, вирішення якого дозволить підвищити показники якості шпиндельних вузлів верстатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У монографії [1] досліджено вплив деяких відхилень поверхонь шипа і вкладиша від правильної геометричної форми на роботу підшипників ковзання. Там же зазначено, що несуча здатність, момент тертя істотно залежать від геометрії спряжених поверхонь навіть при незначних відхиленнях функції зазору від гармонічної складової.

У роботі [2] розглянуто вплив основних похибок вала і втулки в поперечному та поздовжньому напрямках на тиск у карманах ГСО із визначенням відповідних витратних характеристик, коефіцієнта навантажувальної здатності при ламінарному режимі течії рідини.

Авторами роботи [3] отримано просторову функцію розподілу тиску у підшипниках ковзання під час впливу відхилень круглості, профілю поздовжнього перерізу та ін. Відзначено залежність похибок форми опорних поверхонь від ексцентриситету в опорі, тиску насоса, швидкості обертання вала, геометричних параметрів підшипника.

Вирішення не вирішених раніше частин проблеми. Наявним у технічній літературі методикам аналізу робочих процесів у ГСО притаманний суттєвий недолік – функція радіального зазору містить здебільшого одне (або два) окремі відхилення опорних поверхонь підшипників. Проте у реальних опорах геометричні відхилення у поперечному та поздовжньому напрямках наявні одночасно, що обумовлює доцільність аналізу вихідних характеристик підшипників з одночасним урахуванням впливу значної кількості похибок спряжених поверхонь.

Метою дослідження є розроблення математичної моделі для визначення тиску в карманах радіальних ГСО з урахуванням одночасного впливу похибок форми, похибок, обумовлених пружними та температурними деформаціями спряжених поверхонь опори.

Основні результати дослідження. Основою для визначення тиску у карманах ГСО є рівняння балансу витрат рідини, що для окремого кармана має вигляд

$$Q_{вхі} = Q_{вихі}, \tag{1}$$

де $Q_{вхі}, Q_{вихі}$ − витрати рідини, що надходять (або виходять) в (з) i-тий (ого) кармана ГСО (рис. 1, *а*) відповідно.

Величина $Q_{вхі}$ обумовлена гідростатичним опором на вході в i-тий карман опори. Вихідна витрата може бути представлена сумою трьох компонент: сумарною витратою скрізь контур i-ого кармана в аксіальному ΣQ_a та тангенціальному напрямках ΣQ_τ опори та витратою рідини Q_p, що обумовлена радіальним зміщенням шийки шпинделя у підшипнику, при якому проявляються ефекти всмоктування та стискання мастильної плівки (поршневий ефект).

Елементарні витрати рідини в аксіальному dQ_a і тангенціальному dQ_τ напрямках, що враховують течії рідини під дією градієнта тиску та витрати, обумовлені переносом рідини під час обертання шпинделя (рис. 1, *а*), можуть бути знайдені на основі рівняння Пуазейля у вигляді:

$$\begin{aligned} dQ_a &= -\frac{h^3(\varphi, z)\cdot R_ш}{12\mu}\frac{\partial p}{\partial z}d\varphi, \\ dQ_\tau &= \left[Q_\omega - Q_{\Delta p}\right]dz = \left[\frac{k_\omega \cdot V_\varphi \cdot h(\varphi, z)}{2} - \frac{h^3(\varphi, z)}{12\mu R_ш}\frac{\partial p}{\partial \varphi}\right]\cdot dz, \end{aligned} \tag{2}$$

де $h(\varphi, z)$ – функція радіального зазору у ГСО у циліндричних координатах (φ − полярний кут, z − апліката);

$R_ш$ – радіус опорної шийки шпинделя;

p − функція розподілу тиску на опорних поверхнях ГСО;

μ − коефіцієнт динамічної в'язкості мастила;

Q_ω, $Q_{\Delta p}$ − витрати рідини в тангенціальному напрямку, що обумовлені відповідно обертанням шпинделя та рухом рідини під дією градієнта тиску;

k_ω – коефіцієнт, що враховує напрямок обертання шпинделя щодо градієнтних витоків рідини з карманів підшипника ($k_\omega = \pm 1$);

V_φ – лінійна швидкість опорної шийки шпинделя у тангенціальному напрямку підшипника.

Після інтегрування рівнянь (2) отримаємо відповідні об'ємні витрати рідини:

$$Q_a = -\frac{R_ш}{12\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\int_{\varphi_{тк1}}^{\varphi_{тк2}} h^3(\varphi, z)\,d\varphi, \tag{3}$$

$$Q_\tau = \frac{k_\omega \cdot V_\varphi}{2} \int_{z_{k1}}^{z_{k2}} h(\varphi, z)\, dz - \frac{1}{12\mu \cdot R_ш} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \int_{z_{k1}}^{z_{k2}} h^3(\varphi, z)\, dz, \quad (4)$$

де $\varphi_{\tau k1}$, $\varphi_{\tau k2}$ – кути, що визначають положення i-ого кармана в циліндричній системі координат;

l_{ka} – ширина кармана (рис. 1, *а*).

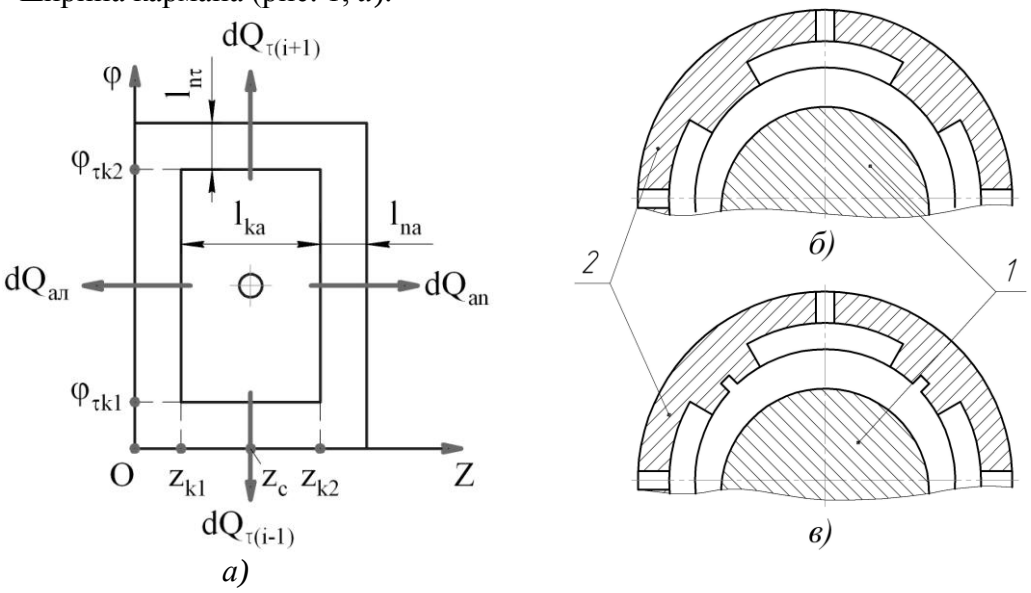


Рис. 1. Розгортка кармана ГСО на площину (а) та схеми відводу мастила (б), (в): 1 – шпиндель; 2 – гідростатична втулка

Витрата рідини Q_p в циліндричній системі координат може бути представлена так: $Q_p = -\frac{1}{R_ш} \iint_S V_r(\varphi, z)\, d\varphi dz$, де S – площа кармана; V_r – швидкість поступального руху опорної шийки шпинделя в радіальному напрямку підшипника.

Величину Q_p доцільно враховувати для високошвидкісних ГСО [4]. Отже, у першому наближенні розглянемо обчислення витрат ΣQ_a, ΣQ_τ скрізь контур i-ого кармана підшипника.

Відвід робочої рідини з підшипника можливий такими двома способами: в аксіальному напрямку (рис. 1, *б*), або у тангенціальному та аксіальному напрямках одночасно (рис. 1, *в*). Причому за другим способом мастило у бічному напрямку відводиться за допомогою спеціальних дренажних канавок, що виконуються паралельно осі підшипника. При цьому тиск на кожній тангенціальній перемичці підшипника змінюється в межах від $p_к$ (тиск у кармані ГСО) до 0 (на дренажній канавці). Таким чином, під час застосування другої конструктивної схеми відводу мастила витрати рідини у тангенціальному напрямку з i-ого кармана не залежать від тиску у суміжних ($i \pm 1$) карманах на відміну від першого способу.

У металорізальних верстатах найбільше застосування знаходять підшипники, що виконані за другою схемою, оскільки вони забезпечують більшу точність обертання шпинделя [5].

Будемо вважати, що на аксіальних перемичках карманів розподіл тиску у напрямку осі z відповідає лінійній характеристиці. Це припущення не чинить суттєвого впливу на точність розрахунку, оскільки похибка, що виникає при лінеаризації епюри тиску, має величину порядку 0,1 % [6].

Враховуючи, що довжина осьових перемичок l_{na} значно менше довжини кармана l_{ka} (рис. 1, *а*) в цьому ж напрямку, впливом геометричних похибок за віссю z у функції за-

зору $h = f(\varphi, z)$ по довжині окремої перемички можна знехтувати. Адекватність такого підходу показана у роботі [7] на прикладі виникнення перекосу в опорі.

З урахуванням зроблених припущень похідна $\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{p_{ki}}{l_{na}}$. Тоді рівняння (3) запишеться у вигляді

$$Q_a = \frac{p_{ki} \cdot R_{ш}}{12\mu \cdot l_{na}} \int_{\varphi_{тk1}}^{\varphi_{тk2}} h^3(\varphi, z_k)\, d\varphi, \tag{5}$$

де p_{ki} – тиск в i-му кармані підшипника;

z_k – координата кромок кармана вздовж осі z, що може приймати значення z_{k1} або z_{k2} (рис. 1, *а*).

Сумарні об'ємні витрати рідини в осьовому напрямку з урахуванням (5) визначаються, як

$$\sum Q_a = Q_{ал} + Q_{an} = \frac{p_{ki} \cdot R_{ш}}{12\mu \cdot l_{na}} \cdot A, \tag{6}$$

де $A = \int_{\varphi_{тk1}}^{\varphi_{тk2}} h^3(\varphi, z_{k1})\, d\varphi + \int_{\varphi_{тk1}}^{\varphi_{тk2}} h^3(\varphi, z_{k2})\, d\varphi$.

Перший доданок у формулі (4), враховуючи, що в напрямку обертання шпинделя $h(\varphi) \neq const$, набуває вигляду

$$Q_{\omega} = \frac{k_{\omega} \cdot V_{\varphi} \cdot k_s}{2} \int_{z_{k1}}^{z_{k2}} h(\varphi_{тk}, z)\, dz, \tag{7}$$

де k_s – коефіцієнт, що враховує вплив нерівномірності зазору $h(\varphi)$ по довжині $l_{n\tau}$ тангенціальної перемички підшипника на витрату Q_{ω};

$\varphi_{тk}$ – координата кромок кармана вздовж осі φ, що може приймати значення $\varphi_{тk1}$ або $\varphi_{тk2}$ (рис. 1, *а*).

Коефіцієнт k_s обчислюється так $k_s = \frac{1+k_i}{2+k_i}$, де $k_i = \frac{h_{max} - h_{min}}{h_{min}}$; $h_{max} = max\{h(\varphi_{тn1}, z_c), h(\varphi_{тn2}, z_c)\}$; $h_{min} = min\{h(\varphi_{тn1}, z_c), h(\varphi_{тn2}, z_c)\}$; $\varphi_{тn1}$, $\varphi_{тn2}$ – кути, що визначають положення тангенціальної перемички у полярній системі координат.

Для обчислення другого доданку у виразі (4) потрібно визначити похідну $\frac{\partial p}{\partial \varphi}$. Покладемо $z = z_c$. Тоді зазначений доданок перетворюється відносно тиску до вигляду

$$p(\varphi, z_c) = -\frac{12 \cdot \mu \cdot R_{ш} \cdot Q_{\Delta p}}{l_{ka}} \int_{\varphi_{т1}}^{\varphi} \frac{1}{h^3(\varphi, z_c)} d\varphi. \tag{8}$$

Визначимо різницю тисків Δp між карманом та дренажною канавкою $\Delta p = p\big|_{\varphi=\varphi_{т1}} - p\big|_{\varphi=\varphi_{т2}} = -p\big|_{\varphi=\varphi_{т2}}$. Приймаємо тиск зливу на кромці дренажної канавки $p_{зл} = 0$, тоді $\Delta p = p_{ki} - p_{зл} = p_{ki}$. Отже, з урахуванням (8) другий доданок у формулі (4) можна переписати у вигляді $Q_{\Delta p} = p_{ki} \cdot l_{ka} \cdot \left(12\mu \cdot R_{ш} \int_{\varphi_{т1}}^{\varphi_{т2}} \frac{1}{h^3(\varphi, z_c)} d\varphi \right)^{-1}$. Тоді витрати рідини через тангенціальну перемичку будуть $Q_{\tau} = \frac{k_{\omega} \cdot V_{\varphi} \cdot k_s}{2} \int_{z_{k1}}^{z_{k2}} h(\varphi_{тk}, z)\, dz + p_{ki} \cdot l_{ka} \cdot \left(12\mu \cdot R_{ш} \int_{\varphi_{т1}}^{\varphi_{т2}} \frac{1}{h^3(\varphi, z_c)} d\varphi \right)^{-1}$.

Таким чином, сумарні витрати рідини з кармана підшипника у тангенціальному напрямку знайдуться, як

$$\sum Q_\tau = Q_{\tau(i-1)} + Q_{\tau(i+1)} = \frac{p_{ki}\cdot l_{ka}}{12\mu R_ш}\cdot B + \frac{V_\varphi}{2}\cdot C,. \qquad (9)$$

де $B = \dfrac{1}{\int\limits_{\varphi_{m1(i-1)}}^{\varphi_{m2(i-1)}} \dfrac{1}{h^3(\varphi, z_C)}d\varphi} + \dfrac{1}{\int\limits_{\varphi_{m1(i+1)}}^{\varphi_{m2(i+1)}} \dfrac{1}{h^3(\varphi, z_C)}d\varphi}$;

$$C = k_{\omega(i-1)}\cdot k_{s(i-1)}\int\limits_{z_{k1}}^{z_{k2}} h(\varphi_{k1}, z)dz + k_{\omega(i+1)}\cdot k_{s(i+1)}\int\limits_{z_{k1}}^{z_{k2}} h(\varphi_{k2}, z)dz.$$

Коефіцієнти $k_{\omega(i-1)}$, $k_{\omega(i+1)}$ мають протилежні знаки, які залежать від напрямку обертання шпинделя.

Запишемо рівняння (2) з урахуванням залежностей (6, 9) та витрати рідини через дросель

$$\frac{p_H - p_{ki}}{R_{ДР}} = \frac{p_{ki}\cdot R_ш}{12\mu\cdot l_{na}}\cdot A + \frac{p_{ki}\cdot l_{ka}}{12\mu\cdot R_ш}\cdot B + \frac{V_\varphi}{2}\cdot C,$$

де p_H – тиск насоса;

$R_{ДР}$ – гідравлічний опір вхідного дроселя.

Звідки після перетворень отримаємо значення тиску в кармані опори

$$p_{ki} = \frac{2p_H - R_{др}\cdot V_\varphi \cdot C}{2R_{др}\left[\dfrac{R_ш}{12\mu\cdot l_{na}}\cdot A + \dfrac{l_{ka}}{12\mu\cdot R_ш}\cdot B + \dfrac{1}{R_{др}}\right]}. \qquad (10)$$

Перетворимо рівняння (10) до безрозмірного вигляду за допомогою заміни:

$$p_{ki} = \bar{p}_{ki}\cdot p_H,\ \bar{R} = 2R_{др}\left[\frac{R_ш}{12\mu\cdot l_{na}}\cdot A + \frac{l_{ka}}{12\mu\cdot R_ш}\cdot B + \frac{1}{R_{др}}\right],\ \bar{p}_\omega = \frac{R_{др}\cdot V_\varphi\cdot C}{p_H}, \qquad (11)$$

де $\bar{p}_{ki}$ – безрозмірна величина тиску в карманах підшипника.

Таким чином, з урахуванням (11) рівняння (10) набуде вигляду

$$\bar{p}_{ki} = \frac{2-\bar{p}_\omega}{\bar{R}}. \qquad (12)$$

Узагальнена просторова функція зазору з урахуванням геометричних відхилень, пружних та температурних деформацій опорних поверхонь ГСО запишеться так

$$h(\varphi, z) = \delta_0 + \frac{T_{кр}^{вт}}{2} + \frac{T_{кр}^{ш}}{2} + \sum_{i=1}^{q} A_i^в \sin(\varphi + \psi_i^в)\left[A_1^* + \sum_{k=2}^{w} A_k^ш \sin(\varphi + \chi_k^ш)\right] + \left(B_0 + \sum_{j=1}^{v} B_j\left(\frac{z}{L}\right)^j\right), \qquad (13)$$

де δ_0 – радіальний статичний зазор в опорі;

$T_{кр}^{вт}$, $T_{кр}^{ш}$ – допуски круглості опорних поверхонь гідростатичної втулки та шпинделя відповідно;

$A_i^в$, $\psi_i^в$ – амплітуди та початкові фази гармонік ряду Фур'є відповідно, які характеризують відхилення гідростатичної втулки у напрямку координати φ;

$A_k^ш$, $\chi_k^ш$ – амплітуди та початкові фази гармонік ряду Фур'є відповідно, які характеризують відхилення опорної поверхні шпинделя у напрямку координати φ;

q, w − кількість значущих гармонік відповідних рядів Фур'є;

A_1^* − член ряду Фур'є, що характеризує перекіс шпинделя у ГСО і визначається так

$$A_1^* = \sqrt{\left(e_0 \cos\varphi_0 + z \cdot \mathrm{tg}\beta\right)^2 + \left(e_0 \sin\varphi_0 + z \cdot \mathrm{tg}\alpha\right)^2} \cdot \sin\left(\varphi + \left(\frac{\pi}{2} - \mathrm{arctg}\frac{e_0 \sin\varphi_0 + z \cdot \mathrm{tg}\alpha}{e_0 \cos\varphi_0 + z \cdot \mathrm{tg}\beta}\right)\right);$$

e_0, φ_0 − абсолютний ексцентриситет та кут, що визначають положення центра поперечного перерізу шпинделя відповідно;

α, β − кути, що характеризують перекіс шпинделя у ГСО у вертикальній та горизонтальній площинах;

B_0, B_j, v − коефіцієнти (B) та кількість доданків (v) апроксимуючого полінома, що характеризує відхилення опорних поверхонь у напрямку координати z;

L − довжина опорної шийки шпинделя.

Докладно питання визначення складових функції зазору (13) розглянуто у роботах [8; 9].

У результаті математичного моделювання отримали залежності (11–13), за якими може бути визначений тиск рідини у карманах радіального ГСО з урахуванням одночасного впливу похибок форми, похибок, обумовлених пружними та температурними деформаціями спряжених поверхонь опори.

На основі розрахунку за допомогою пакету MathCAD визначені епюри безрозмірного тиску у тангенціальному напрямку передньої радіальної ГСО прецизійного токарного верстата УТ16А (рис. 2) за початкових умов: $R_ш$=0,08 м; μ=0,0108 Па·с; частота обертання шпинделя $n_ш$=2000 хв$^{-1}$; p_H=2 МПа; e_0=10 мкм, δ_0=40 мкм, φ_0=75°, $T_{кр}^{вп}$=10 мкм, $T_{кр}^{ш}$=2 мкм, $A^в$=(12,52; 1,06; 1,19; 0,19; 0,62; 0,36), $A^ш$=(10; 1), $\psi^в$=(π/2+34,3·π/180; π/2+9,5·π/180; π/2+64,2·π/180; π/2+48,5·π/180; π/2-15,4·π/180; π/2+2,1·π/180), $\chi^ш$=(π/2-75·π/180; 0). Величини амплітуд $A^в$, $A^ш$ та початкових фаз $\psi^в$, $\chi^ш$ визначалися за апріорною інформацією [10; 11].

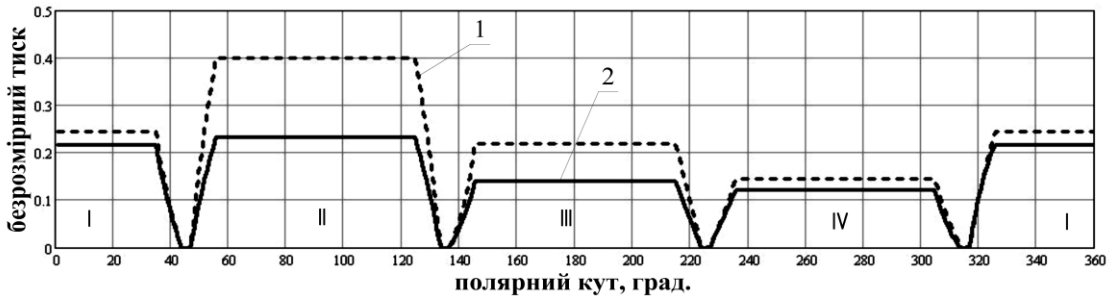


Рис. 2. Функція тиску у тангенціальному напрямку ГСО: 1 - ідеалізовані поверхні підшипника; 2 – з відхиленням форми спряжених поверхонь підшипника

На графіку (рис. 2) римськими цифрами позначено номер кармана опори. Як видно з рис. 2, урахування реальної геометрії спряжених поверхонь опори приводить до суттєвого відхилення функції тиску (крива 2) у тангенціальному напрямку у порівнянні з її ідеалізованими поверхнями. Зазначене явище обумовлює відповідну зміну вихідних характеристик ГСО, насамперед несучої здатності та жорсткості, які, у свою чергу, істотно впливають на точність механічного оброблення деталей.

Величини тиску рідини у карманах для ідеалізованих поверхонь підшипника приймають здебільшого більших значень щодо тиску з урахуванням відхилень форми. Зазначене явище обумовлюється впливом функції зазору $h=f(\varphi)$. Урахування неідеальної геометрії спряжених поверхонь підшипника приводить до збільшення радіального зазору у тангенціальному напрямку підшипника і, як наслідок, до зменшення відповідних значень тиску рідини.

Як видно з графіків на рис. 3, відхилення форми опорних поверхонь та деформації гідростатичної втулки у тангенціальному напрямку приводять до зменшення величин тиску (криві 2, 3 на рис. 3) у всьому діапазоні навантажень на ГСО, які у цьому випадку характеризовані величиною ε. Встановлено, що максимальна відносна розбіжність значень між кривими 2 та 3 становить 2,5 %, що має місце при ε=0,9. Таким чином, впливом деформацій гідростатичної втулки у тангенціальному напрямку на вихідні характеристики ГСО можна знехтувати.

За графіками на рис. 3, *б* (крива 4) встановлено, що деформації втулки в аксіальному напрямку приводять до зменшення тиску у карманах ГСО у всьому діапазоні навантажень на шпиндель. Відмічене падіння тиску у карманах приводить до відповідного відносного зменшення несучої здатності опори до 3,5 %, причому більші значення діапазону припадають на величини ε>0,8. Основний вплив як на тиск у карманах, так і несучу здатність опори чинять геометричні відхилення опорних поверхонь у тангенціальному напрямку підшипника (крива 5 на рис. 3, *б*).

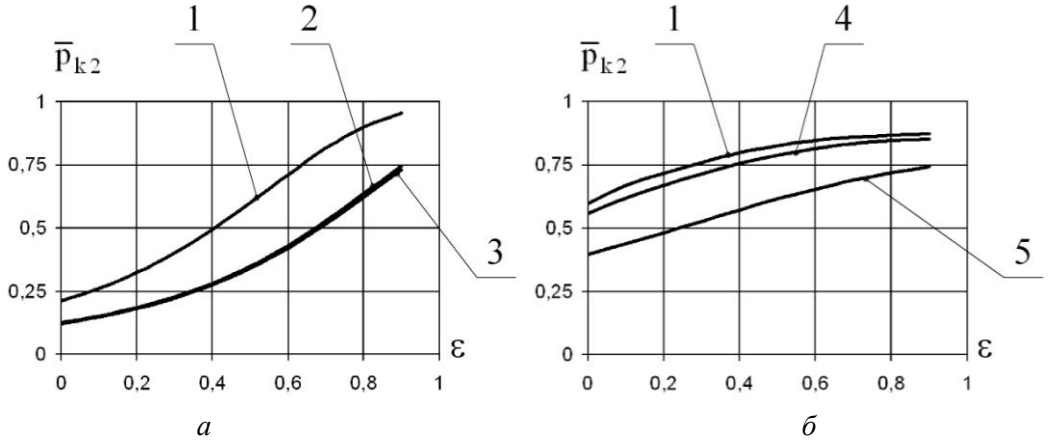


Рис. 3. Безрозмірні залежності тиску у другому кармані опори $\overline{p}_{k2}$ у функції відносного ексцентриситету ε: 1 – ідеалізовані поверхні підшипника; 2 – з відхиленням форми спряжених поверхонь; 3 – з відхиленням форми спряжених поверхонь та урахуванням деформацій втулки у тангенціальному напрямку підшипника; 4 – з урахуванням деформацій втулки в аксіальному напрямку підшипника; 5 – з відхиленням форми спряжених поверхонь та урахуванням деформацій втулки в аксіальному напрямку підшипника

Висновки. Встановлено, що врахування неідеальної геометрії спряжених опорних поверхонь ГСО дозволило підвищити точність визначення характеристик тиску у карманах у 1,5–2 рази.

Вияснено, що найбільший вплив на експлуатаційні характеристики ГСО чинять ексцентриситет та геометричні відхилення опорних поверхонь у тангенціальному напрямку підшипника.

Показано, що геометричні відхилення опорних поверхонь та деформації втулки в аксіальному напрямку підшипника неістотно впливають на несучу здатність та радіальну жорсткість ГСО. Проте вони впливають на формування моментної складової реакції і, як наслідок, на величину кутової жорсткості підшипника. Крім того, зазначені похибки обумовлюють збільшення мінімальної величини радіального зазору в опорі.

З'ясовано, що одним з найбільш перспективних способів підвищення експлуатаційних характеристик ГСО є регулювання величиною радіального статичного зазору δ_0, яке може бути використано для різноманітних систем живлення підшипників у режимах як постійної витрати рідини ($Q=const$), так і постійного тиску рідини ($p=const$).

Список використаних джерел

1. *Коровчинский М. В.* Прикладная теория подшипников жидкостного трения / М. В. Коровчинский. – М., 1954. – 186 с.

2. *Белоусов А. И.* Влияние некоторых погрешностей форм вала и обоймы на характеристики гидростатического подшипника / А. И. Белоусов, Т. А. Хромова // Исследование гидростатических подшипников. – 1973. – С. 18–28.

3. *Савин Л. А.* Моделирование роторных систем с подшипниками жидкостного трения / Л. А. Савин, О. В. Соломин. – М. : Машиностроение-1, 2006. – 444 с.

4. *Гидростатические* опоры роторов быстроходных машин / [Н. П. Артеменко, А. И. Чайка, В. Н. Доценко и др.] ; под. ред. Н. П. Артеменко. – Х. : Основа, 1991. – 197 с.

5. *Детали* и механизмы металлорежущих станков / [В. В. Каминская, З. М. Левина и др.] ; под ред. Д. Н. Решетова. – М. : Машиностроение, 1972. – 519 с.

6. *Тодер И. А.* Крупногабаритные гидростатодинамические подшипники / И. А. Тодер, Г. И. Тарабаев. – М. : Машиностроение, 1976. – 199 с.

7. *Бушуев В. В.* Гидростатическая смазка в станках / В. В. Бушуев. – М. : Машиностроение, 1989. – 176 с.

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

9. *Федориненко Д. Ю.* Геометрія радіального зазору в регульованих шпиндельних гідростатичних підшипниках / Д. Ю. Федориненко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – Чернігів : ЧДТУ, 2009. – № 40. – С. 119–129.

10. *Федориненко Д. Ю.* Методика дослідження параметрів точності регульованої гідростатичної втулки шпиндельного підшипника / Д. Ю. Федориненко, О. А. Плівак, С. В. Майданюк // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – Чернігів : ЧДТУ, 2012. – №3 (59). – С. 87–93.

11. *Федориненко Д. Ю.* Аналіз точності опорної поверхні регульованого гідростатичного підшипника / Д. Ю. Федориненко, А. А. Урліна // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – Краматорськ : ДГМА, 2013. − №1 (11Е). − С. 116−121.

УДК 621.923.42

В.І. Венжега, канд. техн. наук
А.В. Рудик, канд. техн. наук
Г.В. Пасов, канд. техн. наук
Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБЛЕННЯ ТОРЦЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ПРУЖИН СТИСКУ АВТОМОБІЛІВ НА ЇХ НАДІЙНІСТЬ ТА ДОВГОВІЧНІСТЬ

В.И. Венжега, канд. техн. наук
А.В. Рудик, канд. техн. наук
Г.В. Пасов, канд. техн. наук
Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ТОРЦЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРУЖИН СЖАТИЯ АВТОМОБИЛЕЙ НА ИХ НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

VolodymyrVenzheha, PhD in Technical Sciences
Andrii Rudyk, PhD in Technical Sciences
Hennadii Pasov, PhD in Technical Sciences
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

INFLUENCE OF PROCESSING OF END SURFACES OF CAR COMPRESSION SPRINGS ON THEIR RELIABLITY AND DURABILITY

Представлено аналіз і класифікацію відмов, що виникають у вузлах автотранспортних засобів з вини пружин, запропоновано метод остаточного оброблення пружин шліфуванням, що забезпечує високу точність і продуктивність без зміни фізико-механічних властивостей поверхневого шару та нову методику знаходження середньоквадратичної базової площини обробленої торцевої поверхні деталі, яка не накладає обмежень на характер вимірюваль-

ної траєкторії та дозволяє оцінити як відхилення від перпендикулярності базової площини, так і знайти розсіювання точок обробленої плоскої поверхні щодо неї.

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

Представлен анализ и классификация отказов, возникающих в узлах автотранспортных средств по вине пружин, предложен метод окончательной обработки пружин шлифовкой, что обеспечивает высокую точность и производительность без изменения физико-механических свойств поверхностного слоя и новую методику нахождения среднеквадратичной базовой плоскости обработанной торцевой поверхности детали, которая не накладывает ограничений на характер измерительной траектории и позволяет оценить как отклонение от перпендикулярности базовой плоскости, так и найти рассеивания точек обработанной плоской поверхности относительно нее.

Ключевые слова*: пружины, формообразования, торцевая поверхность детали, шлифование.*

The following aspects are introduced: the analysis and classification of failures that occur in the vehicle knots on the fault of the springs; the method of the final processing of springs by grinding that provides high accuracy and productivity without any changes in physical and mechanical properties of the surface; the new method of calculation of the standard plane of the processed end surface that doesn't restrict a character of measuring trajectory and allows us to calculate the deviation from the perpendicular of a basic surface and find the scattering points of the processed plane surface on it as well.

Kay words*: spring, forming, end face detail sanding.*

Постановка проблеми. Працездатність і стабільні експлуатаційні характеристики автомобілів багато в чому лімітуються ресурсом роботи пружин. Найбільш характерно це проявляється в паливній апаратурі, газорозподільних механізмах, підвісках автомобілів, а також інших механізмах. Тому одним з основних шляхів вирішення проблеми підвищення надійності і довговічності є застосування таких технологічних методів оброблення, які забезпечують високі експлуатаційні властивості відповідальних пружин.

Практика показує, що в багатьох випадках пружини, виготовлені за прийнятою технологією і з якісного дроту, в умовах експлуатації передчасно втрачають пружні властивості або швидко руйнуються, особливо пружини, що працюють у динамічних умовах. Це свідчить про наявність недоліків у технологіях виробництва пружин і про необхідність розроблення способів підвищення їх несучої здатності і сталості пружних властивостей у часі. Істотний вплив на втомну міцність пружин має якість поверхневого шару дроту. Поломки пружин внаслідок втоми або втрата робочих характеристик через релаксації напружень приводять до виходу з ладу вузлів або всієї машини в цілому.

Великий вплив на формування якості поверхневого шару деталі і у зв'язку з цим на її експлуатаційні властивості має технологія виробництва, а особливо операції остаточного оброблення.

Потребує вирішення також проблема оцінювання і прогнозування похибок оброблення запропонованим у роботі методом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Втомне руйнування пружини відбувається внаслідок багаторазової зміни напружень і пов'язано з місцевими пластичними деформаціями в окремих мікрооб'ємах (зернах). При високих напруженнях і великій кількості їх повторень на поверхні пружини виникає тріщина, що поширюється по перетину витка і веде до поломки пружин. Створення поблизу поверхні залишкових стискуючих напружень дозволяє збільшувати граничні амплітуди напружень у поверхневому шарі пружини без ризику її передчасного руйнування. Змінюючи залишкові напруження стиску і глибину зміцнення, можна одержати різний розподіл меж витривалості з підвищенням їх поблизу поверхні. Великий вплив на міцність пружин у цілому має якість внутрішнього шару (серцевини), тому поряд із зміцненням поверхневого шару необхідно прагнути до високої міцності вихідного матеріалу, він повинен бути правильно обраним і правильно термічно обробленим [1].

Ю.І. Іванов і Н.В. Носов на основі результатів оброблення експериментальних даних [2] запропонували емпіричну залежність межі витривалості від параметрів якості поверхневого шару:

$$\sigma_{-1} = \sigma(1+\varepsilon_1) - \varepsilon_2 R_a - \varepsilon_3 \sigma_1,$$

де ε_1, ε_2, ε_3 – коефіцієнти, що враховують наклеп, шорсткість і залишкові напруження в поверхневому шарі.

З формули видно, що можна підвищити межу витривалості деталі. Якщо після остаточного механічного оброблення в поверхневих шарах формуються залишкові напруження стиснення, то останній член у формулі має знак плюс і, відповідно, буде збільшуватися. Крім цього, σ_{-1}, залежить також від глибини поверхневого зміцнення, якщо ε_1 позитивний, це збільшує межу витривалості. Зниження шорсткості R_a завжди буде супроводжуватися збільшенням межі витривалості деталей.

Автори [3] як метод остаточного оброблення пружин пропонують стрічкове шліфування з обертанням стрічки навколо деталі. Пристрій розроблений на основі схеми одностороннього шліфування вільною абразивною стрічкою з обертанням її навколо деталі. Основним недоліком запропонованого методу є низька продуктивність оброблення.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Формоутворенню торцевих поверхонь деталей присвячено наукові праці В.В. Кальченка, Є.Н. Маслова, А.А. Маталіна, В.І. Островського, М.Ф. Семко, С.С. Шахновського та інших. Так, наприклад, у роботах [4; 5] наводиться новий ефективний спосіб шліфування кругами із комбінованою правкою та захищеними формотвірними ділянками. Однак запропоноване метрологічне оцінювання обробленої поверхні є складним, придатним лише для круглих перерізів деталей.

Відомі результати робіт [6; 7], де автори спільно працювали над удосконаленням методики оцінювання похибок оброблення. У цій роботі ці результати доповнено.

Мета статті. Метою роботи є аналіз та класифікація відмов, які виникають у вузлах автотранспортних засобів з вини пружин, і розроблення методу остаточного оброблення пружин шліфуванням, що забезпечує високу точність і продуктивність без зміни фізико-механічних властивостей поверхневого шару, а також визначення положення базової площини та перевірки відповідності розроблених моделей оцінювання точності експериментальним даним.

Виклад основного матеріалу. Більшість автомобільних пружин можна класифікувати за такими ознаками.

1. За характером роботи: пружини стиснення або розтягування з кільцями і без них.
2. За формою пружини: переважно циліндричні.
3. За напрямом навивки: переважно праві.
4. За характером прикладання навантажень:

– що працюють при динамічному навантаженні, для яких характерна велика кількість циклів навантаження – клапанні пружини газорозподільного механізму, пружини бензонасосу;

– що працюють при динамічному навантаженні – пружини форсунок дизельних двигунів, пружини стартера, пружини підвіски, пружини обмежувача максимальної частоти обертання колінчастого вала, пружини відцентрового або вакуумного регуляторів випередження запалювання, пружини перепускного клапана амортизатора;

– що працюють при статичному навантаженні – пружини пристрою натягування паса або ланцюга приводу розподільчого вала двигуна; пружини муфти вимикання, натискні периферійні пружини диска зчеплення; пружини вилки вимкнення зчеплення; пружини дисків і барабанів гальмівної системи.

5. За розмірами: дрібні, середні і великі.

Аналіз основних несправностей автомобілів дозволяє зробити такі висновки: основна несправність – втрата пружності або поломка циліндричних витків пружин, яка характерна для пружних елементів, що витримують змінні навантаження, а ремонт несправностей зводиться до підкладання шайб (при осадженні пружин стиснення) і заміні новою пружиною, яка відповідає технічним умовам.

Розглянемо докладніше відмови, що виникають у вузлах автотранспортних засобів з вини пружин [1; 2; 3].

I. Газорозподільний механізм.

1. Несправність: зниження потужності двигуна. Причина: негерметичність клапанів впливає не тільки на зниження компресії, а й на весь процес утворення і згоряння робочої суміші. Відбувається під час ослаблення або поломки пружин клапанів.

2. Несправність: биття пасу або ланцюга приводу газорозподільного механізму. Причина: зменшення пружності пружини пристрою натягу паса або ланцюга приводу розподільчого вала двигуна.

II. Паливна система карбюраторних двигунів.

1. Несправність: зниження тиску, який подається до карбюратора палива, що приводить до зниження рівня палива в камері. Причина: зменшення пружності робочої пружини бензонасоса.

2. Неправильна робота обмежувача максимальної частоти обертання колінчастого вала. Причина: втрата пружності пружини.

III. Паливна система дизелів.

1. Несправність: незадовільна робота форсунок – мається на увазі як якість уприскування (тиск уприскування), так і відповідність моменту уприскування оптимальному варіанту. При цьому уприскування палива відбуватиметься трохи раніше. Причина: зниження пружності робочої пружини форсунки.

IV. Стартер.

1. Несправність: стартер вимикається, але шестерні не виходять із зачеплення і при цьому прослуховується скрегіт шестерень. Причина: ослаблення буферної пружини.

V. Система запалювання.

1. Несправність: відмова переривника-розподільника, що викликає неправильну роботу запалювання. Причина: ослаблення жорсткості пружини відцентрового або вакуумного регуляторів випередження запалювання.

VI. Зчеплення.

1. Несправність: неповне включення зчеплення. Причина: поломка або послаблення пружини муфти вимикання або натискних периферійних пружин натискного диска.

2. Несправність: підвищений шум під час включення зчеплення. Причина зіскакування, втраті пружності або поломка пружини вилки виключення зчеплення.

VII. Коробка зміни передач.

1. Несправність: самовимкнення передач. Причина: ослаблення пружин фіксаторів або засмічення гнізд пружин.

VIII. Ходова частина.

1. Несправність: відхилення автомобіля від прямолінійного руху. Причина: неоднакова пружність пружин підвіски.

2. Несправність: нахил кузова автомобіля. Причина: нерівномірне осідання пружин підвісок.

3. Несправність: незадовільна робота амортизаторів. Причина: надмірне осідання пружини перепускного клапана амортизатора.

IX. Рульове управління.

1. Несправність: масляний насос не розвиває необхідної подачі і достатнього тиску в системі гідропідсилювача. Причина: порушення роботи запобіжного клапана (при забрудненні, поломці пружини).

X. Гальмівна система.

1. Несправність: сильне нагрівання дисків; неповне розгальмовування коліс. Причина: обривання або ослаблення обмежувальної пружини.

2. Несправність: сильне нагрівання гальмівних барабанів; неповне розгальмовування коліс; скрип або вібрація гальмівних механізмів коліс. Причина: обривання або послаблення стяжних пружин колодок.

Формування якості поверхневого шару деталей в основному здійснюється на заключних операціях технологічного процесу їх отримання.

Процеси шліфування характеризуються високою теплонапруженістю процесу і великими питомими тисками в зоні різання. Значні зміни температури і тиску в зоні різання, у свою чергу, викликають зміну структури, фазового стану і на їх основі зміни фізико-механічних властивостей поверхневих шарів металу. Наклеп, структурні та фазові перетворення формують у поверхневих шарах деталей залишкові напруження. Числове значення і знак напружень залежать від значення і знака вихідних залишкових напружень, отриманих деталлю на попередніх операціях, а також від ступеня силового і теплового впливу поточної операції.

Остаточне оброблення пружин пропонується проводити на двосторонніх торцешліфувальних верстатах з горизонтальним компонуванням шпиндельних вузлів за один прохід, одночасно з двох сторін, застосовуючи спеціально профільовані абразивні круги. Верстати здебільшого складаються з литої чавунної станини, на якій закріплюються дві шліфувальні бабки з незалежними електроприводами, механізму подачі виробів у зону оброблення і механізму правки шліфувальних кругів. Крім цих вузлів, є допоміжні прилади та пристрої: пристрій повороту шліфувальних бабок у вертикальній і горизонтальній площинах, система подачі МОР, пристрій компенсації зносу шліфувального круга та інші.

Для підвищення ефективності шліфування, зниження теплового впливу необхідна профільна правка круга. Найбільш раціональним є запропонований комбінований спосіб правки, представлений на рис. 1.

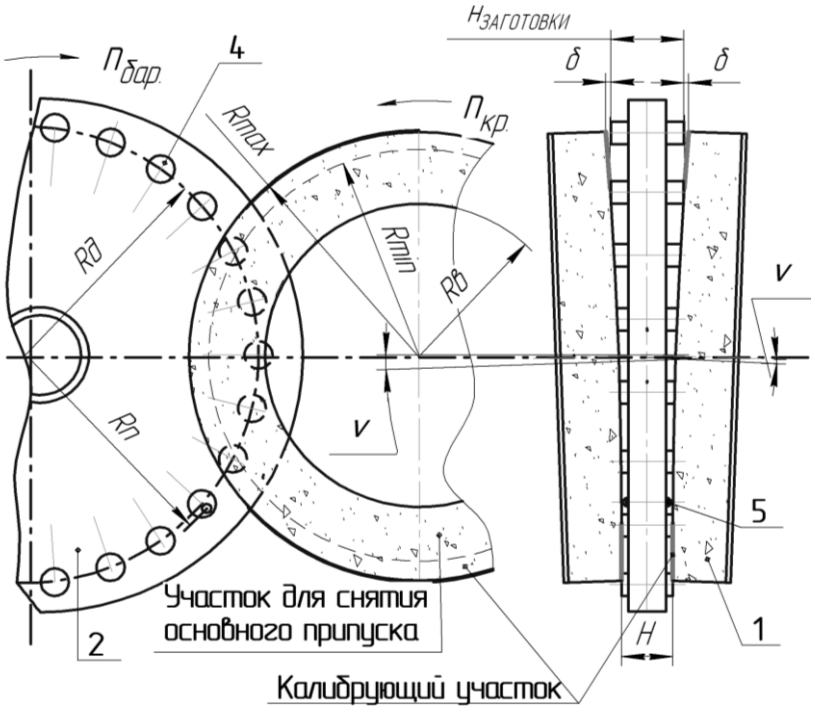


Рис. 1. Комбінований спосіб правки

Круги 1 орієнтують у горизонтальній площині на кут γ і у вертикальній – на кут ν з метою зняття припуску за один прохід. Спочатку вся торцева поверхня круга правиться в площині, перпендикулярній осі обертання круга. Після цього діамантовими олівцями

5, закріпленими на барабані подачі 2, правлять ділянки, які прилягають до зовнішніх діаметрів кругів. При цьому величина радіуса правки Rп , по якому переміщується вершина діамантового олівця при правці, вибирається залежно від форми оброблюваної деталі 4 та її орієнтації в процесі шліфування.

У робочому циклі шліфування комбінована правка дає можливість розподілити припуск δ між чорновою і чистовою ділянками, збільшити робочу довжину L дуги контакту деталей з кругом, що підвищує продуктивність оброблення, знизити температуру в зоні оброблення. Висока точність форми торця деталі забезпечується на формотвірній ділянці 3, прилеглій до зовнішнього діаметра круга, при виході із зони оброблення. При цьому формоутворювальна ділянка 1 не бере участь у зніманні припуску при вході в зону шліфування і має високу стійкість.

Для отримання оцінок точності розмірів, положення та форми обробленої поверхні необхідно побудувати метрологічну базу, за допомогою та відносно якої можна знайти ці оцінки. Під час оброблення 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 середньоквадратична.

Нехай знайдені з профілограми координати N точок $M_1, M_2, ..M_N$ обробленої поверхні, які розташовані на колі, радіусом R траєкторії руху вимірювального пристрою кругломіру (для координат X_i, Y_i; Z_i з профілограми). Необхідно визначити шукані коефіцієнти a, b, d рівняння базової площини $Z=a\,X+b\,Y+d$.

Систему лінійних рівнянь, що описують положення базової площини, записують згідно з принципом Лежандра, використовуючи мінімум суми квадратів помилок [7]:

$$S=\sum_{u=1}^{N}\left[a\cdot X_i+b\cdot Y_i+d-Z_i\right]^2=\min, \tag{1}$$

$$\frac{\partial S}{\partial a}=\frac{\partial S}{\partial b}=\frac{\partial S}{\partial d}=0. \tag{2}$$

Систему, яка складається з трьох лінійних рівнянь, вирішують відносно невідомих коефіцієнтів за допомогою матриць:

$$A\cdot K=B, \tag{3}$$

де $A=\begin{bmatrix}\sum_N X_i\cdot X_i & \sum_N X_i\cdot Y_i & \sum_N X_i\\ & \sum_N Y_i\cdot Y_i & \sum_N Y_i\\ & & N\end{bmatrix}$, $B=\begin{bmatrix}\sum_N X_i\cdot Z_i\\ \sum_N Y_i\cdot Z_i\\ \sum_N Z_i\end{bmatrix}$ – матриці, рядки яких складені з сум добутків та координат точок обробленої поверхні $M_i(X_i, Y_i, Z_i)$;

$K=[a\ \ b\ \ d]^T$ – шуканий вектор коефіцієнтів базової площини, що визначається рішенням матричного рівняння

$$K=A^{-1}\cdot B. \tag{4}$$

Таким чином, рівняння базової площини має вигляд $Z=a\cdot x+b\cdot y+d$, або

$$a\cdot x+b\cdot y-1\cdot Z+d=0. \tag{5}$$

Визначимо відхилення точок $M_1, M_2, ..M_N$ обробленої поверхні відносно базової площини, для чого сумістимо координатну XY і базову площини (рис. 1).

Матриця, яка відповідає похибкам положення базової площини, описується рівнянням (5). Елементи її δ_x, δ_y, γ можна не враховувати через те, що вони не приводять до зміни положення площини у просторі – «базова площина ковзає сама по собі».

Елементи $\alpha_б$, $\beta_б$ матриці $\varepsilon_б$ відповідають кутовим похибкам навколо осей X та Y відповідно, а елемент – зсуву δ_z вздовж осі Z.

Ці елементи матриць визначають з рівнянь (рис. 2)

$$\alpha_б \approx \sin\alpha_б = \frac{b}{\sqrt{b^2+1}},$$
$$\beta_б \approx \sin\beta_б = \frac{a}{\sqrt{a^2+1}}. \qquad (6)$$

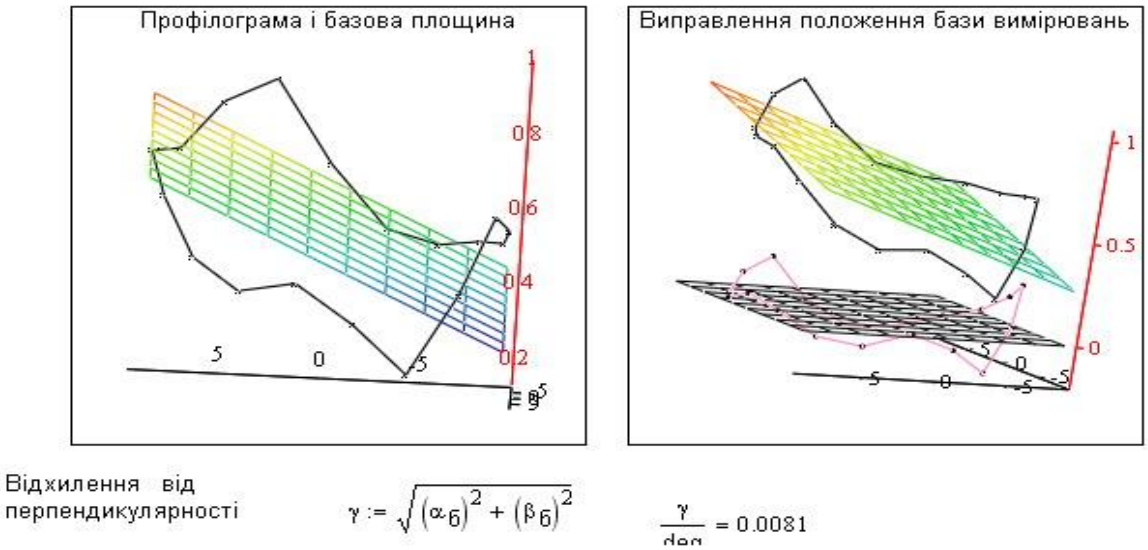


Рис. 2. Результати розрахунку положення базової площини до обробленої торцевої поверхні та її корекція

Відхилення від перпендикулярності базової площини та зсув її вздовж осі деталі визначають

$$\alpha_б^2 + \beta_б^2 = \frac{a^2+b^2}{a^2+b^2+1};\ \delta_z = \frac{d}{\sqrt{a^2+b^2+1}}. \qquad (7)$$

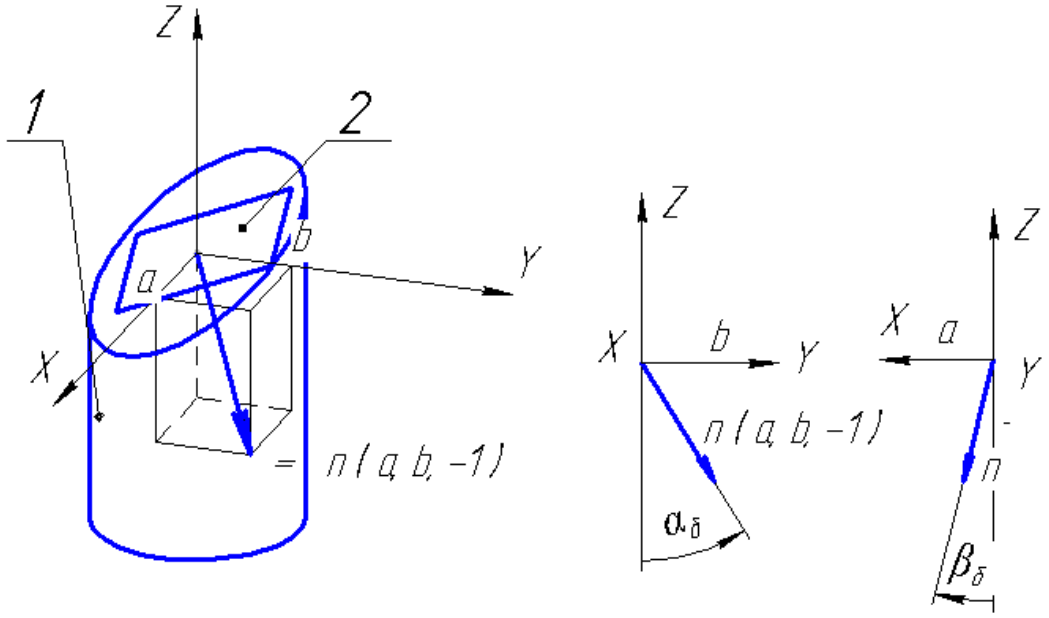


Рис. 3. Схема до визначення похибок положення базової площини: 1 – оброблена деталь, 2 – середньоквадратична базова площина

Тоді матрицю $\varepsilon_б$ похибок положення базової площини записують

$$\varepsilon_б = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \beta_б & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_б & 0 \\ -\beta_б & \alpha_б & 0 & \delta_{бz} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Враховуючи дані величини зі зворотнім знаком, можна корегувати положення базової площини як основи вимірювань:

$$\begin{aligned} \Delta\vec{r_б} &= \varepsilon_б \cdot \vec{r_0} \\ \overrightarrow{r_{корег}} &= \vec{r_0} - \Delta\vec{r_б}, \end{aligned} \quad (9)$$

де наведені вище вектори характеризують номінальне та дійсне положення обробленої торцевої поверхні.

Відхилення від площини визначають за різницею найбільшого та 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 частині 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. 4) підтвердили теоретичні розрахунки.

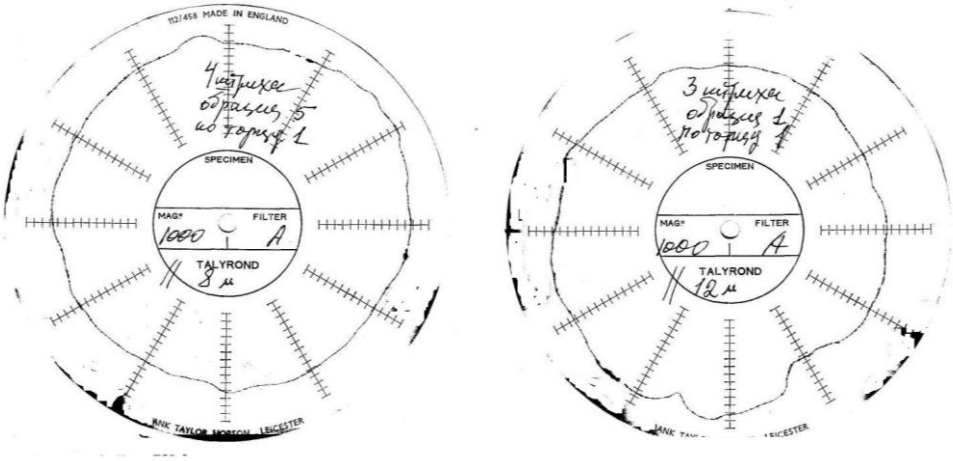


Рис. 4. Профілограми торцевого биття обробленої торцевої поверхні, отримані на кругломірі TALYROOND

Сума квадратів координат усіх 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 $\Delta r_{б.n.}(\beta,\theta)$ у точці торця з координатами оброблення (β,θ), а відношення площин dS/S можна розглядати як елемент ймовірності.

Значення вхідної векторної похибки на нормаль $\Delta r_n(\beta,\theta)$, яке характеризує зміщення ланок верстата відносно номінального положення, визначають з врахуванням знайдених передатних коефіцієнтів a_k подібно до виразів

$$\Delta r_n(\beta,\theta) = \sum_k a_k(\beta,\theta)\cdot q_k, \qquad (11)$$

де q_k –k-та вхідна похибка наладки верстата.

Висновки і пропозиції. У роботі представлено аналіз і класифікація відмов, що виникають у вузлах автотранспортних засобів з вини пружин, та запропоновано метод остаточного оброблення пружин шліфуванням, який забезпечує високу точність і продуктивність без зміни фізико-механічних властивостей поверхневого шару.

Розроблено методику, що дозволяє також порівнювати теоретично розраховані похибки оброблення з експериментальними даними. Складено алгоритм та програми розрахунку в пакеті програм MathCAD щодо визначення відхилень від площинності і перпендикулярності та матриці передатних коефіцієнтів між вхідними та вихідними похибками.

Отримані експеримертальні результати не суперечать теоретичним. Похибка знаходиться в межах 10 %.

Список використаних джерел

1. *Остроумов В. П.* Виробництво гвинтових циліндричних пружин / В. П. Остроумов. – М. : Машинобудування, 1970. – 169 с.

2. *Іванов Ю. І.* Ефективність і якість обробки інструментами на гнучкій основі / Ю. І. Іванов, Н. В. Носов. – М. : Машинобудування, 1985. – 88 с.

3. *Шиляєв С. А.* Технологічні методи підвищення якості пружин, застосовуваних на автотранспорті / С. А. Шиляєв, С. Р. Аллаяров, Т. Р. Меджитов // Збірник наукових праць Іжевського державного технічного університету. –2010. – № 43. – С. 75–83.

4. *Кальченко В. В.* Підвищення ефективності двостороннього шліфування торців циліндричних деталей орієнтованими абразивними кругами : дис. канд. техн. наук : спец. 05.03.01 / В. В. Кальченко. – Х., 1998. – 203 с.

5. *Венжега В. І.* Підвищення ефективності шліфування торців при схрещених осях деталі та круга з калібрувальною ділянкою : дис. канд. техн. наук : спец. 05.03.01 / В. І. Венжега. – Х., 2009. – 214 с.

6. *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.

7. *Кальченко В. В.* Формоутворення торців циліндричних деталей, що не обертаються під час обробки, профільованими і орієнтованими кругами / В. В. Кальченко, Г. В. Пасов // Вісник Чернігівського державного технологічного університету : збірник. – Чернігів : ЧДТУ, 1999. – Вип. 9.– С. 11–17.

8. *Решетов Д. Н.* Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М. : Машиностроение, 1986. – 336 с.

9. *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.

УДК 629.3

Л.А. Тарандушка, канд. техн. наук
І.П. Тарандушка, аспірант
Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

ТЕХНОЛОГІЯ МОНІТОРИНГУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ АВТОМОБІЛІВ

Л.А. Тарандушка, канд. техн. наук
И.П. Тарандушка, аспирант
Черкасский государственный технологический университет, г. Черкассы, Украина

ТЕХНОЛОГИЯ МОНИТОРИНГА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА АВТОМОБИЛЕЙ

Liudmyla Tarandushka, PhD Technical Sciences
Ivan Tarandushka, PhD student
Cherkasy State Technological University, Cherkassy, Ukraine

THE TECHNOLODGY MONITORING OF GUALITY INDEXES OF CARS TECHNICAL MAIN TENANCE AND REPAIR GUALITY

У результаті аналізу показників якості технічного обслуговування і ремонту транспортних засобів було розроблено алгоритм моніторингу показників якості технічного обслуговування та ремонту автомобілів. Важливою складовою моніторингу якості є оцінювання і вибір варіанта технологічного розвитку виробництва технічного обслуговування та ремонту, розроблення рекомендацій щодо впровадження виробничої моделі. Тобто це система спостережень за динамікою відхилень від науково-технічних досягнень техніко-технологічного рівня підприємства.

Ключові слова: *показники якості, транспортні засоби.*

В результате анализа показателей качества технического обслуживания и ремонта транспортных средств был разработан алгоритм мониторинга показателей качества технического обслуживания и ремонта автомобилей. Важной составляющей мониторинга качества является оценка и выбор варианта технологического развития производства технического обслуживания и ремонта, разработка рекомендаций по внедрению производственной модели. То есть это система наблюдений за динамикой отклонений от научно-технических достижений технико-технологического уровня предприятия.

Ключевые слова: *показатели качества, транспортные средства.*

As a result of technical service and repair of transport vehicles quality indexes analysis the algorithm of quality indexes monitoring of cars technical service and repair was developed. The important constituent of quality monitoring is an estimation and choice of technical service and repair technological development production variant and production model's recommendations development. That's the watching system for the dynamics deviations of scientific and technical achievements of enterprise's technique- technological level.

Key words: *quality indexes, transport vehicles.*

Постановка проблеми. Сучасні економічні умови об'єктивно змінюють відносини між споживачами і постачальниками послуг. В умовах гострої конкуренції та обмежень суспільства на характеристики продукції і процесів неминучим й обов'язковим є забезпечення і контроль якості послуг технічного обслуговування та ремонту автомобілів.

Наявні показники якості технічного обслуговування і ремонту вже не можуть бути застосовні для оцінювання якості послуг на сучасних автотранспортних підприємствах, авторемонтних заводах, станціях обслуговування автомобілів. Оскільки не враховують чинник розширення асортименту послуг, форми власності та інші особливості [1].

Це пов'язано і з тим, що якість одночасно є технічною й економічною категорією, залежить від витрат матеріальних і трудових ресурсів. Необхідні ресурси, у свою чергу, залежать від рівня розвитку науки, техніки, технології, забезпеченості матеріальними і енергетичними можливостями країни і від стану навколишнього середовища.

Підвищення якості технічного обслуговування і ремонту автомобілів – один з дієвих способів збільшення продуктивності праці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні є багато досліджень науковців щодо питань якості виконання технічного обслуговування та ремонту автотранспортних засобів. Цією тематикою займаються В. А. Акопов, В. Л. Строєв, Є. С. Кузнєцов, С. М. Мастепан. В їх роботах визначено, що сертифікація і декларування послуг з технічного обслугову-

вання і ремонту автомобілів є сучасним механізмом управління якістю цих послуг (робіт). Ці форми оцінювання відповідності базуються на ринкових відносинах і закріплені законодавчо у сфері вимог безпечної експлуатації автомобілів. Таке оцінювання відповідності не тільки констатує рівень діяльності господарюючого суб'єкта, але і підтверджує отримання заданого результату згодом, зокрема за допомогою інспекційних перевірок [2].

Мета статті. Метою цієї статті є розроблення алгоритму моніторингу показників якості технічного обслуговування та ремонту автомобілів на автотранспортних підприємствах.

Виклад основного матеріалу. Розробленню і дослідженню сучасної системи технічного регулювання ТО і ремонту автомобілів повинні передувати як оцінювання ринку послуг у цілому, так і встановлення початкового стану окремого підприємства сервісу (або їх груп) з метою визначення шляхів розвитку.

Ефективність технічного регулювання залежить від рівня оцінювання відповідності. Отже, аналіз того, як відбувається оцінювання відповідності, є істотним елементом усього процесу. Методи оцінювання відповідності можуть зазвичай включати декларування, випробування і сертифікацію, які виконують із застосуванням різних схем оцінювання [3].

Після формалізації завдання оцінювання відповідності ТО і ремонту вимогам технічного регламенту формується математичний апарат і вибираються правила (критерії) визначення відношення правдоподібності між альтернативами (відповідність і невідповідність) [4].

Як показав огляд, окремі показники якості ТО і ремонту оцінюють результат технологічного процесу, інші – показники забезпечують досягнення цього результату (вхідні параметри). Математичний апарат може бути запозичений з теорії статистичної класифікації (розпізнавання образів). Побудова відповідного алгоритму дозволяє вирішувати завдання сертифікації (або декларування) у *практичному* плані (рис.).

Рис. Функціональна схема процесу моніторингу показників якості технічного обслуговування та ремонту автомобілів

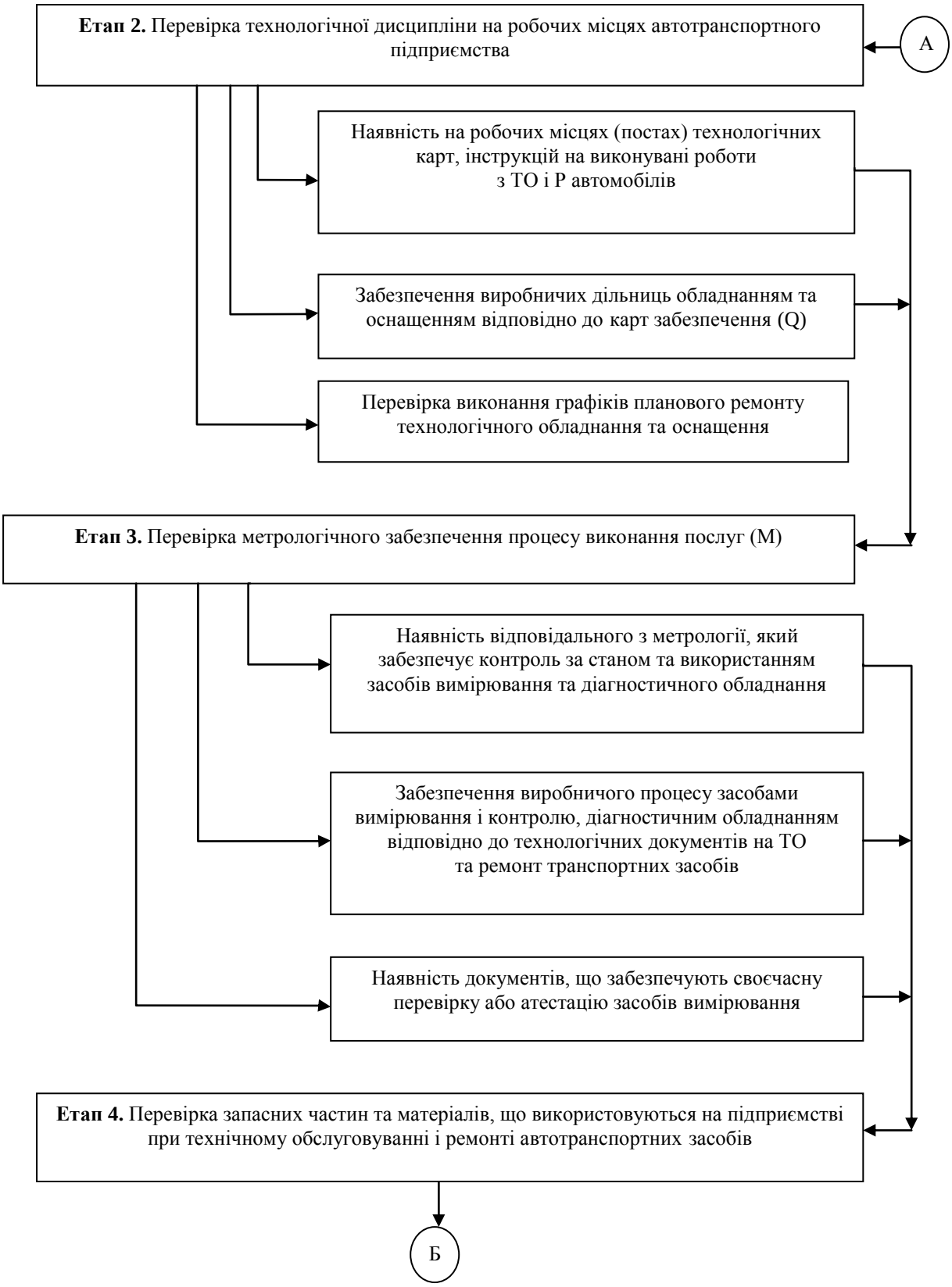


Рис. Продовження (див. також с. 117)

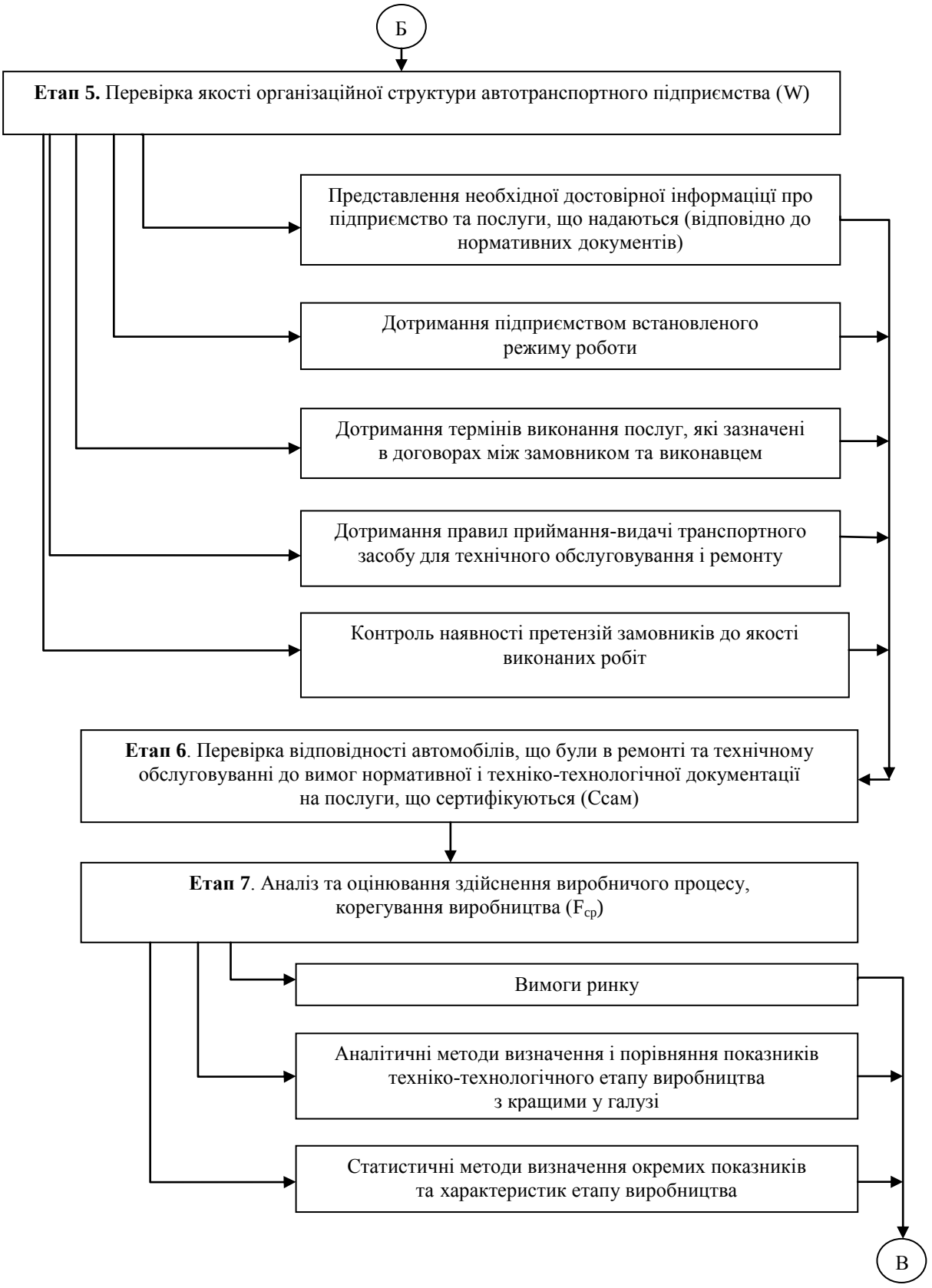


Рис. Продовження (див. також с. 118)

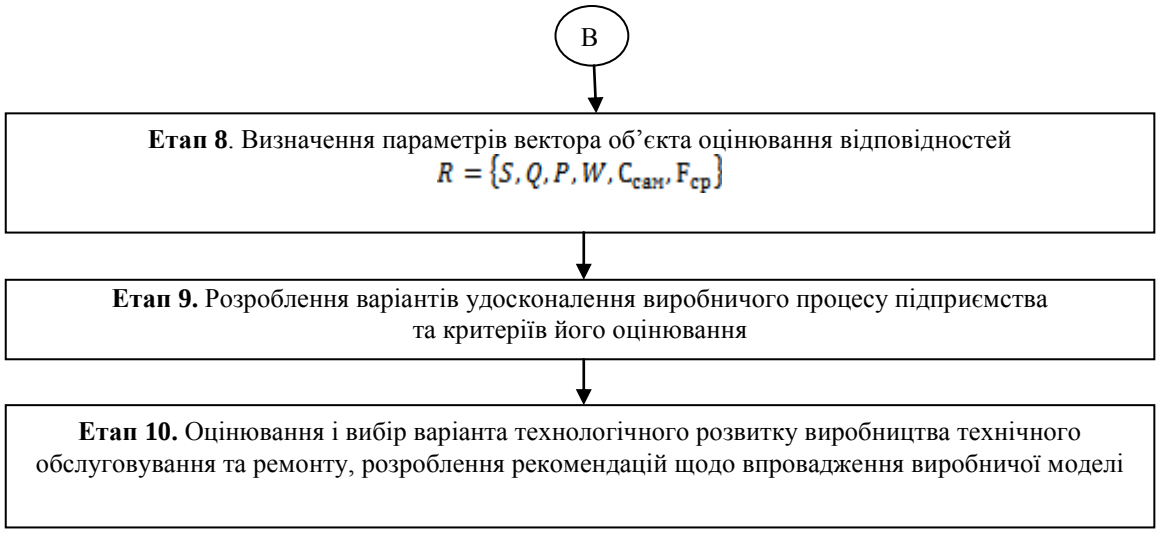


Рис. Закінчення (див. також с. 119)

На основі огляду і вимог системи технічного регулювання висунута гіпотеза про можливість опису об'єкта дослідження (підприємства сервісу) у вигляді наступного вектора $R = \{S, Q, P, D, M, W, T, C_{сам}, F_{ср}\}$,

де характеристиками господарюючого суб'єкта (підприємства сервісу) є забезпеченість виробництва площами (S), устаткуванням (Q) і персоналом (P), необхідною документацією (D), метрологічним забезпеченням (M), матеріальними ресурсами (T), повнота послуг (W), самооцінка (Ссам), параметр виробничого середовища *(Fср)*. Тобто це система спостережень за динамікою відхилень від науково-технічних досягнень техніко-технологічного рівня підприємства.

На основі використання основних положень технічного регулювання розроблена система універсальних показників, необхідних для оцінювання технічного обслуговування та ремонту автомобілів сучасним вимогам. Встановлено, що запропонована система показників має властивості необхідності та достатності для оцінювання стану підприємства з технічного обслуговування та ремонту автомобілів.

Виявлено, що основними напрямленнями підвищення якості робіт з ТО та ремонту автомобілів для АТП та СТО є поліпшення організаційно-технічного забезпечення (показники S, Q, P), стану будівель і споруд та забезпечення техніко-технологічною документацією.

Вказані параметри S, Q, P можна виразити в такому нормалізованому вигляді.

Параметр площі (наявність площ і відповідність їх нормативу):

$$S = \frac{S_ф}{S_н},$$

де $S_ф$ та $S_н$ – відповідно фактичні і нормативні площі підприємства.

Параметр технологічного устаткування (наявність устаткування і відповідність його нормативу, наприклад, табеля оснащення):

$$Q = \frac{Q_ф}{Q_н},$$

де $Q_ф$ і $Q_н$ – відповідно фактична і нормативна чисельність технологічного устаткування на підприємстві.

Параметр персоналу (чисельність персоналу і його розподіл по розрядах):

$$P = \frac{P_ф}{P_н},$$

де $P_ф$ і $P_н$ – відповідно фактична і нормативна чисельність робочого персоналу на підприємстві.

Нормалізовані значення параметрів площі (S), технологічного устаткування (Q) і персоналу (P) зазвичай знаходяться в межах від 0 до 1.

Оцінюванню нормативних значень S, Q, P передує «чорновий» розрахунок виробничої можливості підприємства-заявника, який полягає в наступному.

Підприємство-заявника, як систему масового обслуговування, можна характеризувати годинним потоком послуг л (інтенсивність вхідного потоку), що поступають, і інтенсивністю обслуговування м. Ці характеристики можуть розглядатися для кожної окремо узятої -ої послуги - $л_j$ і $м_j$. Для інтенсивності обслуговування можна записати:

$$\mu_j = \frac{1}{t_j}, \text{ де } t_j = \frac{T_j}{P_j} + t_{дод},$$

де t_j – середній час виконання j-ой послуги (виконання одного замовлення клієнта);

T_j – трудомісткість j-ой послуги, люд/год;

P_j – число одночасно працюючих виконавців j-ой послуги;

$t_{дод}$ – додатковий час, що враховує час установки автомобіля на пост, оформлення документації та інші складові підготовчо-завершального часу виконання послуги. Для спрощення цей час можна не враховувати у формулах, включивши його в значення T_j.

Звідси розрахункова кількість робочих постів (або робочих місць) для виконання j-ой послуги становить

$$n_j \geq \lambda_j / \mu_j = \lambda_j \cdot t_j.$$

Для оцінювання значень P_j можуть використовуватися нормативи технологічного проектування експлуатаційних підприємств.

Значення часу t_j (або трудомісткості T_j) можна розглядати як суму $t_j = \sum_k t_{kj} + t_{jпроч}$, де t_{kj} – час виконання j-ой послуги із застосуванням k-ого устаткування; $t_{jпроч}$ – тривалість інших робіт, зазвичай пов'язаних з ручною працею із застосуванням простого інструменту. Виходячи з цих передумов, можна оцінити нормативні значення параметрів, що використовуються при сертифікації (або декларуванні). При сертифікації (або декларуванні) заявник повинен, крім кількості послуг, вказати кількість робочих постів (робочих місць), на яких він припускає виконувати ці послуги, тобто кількість одночасно виконуваних замовлень клієнтів. Необхідна чисельність персоналу становитиме

$$P_н = \sum_j n_j \cdot P_j^н \text{ люд. або } P_н = \sum_j \lambda_j \cdot t_j,$$

де $P_j^н$ – нормативна кількість одночасно працюючих виконавців під час виконання j-ой послуги. Це значення з нормативів технологічного проектування підприємств ТО і ремонту легкових автомобілів зазвичай приймається рівним 1–2 люд.

Відповідно до затвердженого технологічного змісту послуг складається табель оснащення або матриця технологічного устаткування $\|q_{kj}\|$. У матриці устаткування значення q_{kj} рівні 0 або 1 залежно від необхідності застосування устаткування к-го найменування під час виконання j-ой послуги.

Таким чином для устаткування k-го найменування можна записати співвідношення

$$Q_k = \sum_j n_j q_{kj}.$$

Значення Q_k, що набуває під час підсумовування, вказує кількість послуг, в яких застосовується устаткування к-го найменування.

Для мінімального складу устаткування можна записати Q_{kmin}=1, тобто передбачається, що, наприклад, один стенд k-го найменування використовується для різних послуг, що виконуються на різних робочих постах (робочих місцях).

Менеджмент підприємства-заявника, розглядаючи (залежно від λ_j, μ_j, n_j та інших чинників) питання про фактичну кількість устаткування, зазвичай приймає в межах:

$$1 \le Q_ф^k \le Q_k.$$

Як нормативне значення може прийматися $Q_k^н = \sum_j n_j q_{kj}$ (максимальна потреба в устаткуванні) або $Q_k^н = \frac{1}{j}\sum_j n_j q_{kj}$ закруглене до цілого у більшу сторону, тобто для необхідного обладнання $Q_k^н = 1$ (мінімальна потреба в устаткуванні).

Необхідна площа виробничих приміщень визначається співвідношенням

$$S_н = \sum_j n_j S_м k_n + \sum_k k_{ok} f_k Q_k,$$

де $S_м$ – площа автомобіля в плані; k_n – коефіцієнт щільності розстановки постів (кп = 5–7 залежно від способів розстановки автомобілів на посту).

Встановлено основні закономірності розвитку ТЕ і ремонту автомобілів (за пропонованими параметрами і показниками) в умовах розвитку ринкових відносин з позицій вимог державного технічного регулювання.

Для груп господарюючих суб'єктів ринку послуг з ТЕ і ремонту автомобілів (для ЛТП і СТО) показник самооцінки ($C_{са}$) відрізняється. Для АТП $C_{сам}$ = 0,81; для сервісів $C_{са}$ = 0,97.

Приблизно 89 % СТО мають показник самооцінки в межах 0,9–1,0. Незначна частка СТО (приблизно 5,6 %) мають нижче значення цього показника $C_{сам}$ = 0,5–0,7. 78 % АТП мають показник самооцінки в межах від 0,7 до 1,0. Це свідчить про вищу самооцінку менеджменту СТО.

Висновки і пропозиції. Таким чином, для окремих послуг можливе застосування спрощеної процедури оцінювання відповідності, заснованої на декларації самого підприємства сервісу. Про це говорить високе значення показника самооцінки СТО.

Параметр повноти послуг для СТО має нижчі, ніж у АТП, значення: середні значення відповідно дорівнюють 0,1045 і 0,4526.

Значна кількість СТО (приблизно 67 %) мають повноту послуг до 0,1.

Для АТП і СТО параметра повноти послуг (сервісу), незважаючи на значні числові відмінності, їх характерні якісні залежності схожі. Більшість АТП може виконувати комплексні роботи, а СТО частіше роблять невелику номенклатуру послуг.

Важливою складовою моніторингу якості є оцінювання і вибір варіанта технологічного розвитку виробництва технічного обслуговування та ремонту, розроблення рекомендацій щодо впровадження виробничої моделі.

Підвищення якості технічного обслуговування та ремонту автомобілів може відбуватись тільки при неперервному моніторингу якості окремих процесів виробництва послуг технічного обслуговування і ремонту транспортних засобів та динаміки розвитку науково-технічних досягнень.

Список використаних джерел

1. *Лудченко О. А.* Технічне обслуговування і ремонт автомобілів : підручник / О. А. Лудченко. – К. : Знання-Прес, 2003. – 511 с.

2. *Фомин В. Н.* Сертификация продукции: принципы и их реализация / В. Н. Фомин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Центр экономики и маркетинга, 2001. – 325 с.

3. *Лифиц И. М.* Основы стандартизации, метрологии и сертификации / И. М. Лифиц. – М. : Юрайт, 2000. – 134 с.

4. *Карнаушкин Ю. В.* О роли общетехнических систем стандартов / Ю. В. Карнаушкин // Стандарты и качество. – 2003. – № 10. – С. 38–43.

УДК 678.031 (043.2)

В.В. Ткачук, канд. техн. наук
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

БЕЗПЕЧНІСТЬ БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА

В.В. Ткачук, канд. техн. наук
Луцкий национальный технический университет, г. Луцк, Украина

БЕЗОПАСНОСТЬ БИОДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

Valentyna Tkachuk, PhD in Technical Sciences
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

SAFETY OF BIODIESEL FUEL

Висвітлено необхідність виробництва та споживання біодизельних палив за умов загрозливої сучасної екологічної ситуації навколишнього середовища та вичерпності нафти у світі. Основною перевагою біодизельних палив є їх екологічна чистота та безпечність виробництва та споживання. Найпоширенішими біодизельними паливами на сьогодні є палива на основі ріпакової олії, метилового та етилового спиртів. Розроблено нове біодизельне паливо на основі ріпакової олії та ізопропілового спирту. Таке паливо є безпечнішим за відповідні аналоги.

Ключові слова: *безпечність, якість, біодизельне паливо, експлуатаційні властивості, токсиколого-гігієнічні властивості.*

Освещено необходимость производства и потребления биодизельных топлив в условиях угрожающей современной экологической ситуации окружающей среды и исчерпаемости нефти в мире. Основным преимуществом биодизельных топлив является их экологическая чистота и безопасность производства и потребления. Наиболее распространенными биодизельными топливами сегодня являются топлива на основе рапсового масла, метилового и этилового спиртов. Разработано новое биодизельное топливо на основе рапсового масла и изопропилового спирта. Данное топливо является безопаснее, чем соответствующие аналоги.

Ключевые слова: *безопасность, качество, биодизельное топливо, эксплуатационные свойства, токсиколого-гигиенические свойства.*

The article highlights the need for the production and consumption of biodiesel fuels under conditions of modern ecological situation threatening the environment and exhausting oil sviti.Osnovnoyu advantage of biodiesel fuels is their environmental friendliness and safety of production and consumption. The most common biodiesel is currently the fuel from rapeseed oil methyl and ethyl alcohols. We have developed a new biodiesel from rapeseed oil and isopropyl alcohol. This fuel is safer than the corresponding analogues.

Key words: *safety, quality, biodiesel, operating properties, toxicological and hygienic properties.*

Постановка проблеми. Сучасні галузі промисловості, які використовують палива та мастила, базуються найчастіше на переробці нафти. Проте її ресурси з урахуванням швидкозростаючих темпів споживання є обмеженими. У зв'язку з цим у всьому світі все більше уваги приділяють альтернативним паливам, зокрема біодизельним.

З 1991 року почалося індустріальне виробництво біодизельного палива: якщо в 2000 р. обсяги виробництва становили 949 млн літрів, то в 2003 р. – 1768. Біодизельне паливо виробляється з рослинних олій (в основному, із сої, ріпаку, гірчиці, олійної пальми), тваринних жирів і навіть харчових відходів (наприклад, рослинної олії, відпрацьованої підприємствами харчової промисловості) і за своїми фізико-хімічними властивостями не поступається звичайному дизельному паливу (табл.). В агрокліматичних умовах України найбільш раціональним є використання ріпаку для виробництва такого біопалива.

Таблиця

Фізико-хімічні показники біодизельного палива у порівнянні з мінеральним

Фізико-хімічний показник	Біодизельне паливо	Мінеральне дизельне паливо
1	2	3
Вміст гліцерину, %	0,3	–
Цетанове число, %	48	не нижче 45
Кінематична в'язкість при 20 °С, $мм^2/с$	8,0	3,83
Густина при 20 °С, $кг/м^3$	877	826
Температура застигання, °С	-8	-10
Температура спалаху, °С	56	60

Закінчення табл.

1	2	3
Теплотворна здатність, кДж/кг	43000	37000
Коксування, %	0,3	0,5
Зольність, %	0,02	0,02
Вміст механічних домішок	відсутній	відсутній
Вміст води, %	відсутній	відсутній
Масова частка сірки, %	0,02	0,2

За даними Національної біодизельної ради (NATIONAL BIODIESEL BOARD), біодизельне паливо на 5 % більш економічне та на 5 % більш енергоємне, ніж традиційне. Найбільшим виробником біодизельного палива нині є Європа – у 2003 році виробництво цього енергоносія виросло на 43 % у порівнянні з рівнем 2001 року. Біодизельне паливо може використовуватися для заправлення дизельних автомобілів як у чистому вигляді (у США для позначення цього виду палива звичайно використовується назва В 100), так і в розведеному традиційним дизельним паливом (найбільш популярна в США суміш В 20, що складається з 20 % біодизельного палива і 80 % традиційного) [1].

Проте поширене у світі біодизельне паливо виробляється на основі метилового спирту, який є отрутою і становить значну небезпеку у разі використання людиною. Нами запропоновано виробляти біопаливо на основі нешкідливого ізопропілового спирту. Зразки такого палива були отримані на базі лабораторії з дослідної роботи НПК «Галичина», що у м. Дрогобич.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Така проблематика активно розглядається у працях В. Дубровіна, О. Осетрова, О. Лінькова, Б. Бугая та інших. Вони наголошують на гострій необхідності виробництва біопалив, розвитку наукових досліджень у цьому напрямку, розробленні нормативної-технічної бази тощо.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Проте поза увагою залишається те, що до складу традиційного біодизельного палива входить токсичний компонент – метиловий спирт, який можна замінити на інший, нешкідливий для здоров'я людини. Вирішення такого завдання і стало метою написання цієї статті.

Мета статті. Оскільки екологічна ситуація в Україні та у світі вже набуває загрозливих обрисів, потрібно, щоб використовувані палива були якомога чистішими та безпечними у разі використання людиною, адже життя та здоров'я людини є найважливішою цінністю держави.

Виходячи з вищевикладеного та враховуючи необхідність виробництва біодизельного палива в сучасних умовах, цілями цієї публікації є токсиколого-гігієнічні дослідження нового ізопропілестерного біопалива, а, отже, його безпечності. Адже безпечність є найважливішою споживчою властивістю палив, зокрема і біодизельного палива.

Виклад основного матеріалу. Токсикологічні експерименти виконувались на чотирьох видах лабораторних тварин: нелінійних щурах, мишах, морських свинках та кролях, які утримувались в умовах віварію Львівського національного медичного університету на стандартному харчовому раціоні згідно з правилами "належної лабораторної практики" (GLP) з дотриманням загальних етичних принципів експериментів на тваринах, ухвалених Першим національним конгресом з білетики (Київ, 2000 р.). Під час встановлення параметрів токсикометрії біодизельного палива до досліду залучалася кількість тварин, яка забезпечувала статистично достовірні результати експерименту за допомогою складання ранжируваних рядів за вихідною масою тіла.

Токсиколого-гігієнічне оцінювання біодизельного палива на основі ізопропілових естерів ріпакової олії включала визначення гострої інгаляційної, преоральної та перкутанної токсичності, місцево-подразнювальної й алергенної дії, кумулятивного ефекту.

Оцінювання гострої пероральної та інгаляційної токсичності здійснювали згідно з ”Методическими указаниями к постановке исследований для обоснования санитарных вредных веществ в воздухе рабочей зоны“.

При дослідженнях місцево-подразнювальної, іритативної та шкірно-резорбтивної дій керувалися методичними вказівками ”Оценка воздействия вредных химических соединений на кожные покровы и обоснование предельно допустимых уровней загрязнения кожи“ та ”Методическими указаниями к постановке исследований по изучению раздражающих свойств и обоснованию предельно допустимых концентраций избирательно действующих раздражающих веществ в воздухе рабочей зоны“.

Оцінювання місцево-подразнювальної та резорбтивно-токсичної дії на шкіру проводили на білих щурах. З цією метою хвости тварин на чотири години занурювали у досліджуваний препарат і реєстрували токсичні ефекти: загибель та клінічні прояви інтоксикації [2].

У разі відсутності ефекту при однократному впливові проводили досліди з десятикратним занурюванням. Ознаки подразнення шкіри (ерітема, набряк, наявність тріщин, виразок, крововиливів) виявляли візуально.

Вивчення алергенних властивостей препаратів проводили при епікутанному шляху нанесення відповідно з методичними вказівками. Як сенсибілізуюча, використовувалась доза 200 мкг препарату в 0,02 мл розчинника (етиловий спирт), яку вводили в шкіру зовнішньої поверхні вуха морської свинки.

Через 14 діб наносили роздільно здатну дозу, яка перевищувала сенсибілізуючу в 2 рази. Спостереження проводились через 4, 24, 48 годин. Реакцію враховували за сумою середніх діаметрів ерітеми, інфільтрата або набряку. Імунологічні тести включали реакцію специфічної агломерації лейкоцитів (РСАЛ) і реакцію специфічного лізіса лейкоцитів (РСЛЛ).

Кумулятивну активність оцінювали за величиною коефіцієнта кумуляції ($К_{cum}$), встановленого в тесті ”субхронічної токсичності“ за методикою Ліма і співавторів. Препарат вводили білим щурам щоденно через рівні проміжки часу в наростаючих дозах протягом 24±4 доби [3].

Розрахунок коефіцієнта кумуляції проводили за формулою:

$$К_{cum} = \sum DL_{50}^{n} \ \Big/ DL_{50}^{1},$$

де $\sum DL_{50}^{n}$ – сумарна середньосмертельна доза речовини при багаторазовому введенні;

DL_{50}^{1} – середньосмертельна доза речовини при однократному введенні;

$К_{cum}$ – коефіцієнт кумуляції.

Перші чотири доби тварини отримували по 0,1 DL_{50}, 5-8 доба – 0,15 DL, 9-12 доба – 0,22 DL_{50}, 13-16 доба – 0,34 DL_{50}, 17-20 доба – 0,5 DL_{50}, 21-24доба – 0,75 DL_{50}, найвища доза, яку вводили на 25-28 добу, – 1,12 DL_{50}. Сумарна доза за 28 діб становила 12,8 DL_{50}.

Результатами токсикологічних досліджень нового біодизельного палива на основі ізопропілових естерів ріпакової олії встановлено, що в умовах виробництва біодизельного палива в повітрі робочої зони можливе надходження парів спирту ізопропілового (ГДК 10 мг/м^3, 3 клас небезпеки, ГОСТ 12.1.005 – 88) та аерозолю калію гідроксиду (ГДК 0,5 мг/м^3, 2 клас небезпеки, ГОСТ 12.1.005 – 88) [4; 5].

В умовах застосування нового біодизельного палива в повітря робочої зони можливе надходження парів спирту ізопропілового, а також можливе забруднення спецодягу, шкіри і потрапляння препарату на слизові оболонки.

Щодо токсичності нового біодизельного палива на основі ізопропілових естерів ріпакової олії, то 2-годинне статичне інгаляційне затруєння білих мишей парами летких

компонентів, які виділялись з препарату за нормальних умов, загибелі тварин не викликало. Через 15 хвилин від початку досліду у тварин розвивалась клінічна картина гострого інгаляційного отруєння, в якій спостерігались симптоми ураження центральної нервової системи та подразнюючої дії. Короткочасне збудження з підвищеною вертикальною активністю змінювалось адинамією з хиткою ходою, тварини залягали на живіт, дихання ставало частим. Стан тварин нормалізувався через 24 години після закінчення експерименту.

Преоральне введення нового біодизельного палива білим щурам і білим мишам у дозах від 6000 мг/кг загибелі тварин не викликало. Після введення спостерігалось зниження рухової активності. Стан тварин нормалізувався впродовж 24 годин після введення (4 клас небезпеки згідно з ГОСТ 12.1.007 – 76).

Одно- та 10-кратне занурювання хвостів білих щурів у нове біодизельне паливо (час експозиції 4 години) загибелі тварин не викликало, однак спостерігались ознаки шкірно-резорбтивної дії: тварини збуджені, хаотично пересуваються по клітці, надмірно споживають воду, інтенсивно труть лапками мордочки.

Під час нанесення на шкіру спостерігались такі місцеві реакції:

– на шкіру: зі сторони шкірних покривів спостерігалася гіперемія (1 бал);

– в око: внесення 1 краплі продукту в кон'юктивальний мішок ока кролика викликало гіперемію – 1 бал, виділення – 1 бал, набряк – 1 бал.

Коефіцієнт кумуляції за показником "загибель тварин" встановлений у тесті субхронічної токсичності за методикою Ліма та співавторів становить 12,8, що говорить про слабку кумулятивну активність [6].

Таким чином, складні ефіри жирних кислот ріпакової олії мають слабкі подразнюючі властивості. Внаслідок високого коефіцієнта розподілу парів накопичення в організмі до значних концентрацій проходить повільно і проявляється слабким наркотичним ефектом. Небезпека гострих отруєнь незначна. Ізопропіловий спирт приблизно у два рази є токсичнішим за етанол і має сильнішу нейротоксичну дію, оскільки метаболізує набагато повільніше, головним чином до ацетону, і меншою мірою – до ізопопілглюкуронілу [7]. Екскреція ацетону з сечею є інформативним показником впливу парів ізопропілового спирту. Ізопропіловий спирт, як і інші спирти цього ряду, здатні чинити окулотоксичну дію, яка розвивається внаслідок набряку сітківки та наступної атрофії зорового нерву і клінічно проявляється пониженням гостроти зору [8].

Висновки і пропозиції. Отже, на основі проведених токсиколого-гігієнічних досліджень можна зробити висновок, що нове біодизельне паливо на основі ізопропілових естерів ріпакової олії при інгаляційному впливі належить до 3 класу небезпеки, при введенні до шлунку – до 4 класу, при нанесенні на шкіру – до 4 класу [9].

У разі його застосування варто дотримуватися елементарних вимог безпеки, а саме використовувати засоби захисту органів дихання, шкірних покривів (захисний спецодяг) та очей (захисні окуляри).

Провівши токсиколого-гігієнічне оцінювання, встановлено, що нове біодизельне паливо на основі ріпакової олії та ізопропілового спирту відповідає вимогам санітарного законодавства України за показниками безпечності для здоров'я людини.

Отже, таке біопаливо має позитивний висновок та може бути рекомендоване для виробництва та використання людиною.

Список використаних джерел

1. *Кустовська А. Д.* Альтернативні палива : навчально-методичний посібник / А. Д. Кустовська, С. В. Іванов, О. І. Косенко. – К. : НАУ, 2007. – 268 с.

2. *Методические* указания к постановке исследований для обоснования санитарных стандартов вредных веществ в воздухе рабочей зоны : утв. МЗ СССР 01.08.1979, № 2163–80. – М., 1980. – 20 с.

3. *Оценка* воздействия вредных химических соединений на кожные покровы и обоснование предельно допустимых уровней загрязнения кожи (методические указания) : утв. МЗ СССР 01.11.1979, № 2102–79. – М., 1980. – 22 с.

4. *Методические* указания к постановке исследований по изучению раздражающих свойств и обоснованию предельно допустимых концентраций избирательно действующих раздражающих веществ в воздухе рабочей зоны : утв. зам. гл. гос. сан. врача СССР 11.08.1980, № 2196 – 80. – М., 1980. – 18 с.

5. *Требования* к постановке экспериментальных исследований по обоснованию предельно допустимых концентраций промышленных химических алергеннов в воздухе рабочей зоны и атмосферы : утв. перв. зам. председателя госсанэпиднадзора России – зам. гл. гос. сан. врача Российской Федерации 21.10.96. – М., 1997. – 24 с.

6. *Lim R. K.* Method for evaluation of cumulation and tolerance by determination of acute and cubchronics median effective doses / R. K. Lim, K. G. Rink, H. G. Glass // Arch. int. Pharmacodym. Therap. – 1961. – Vol. 130. – P. 336–352.

7. *Вредные* вещества в промышленности : справочник : в 2 т. Т. II ; под ред. Н. В. Лазарева, Э. Н. Левиной. – Л., 1976. – С. 143–144.

8. *Вредные* вещества в промышленности : справочник : в 2 т. Т. I. ; под ред. Н. В. Лазарева, Э. Н. Левиной. – Л., 1976. – С. 371–372.

9. *Токсиколого-гігієнічний* паспорт № 6140 біодизельного палива на основі ізопропілових естерів ріпакової олії / Науково-дослідний «Центр профілактичної і клінічної токсикології». – Львів. – 2007. – 4 с.

УДК 621.923.42

Г.А. Веремей, ст. преподаватель
Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЕДЛА КЛАПАНА В ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОМ МЕХАНИЗМЕ

Г.О. Веремей, ст. викладач
Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ПОВЕРХОНЬ СІДЛА КЛАПАНА У ГАЗОРОЗПОДІЛЬНОМУ МЕХАНІЗМІ

Hennadii Veremei, senior teacher
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

THE MATHEMATICAL MODEL OF FORMATION OF THE OVERHAULED VALVE-SEAT SURFACES IN THE VALVE TIMING GEAR

Рассмотрены аналитические методы при моделировании геометрии восстанавливаемых поверхностей седла клапана в газораспределительном механизме двигателя внутреннего сгорания. Предложена математическая модель для анализа состояния рабочих изношенных поверхностей седла клапана, подлежащих обработке, с целью формирования их параметров качества при восстановительных ремонтах.

Ключевые слова: *формообразующие параметры, поверхность переменного профиля, интерполяционная схема, трехмерный анализ, двухмерный анализ, численные методы.*

Розглянуто аналітичні методи під час моделювання геометрії відновлюваних поверхонь сідла клапана у газорозподільному механізмі двигуна внутрішнього згоряння. Запропонована математична модель для аналізу стану робочих зношених поверхонь сідла клапана, які підлягають обробленню, з метою формування їх параметрів якості під час ремонтів щодо відновлення.

Ключові слова: *формоутворюючі параметри, поверхня змінного профілю, інтерполяційна схема, тривимірний аналіз, двомірний аналіз, численні методи.*

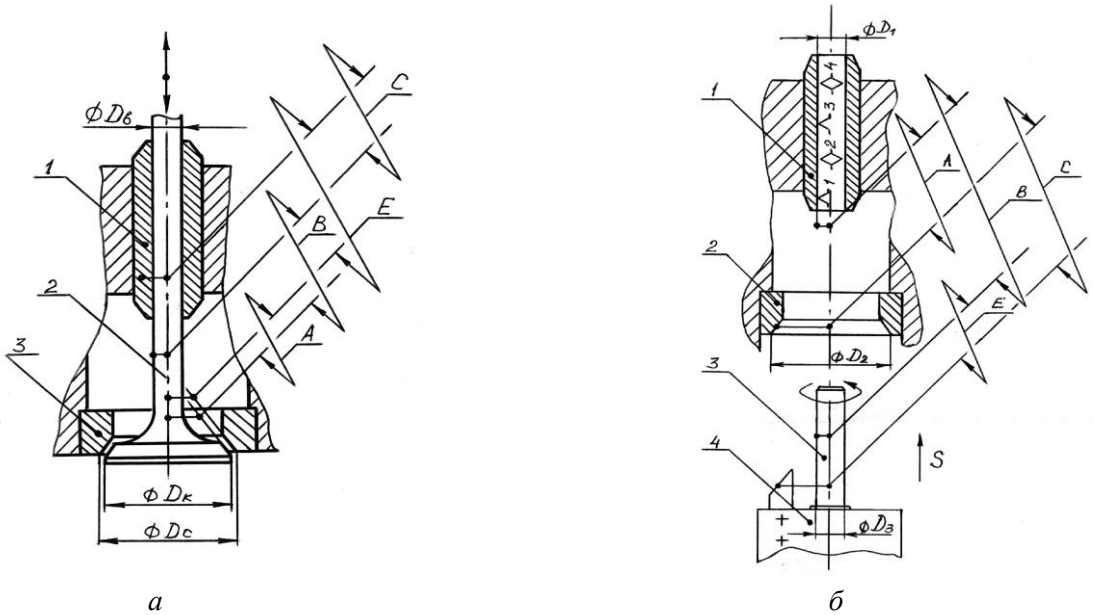
The analytical methods within geometry modelling of the overhauled valve-seat surfaces in the valve timing gear have been considered. The mathematical model to analyze the state of the working valve-seat surfaces under the wear and which are a subject to be processing for the purpose to form their parameters of quality within overhauled repairing.

Key words: *the forming parameters, the surface of the variable profile, the interpolated scheme, three-dimensional analysis, two-dimensional analysis, the numerical methods.*

Постановка проблемы. В газораспределительных механизмах (ГРМ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) качество сопряжения «клапан-седло» формируется следующими параметрами точности: концентричностью поверхностей $D_к$ и D_c и их соосностью (параметр *А*) (рис. 1, *а*). В свою очередь, параметр *А* формируется следующими: соосностью тарелки клапана и его стержня (параметр *В*), соосностью стержня клапана и цилиндрического отверстия $D_в$ (параметр С), соосностью фаски седла D_c и отверстия $D_в$ (параметр *Е*).

Одним из альтернативных методов обеспечения параметров качества седла клапана является лезвийный метод растачивания конических поверхностей профильным резцом с тремя режущими кромками, копирующими угол наклона обрабатываемых поверхностей. При этом техпроцесс выполняется по схеме (рис. 1, *б*) и состоит из двух основных операций – базирования пилота *3* по отверстию D_1 направляющей втулки *1* и операции формообразования рабочей поверхности седла клапана D_2. Качество обработки при этом формируется параметрами точности: *А, В, С, Е.*

Конечными звеньями данной формообразующей системы (ФС) в процессе обработки являются режущий инструмент и обрабатываемая деталь. С точки зрения моделирования ФС совокупность формообразующих точек инструмента и обрабатываемой поверхности должны иметь определенное математическое представление, которое необходимо для обеспечения результата обработки в соответствии с заданными параметрами точности.



а *б*

Рис. 1. Параметры точности: а – сопряжения поверхностей «втулка-клапан-седло»: 1 – направляющая втулка, 2 – клапан, 3 – седло клапана; б – в схеме обработки по направляющему пилоту: 1 – направляющая втулка, 2 – седло клапана, 3 – пилот, 4 – режущий инструмент

Особенностью рассматриваемой детали является то, что она имеет пространственно-сложную форму топографического характера – как соединение трех фасок с разной степенью износа, которые только в первом приближении (из-за неровностей) повторяют форму усеченных конусов. После обработки все фаски седла должны с заданными допусками получить коническую форму с точки зрения концентричности поперечных сечений и углов наклона каждого из трех конусов, а также иметь заданную величину шероховатости.

Анализ исследований и публикаций. Способы моделирования сложных нерегулярных поверхностей многообразны. Наиболее часто используемыми в машиностроении являются: графические, численные и аналитические.

Графические методы моделирования дают возможность исследовать поверхности посредством их визуализации в проекциях (эскизы, профили, сечения, каркасы и т. д.). Дальнейшее оперирование с такими моделями (математические преобразования, вычисление площадей, объемов, других показателей) может требовать применения дополнительных методов.

Численные модели с табличной формой представления данных о поверхности используются широко, особенно при компьютерной обработке информации (AutoCAD, MathCAD, MatLab и др.). Такие модели базируются на дискретных точках и позволяют, кроме вычислительных процедур, осуществлять графические преобразования и строить графики разных видов, однако для детального анализа сложного рельефа поверхности требуется аппроксимация данных на массивах большой размерности.

Наиболее универсальным способом моделирования пространственно-сложных объектов является аналитический, когда поверхность задается в виде функции. Такая модель имеет ряд преимуществ, поскольку позволяет получать 3D-модели (путем табулирования и ввода в компьютерные базы данных), а также применять для расчетного анализа математические и машинные методы (особенно матричные функции).

Цель статьи. Разработка модели обрабатываемой поверхности в аналитической форме, что даст возможность включить ее в формообразующую систему, использовать для настройки формообразующих параметров и перед обработкой детали, и для исследования качества обработанной поверхности.

Изложение основного материала. Общая схема обработки изношенного седла клапана с описанием конструктивно-геометрических параметров инструмента и приспособления, влияющего на качество обработки, представлены в работах [5; 2].

Для описания поверхности изношенного седла клапана предлагается [8; 9] использовать пространственное уравнение в явной форме $z = f(x, y)$. При этом аналитическая модель поверхности строится в виде обобщенного полинома

$$Q(x, y) = \sum_{k=1}^{n} c_k \cdot \varphi_k(x, y), \tag{1}$$

где $c_1, c_2, .. c_n$ – коэффициенты, подлежащие определению; $\varphi_1(x, y), .. \varphi_n(x, y)$ – система базисных функций из некоторого функционального пространства, удовлетворяющая необходимым условиям непрерывности и гладкости.

Для более точной настройки модели будем использовать интерполяционную схему, когда функция $z = f(x, y)$ и полином $Q(x, y)$ совпадают на заданной системе точек в области S (как круговом кольце с внешним и внутренним радиусами седла клапана):

$$Q(x_i, y_i) = f(x_i, y_i) = z_i, \; i = 1, \ldots n. \tag{2}$$

Систему точек для построения обобщенного полинома можно задавать путем снятия профилограмм и их оцифровки с шагом, необходимым для учета неровностей обрабатываемой поверхности. Чем больше точек области S будет использовано для моделирования, тем более качественной будет модель.

Неизвестные параметры $c_1, c_2, .. c_n$ модели находятся из системы линейных уравнений [1]:

$$z_i = \sum_{k=1}^{n} c_k \cdot \varphi_k(x_i, y_i), \; i = 1, \ldots n, \tag{3}$$

где (x_i, y_i, z_i) – исходные точки обрабатываемой поверхности из области S.

Система (3) имеет единственное решение, когда ее определитель не нулевой:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \varphi_1(x_1, y_1) & \varphi_2(x_1, y_1) & \dots & \varphi_n(x_1, y_1) \\ \varphi_1(x_2, y_2) & \varphi_2(x_2, y_2) & \dots & \varphi_n(x_2, y_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_1(x_n, y_n) & \varphi_2(x_n, y_n) & \dots & \varphi_n(x_n, y_n) \end{vmatrix} \neq 0. \quad (4)$$

Чтобы модель максимально учитывала особенности обрабатываемой поверхности, систему базисных функций необходимо подобрать таким образом, чтобы они в точности описывали процесс, приведший к износу седла клапана. В рамках данной темы поиск таких функций (в виде краевой задачи математической физики) не предусматривается. Поэтому с учетом топографических особенностей обрабатываемой детали [8; 9] в качестве базисных предлагается использовать функции (квадрики), применяемые для описания нерегулярных поверхностей и обеспечивающие выполнение условия (4):

$$\varphi_k(x, y) = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + A_\varphi}, \quad (5)$$

где A_φ – параметр, который влияет на кривизну моделируемой поверхности и может быть задан как экспериментально обоснованная константа *($A_\varphi \geq 0$).*

Вычисление определителя (4) и решение системы линейных уравнений (3) осуществляются с помощью матричных функций системы MathCAD [4].

Пространственная модель (1) может быть использована для дальнейшего трехмерного анализа степени износа седла и настройки параметров перед обработкой поверхности. Для этого можно исследовать экстремумы (минимумы и максимумы) исходной поверхности для каждой из фасок *(A, B, C)* по точкам *(x,y)* $\in$ *S*:

$$Q_{\min}^{A,B,C} = \min \left\{ Q(x_i, y_i) \right\}, \; Q_{\max}^{A,B,C} = \max \left\{ Q(x_i, y_i) \right\}, \; i = 1, \dots n. \quad (6)$$

На найденных точках минимума (x_j, y_j) ($j = 1, \dots k$) для каждой фаски можно вычислить значения $Z_{\min}^{A,B,C}$ базовой обработанной поверхности из общего уравнения прямого кругового конуса

$$Z_{\min}^{A,B,C} = \min \left\{ Z(x_i, y_i) \right\}, \; Z(x, y) = p \cdot \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (7)$$

где p – параметр, определяемый для каждой из фасок (рис. 1, *а*), исходя из стандартов формообразующих параметров готового седла клапана:

$$p_A = \frac{(R_1 - R_0) \cdot tg\alpha_1}{R_1}, \quad p_B = \frac{(R_2 - R_1) \cdot tg\alpha_2}{R_1}, \quad p_C = \frac{(R_3 - R_2) \cdot tg\alpha_3}{R_2}. \quad (8)$$

Решение о возможности и целесообразности обработки детали может быть принято при обнаружении более глубоких, чем $Z_{\min}^{A,B,C}$, впадин на исходной поверхности хотя бы для одной из фасок седла (A, B, C), т. е. когда

$$Q_{\min}^{A,B,C} < Z_{\min}^{A,B,C}. \quad (9)$$

Если изношенное седло пригодно для обработки, то может быть определено максимальное отклонение пиков и впадин по всей обрабатываемой поверхности (1):

$$\Delta_{\max}^{Q} = \max_{A,B,C} \left\{ Q_{\max}^{A,B,C} - Q_{\min}^{A,B,C} \right\}, \quad (10)$$

что позволяет подобрать оптимальный общий припуск на обработку, когда базовая поверхность соприкасается с обрабатываемой (чтобы не срезать лишний материал):

$$Z_{общ} = \Delta_{\max}^{Q}. \quad (11)$$

Трехмерный анализ дает возможность с высокой степенью точности контролировать параметры шероховатости, поскольку на любых точках заданной области *S* можно определить функцию отклонения $r(x, y)$ обрабатываемой поверхности (1) от базовой (7):

$$r(x, y) = Q(x, y) - Z(x, y). \quad (12)$$

Тогда средняя R_a и среднеквадратическая R_q шероховатости в соответствии со стандартами ISO-4287 [3] могут рассчитываться в аналитическом виде:

$$R_a = \frac{1}{S}\iint_S |r(x, y)|dxdy,\ R_q = \sqrt{\frac{1}{S}\iint_S r^2(x, y)dxdy}. \quad (13)$$

Двухмерный анализ предполагает использование сечений, получаемых пересечением 3D-модели обрабатываемой поверхности заданными плоскостями. В общем случае за секущую можно принять плоскость общего положения, тогда линия пересечения ее с поверхностью (1) определяется системой уравнений

$$\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0 \\ z = Q(x, y). \end{cases} \quad (14)$$

Решение системы (14) возможно с помощью любого из численных [1] методов (итераций, метод Ньютона и др.), однако более эффективным, с точки зрения компьютерной реализации, является переход от алгебраической задачи к дифференциальной [7]. Для этого систему можно привести к одному нелинейному уравнению

$$F(x, y) = A_1x + B_1y + C_1Q(x, y) + D_1 = 0, \quad (15)$$

где функция линии пересечения *y(x)* содержится в неявном виде, а ее производная имеет вид

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{F'_x(x, y)}{F'_y(x, y)} = \Phi(x, y). \quad (16)$$

Задав начальное приближение для искомой линии в неявном виде ($y_0 = y(x_0)$, $z_0 = z(x_0)$) и используя для численного решения (15) метод Рунге-Кутта [4], имеем уравнение кривой в пространстве

$$\begin{cases} y = y(x) \\ z = z(x). \end{cases} \quad (17)$$

Если в системе (14) применять вертикальные секущие плоскости, проходящие через ось *Oz* (когда $C_1 = D_1 = 0$), можно строить семейство плоских кривых (17) вида $z = z(x)$ в координатах профиля и использовать их для контроля конусности зоны резания. Построив на *j*-том шаге обработки (рис. 2, *б*) по точкам данной кривой $z_i = z(x_i)$ (*i=1,…n)* линейную регрессию [4] для каждой из фасок (A, B, C), можно получить уравнение прямой:

$$z^{A,B,C}(x) = x \cdot tg\alpha^{A,B,C} + b^{A,B,C}, \quad (18)$$

где $tg\alpha^{A,B,C}$ – угловой коэффициент прямой.

Тогда через определение погрешности в углах наклона построенной и базовой прямой можно оценить отклонения зоны резания от конусности для каждой из фасок седла на *j*-том шаге обработки:

$$\Delta\alpha^{A,B,C} = arctq(tg\alpha^{A,B,C}) - \alpha_{1,2,3}. \quad (19)$$

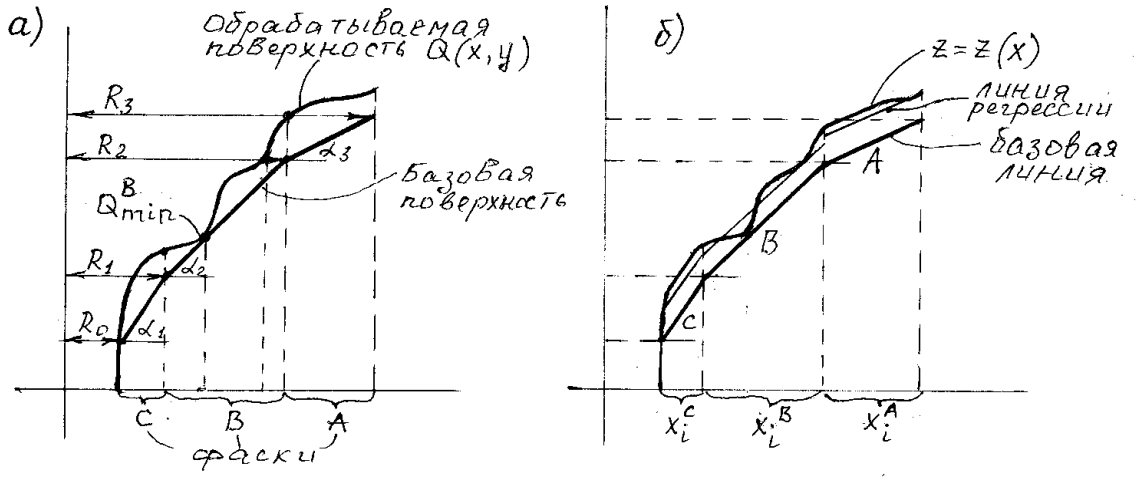


Рис. 2. Профиль обрабатываемой поверхности: а – перед обработкой; б – на j-том шаге обработки

Для анализа концентричности (округлости) фасок в первом уравнении системы (14) используется горизонтальная плоскость ($A_1 = B_1 = 0$, $z = const$), что позволяет построить в координатах профиля семейство плоских кривых вида $y = y(x)$. Каждая такая плоская кривая может быть исследована на округлость путем расчета отклонений точек кривой от базовой окружности (например, через построение нелинейной регрессии [4]). Однако, если в процессе обработки расчетная среднеквадратическая погрешность практически не меняется, установить причины, используя такой метод, сложнее. Поэтому предлагается использовать фрагментарный подход – через построение вспомогательных окружностей (внутренней и внешней), описанных около треугольников.

Для этого (путем перебора или с помощью функций [4]) выбираются три точки наиболее близко расположенные от начала координат $O(x_0, y_0)$ (базового центра) и три максимально удаленные от $O(x_0, y_0)$ точки (рис. 3, *а*). Через близлежащие точки $A_m(x_1^m, y_1^m)$, $B_m(x_2^m, y_2^m)$, $C_m(x_3^m, y_3^m)$ строится внутренняя описанная окружность, через более удаленные точки $A_M(x_1^M, y_1^M)$, $B_M(x_2^M, y_2^M)$, $C_M(x_3^M, y_3^M)$ – внешняя описанная окружность.

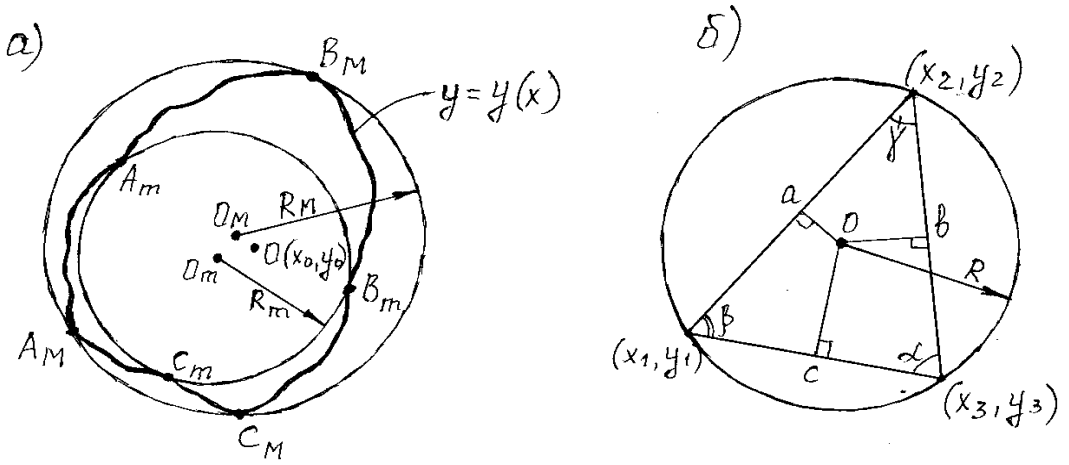


Рис. 3. Схема построения описанных окружностей:
а – выбор характерных точек; б – определение радиуса

Для вычисления внешнего R_M и внутреннего R_m радиусов описанных окружностей можно использовать теоремы синусов и косинусов для треугольников, составленных из выбранных точек [1]. Для треугольника (рис. 3, *б*) формулы имеют вид:

$$R = \frac{c}{\sqrt{1-\cos^2\gamma}}, \tag{20}$$

где $a = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$; $b = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}$; $c = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}$;

$\cos\gamma = \dfrac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}$.

Тогда расчет радиального разброса

$$\Delta R = R_M - R_m \tag{21}$$

позволяет оценить степень подобия кривой $y = y(x)$ на окружность. На начальной стадии обработки такой разброс в радиусах может быть значительным из-за топографических особенностей обрабатываемой поверхности, на завершающем же этапе R_M и R_m должны по допуску соответствовать радиусу фаски. Если ΔR не уменьшается и в конце обработки, причиной этому может быть биение шпинделя, что нарушает округлость фасок седла, приводит к волнистости и даже овальности зоны резания (с полуосями, образованными малым R_m и большим R_M).

Поэтому в процессе обработки необходимо анализировать не только изменения в радиусах, но и перемещение центров внешней и внутренней описанных окружностей (и между собой, и по отношению к базовому центру).

Центр описанной около треугольника окружности является точкой пересечения серединных перпендикуляров к его сторонам (рис. 3, *б*). Для расчета координат центра можно использовать систему линейных уравнений вида:

$$\begin{cases} (x_1 - x_2)(x - \dfrac{x_1 + x_2}{2}) + (y_1 - y_2)(y - \dfrac{y_1 + y_2}{2}) = 0 \\ (x_2 - x_3)(x - \dfrac{x_2 + x_3}{2}) + (y_2 - y_3)(y - \dfrac{y_2 + y_3}{2}) = 0 \end{cases}, \tag{22}$$

решение которой даст возможность вычислить координаты центров внешней $O_M(x_M, y_M)$ и внутренней $O_m(x_m, y_m)$ окружностей.

Тогда расчет максимального отклонения полученных центров O_M или O_m от базового $O(x_0, y_0)$ позволит оценить степень несоосности систем координат при обработке седла клапана.

Выводы. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что предложенная модель может быть включена (через матричные приложения) в состав формообразующей системы «станок-приспособление-инструмент-деталь» в технологическом процессе обработки изношенного седла клапана методом копирования с использованием лезвийного инструмента профильного типа. Это позволит, используя методы компьютерного анализа и оптимизации, контролировать изменения параметров формообразования и качество обработки в экспериментальной части проведения исследований.

Список использованных источников

1. *Бронштейн И. Н.* Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1981. – 720 с.

2. *Веремей Г. А.* Методы повышения качества поверхностей сопряжения деталей в двигателях внутреннего сгорания / Г. А. Веремей // Вісник Чернігівського державного технологічного університету : збірник. – Чернігів : ЧДТУ, 2011. – № 3 (51). – С. 79–83.

3. *Допуски* и посадки : справочник / под ред. В. Д. Мягкова. – Л. : Машиностроение, 1982. – Ч. 2. – 447 с.

4. *Дьяконов В.* MATHCAD 8/2000 : специальный справочник / В. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2000. – 592с.

5. *Кальченко В. И.* Технологические методы достижения точности сопряжения «клапан-седло» в двигателе внутреннего сгорания / В. И. Кальченко, В. В. Кальченко, Г. А. Веремей // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2011. – Вип. 121/2011. – С. 18–21.

6. *Решетов Д. Н.* Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М. : Машиностроение, 1986. – 336 с.

7. *Турчак Л. И.* Основы численных методов : учебное пособие / Л. И. Турчак. – М. : Наука, 1987. – 320 с.

8. *Carlson R. E.,* Foley T. A. The parameter R^2 in multiquadric interpolations. Comp. Math. Applic. – 1991. – 21 (9). – P. 29–42.

9. *Hardy R. L.* Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. J. Geoph. Res., 76 (1971), P. 1905–1915.

УДК 621.9.2

І.А. Бойко, магістр
В.В. Солоха, канд. техн. наук
Л.Й. Івщенко, д-р техн. наук
Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна

ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПОВОРОТНОГО СТОЛА 5-КООРДИНАТНОГО ОБРОБНОГО ЦЕНТРУ

И.А. Бойко, магистр
В.В. Солоха, канд. техн. наук
Л.Й. Ивщенко, д-р техн. наук
Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВОРОТНОГО СТОЛА 5-КООРДИНАТНОГО ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА

Ihor Boiko, master
Vasyl Solokha, PhD in Technical Sciences
Leonid Ivshchenko, Doctor of Technical Sciences
Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

DYNAMIC ANALYSIS OF 5-AXIS MILLING CENTRE TURNTABLE

Проведено динамічний аналіз двох положень поворотного стола 5-координатного обробного центру. Визначено шість ведучих частот і форм власних коливань, що лежать у діапазоні від 150 до 500 Гц. У результаті моделювання зміни жорсткості підвищенням і зменшенням модуля пружності елементів системи в два рази визначено, що найбільший вплив на ЧВК чинять міст і каретка. Моделювання комплексного збільшення жорсткості моста і каретки показало можливість підвищення частоти власних коливань (ЧВК) до 30 %, при цьому відбувається зменшення переміщень центру поворотного стола, що впливають на точність і якість оброблення.

Ключові слова: *модальний аналіз, частота власних коливань, амплітуда.*

Проведен динамический анализ двух положений поворотного стола 5-координатного обрабатывающего центра. Определено шесть ведущих частот и форм собственных колебаний, лежащих в диапазоне от 150 до 500 Гц. В результате моделирования изменения жесткости повышением и уменьшением модуля упругости элементов системы в два раза определено, что наибольшее влияние на частоту собственных колебаний оказывают мост и каретка. Моделирование комплексного увеличения жесткости моста и каретки показало возможность повышения частоты собственных колебаний до 30 %, при этом происходит уменьшение перемещений центра поворотного стола, влияющих на точность и качество обработки.

Ключевые слова: *модальный анализ, частота собственных колебаний, амплитуда.*

Dynamic analysis of two provisions of the five coordinate machining centres rotary table is carried out. Six defined leading frequencies and forms of the natural vibrations lying in the range from 150 to 500 Hz. As a result of rigidity change simulation by increase and decrease of system elements elastic modulus twice defined that the bridge and the carriage have the greatest impact on the frequency of natural vibrations. Modeling complex increase the rigidity of the bridge and carriage showed the possibility of increasing the frequency of natural vibrations up to 30%, with decreases movement of rotary table center, affecting the accuracy and quality of finish.

Key words: *modal analysis, frequency of natural vibrations, amplitude.*

Постановка проблеми. Застосування в авіабудівній промисловості багатокоординатних високошвидкісних обробних центрів зумовлено необхідністю отримання складнопрофільних поверхонь і зменшенням часу оброблення. Однак велика різноманітність матеріалів, що застосовуються в авіабудуванні, викликає необхідність використовувати обладнання в широких межах частот обертання і подач, внаслідок чого виникає необхідність проведення динамічного аналізу, що дозволить оцінити несприятливі умови роботи верстата, при яких збурюються коливання, що можуть привести до погіршення показників точності та якості оброблення поверхонь.

Поняття динамічної якості верстата має певні показники, до яких відносяться стійкість робочих процесів у верстаті (процеси різання і тертя), рівень вимушених і власних коливань, якість перехідних процесів [1; 2].

П'ятикоординатне оброблення характеризується циклічною зміною положення поворотного стола і може супроводжуватися зміною частоти власних коливань у значному діапазоні, наслідком чого буде періодичне виникнення резонансу впродовж циклу роботи верстата.

Мета статті. Для оцінювання динамічної якості поворотних столів 5-координатного обробного центру пропонується проведення модального і гармонічного аналізу конструкції за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ). За базову конструкцію пропонується прийняти поворотний стіл верстата Picomax 820 VERSA. Модальний аналіз дозволяє визначити частоти і форми власних коливань елементів системи, або системи в цілому [3; 4; 5]. Гармонічний аналіз дозволяє відокремити частоти власних коливань, на яких мають місце локальні коливання елементів поворотного стола, що суттєво не впливатимуть на точність і якість оброблення.

Оцінювання динамічної якості поворотних столів умовно можна поділити на такі етапи:

1) розроблення геометричної моделі та її оптимізація;

2) створення математичної моделі: призначення властивостей матеріалів; встановлення обмежень на лінійні і кругові переміщення; призначення типів і властивостей взаємодії контактних елементів; генерація скінченно-елементної сітки;

3) розрахунок частот власних коливань поворотного стола;

4) проведення гармонічного аналізу. Визначення ведучих модальних частот;

5) визначення елементів системи, що значною мірою впливатимуть на значення частоти власних коливань;

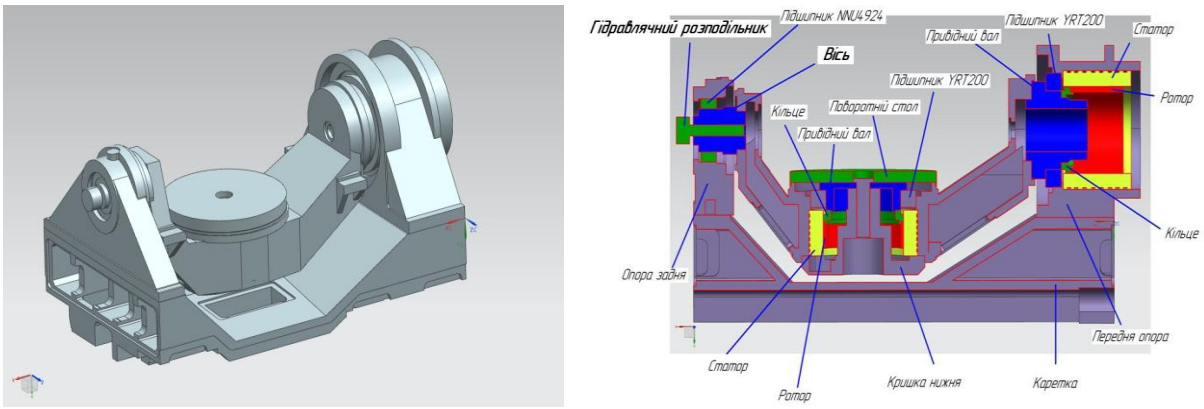
6) висновки.

Виклад основного матеріалу. Аналіз частот власних коливань проведено для поворотного стола 5-координатного обробного центру Picomax 820 VERSA, що складається з каретки, яка переміщується двома лінійними напрямними кочення з трьома опорами кочення на кожній, передньої та задньої опор, моста та інших складових елементів (рис. 1). У передній опорі і мості розташовуються моментні електродвигуни, що передають крутний момент через кільця на вали, які з'єднані безпосередньо з мостом (обертання за віссю *A*) та з поворотним столом (обертання за віссю *C*).

Комбіновані підшипники кочення для поворотних столів, що монтуються у передній опорі і мості, а також циліндричний роликопідшипник, розташований у задній опорі, замінені кільцями з еквівалентними модулем пружності і моментом інерції, що забезпечують необхідні показники жорсткості і ваги.

Властивості матеріалів, з яких виготовлені деталі поворотного стола, наведені в табл. 1.

У передній і задній опорі, а також у мості розташований пристрій RotoClamp, що застосовується при установчих поворотах для запобігання провороту навколо осей *A* і *C* (на рис. 1 умовно не показаний).



а *б*

Рис. 1. Геометрична модель поворотного стола 5-координатного обробного центру: а – загальний вигляд; б – розріз по опорах

Таблиця 1

Властивості елементів поворотного стола, що моделюються

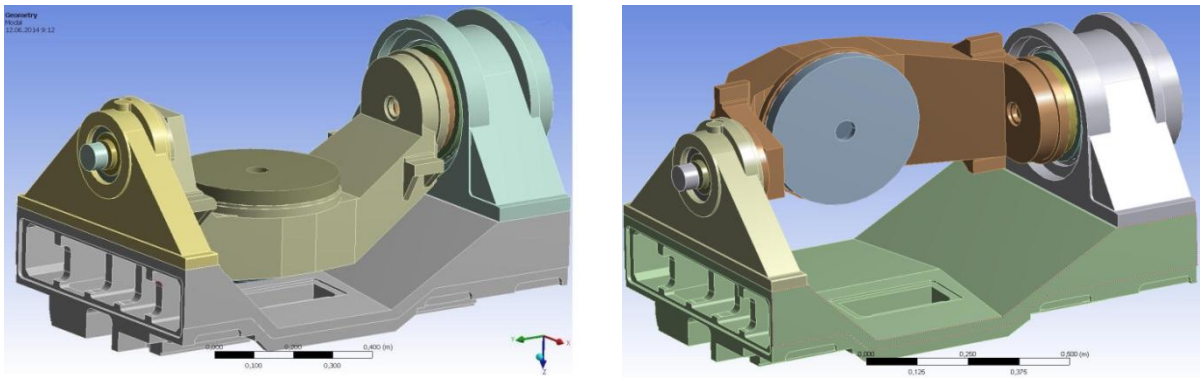
Деталь	Матеріал	Модуль пружності E,ГПа	Коефіцієнт Пуассона μ	Густина ρ, кг/м^3
Вал привідний (вісь C,A)	40ХН2МА	215	0,3	7850
Ротор (вісь C,A)	Сталь холодно-катана низько-легована 2212	210	0,3	7800
Статор (вісь C,A)	Сталь холодно-катана низько-легована 2212	210	0,3	7800
Корпус задньої опори	СЧ20	110	0,28	7200
Кільце (вісь C,A)	40ХН2МА	215	0,3	7850
Обертовий розподільник (вісь C,A)	40ХН2МА	215	0,3	7850
Міст	СЧ20	110	0,28	7200
Підшипник YRT200		4,17	0,3	5792
Кришка нижня поворотного стола	Алюміній	70	0,34	2700
Підшипник NNU4924		23,5	0,3	5552,4
Корпус передньої опори	СЧ20	110	0,28	7200
Каретка	СЧ20	110	0,28	7200
Поворотний стіл	40ХН2МА	215	0,3	7850
Вал	40ХН2МА	215	0,3	7850

Скінченно-елементна модель складається з 101450 елементів, з’єднаних 184699 вузлами.

Окремі деталі з’єднані між собою контактними скінченними елементами, встановленими у зафіксоване положення (bonded). Між ротором та статором двигунів, а також статором і корпусом контакт не встановлюється. У місцях приєднання напрямних до каретки задаються нульові переміщення за трьома осями.

Затискання поворотних столів після здійснення переміщення моделюється обмеженням повороту навколо відповідних лінійних осей у місцях розташування затискних систем RotoClamp.

З метою оцінювання впливу положення поворотного стола на зміну частоти власних коливань були змодельовані варіанти повороту моста за віссю *A*: в нульовому положенні (A0) (рис. 2, *а*) і поворот на 90° (A-90) (рис. 2, *б*).



а *б*

Рис. 2. Геометрична модель двох досліджуваних варіантів повороту моста за віссю А: а – А0; б – А-90

Оскільки максимальна кількість обертів шпинделя досліджуваного верстата становить 14000 об/хв, то при роботі 4-зубою фрезою частота збурення від врізання леза фрези в заготовку становитиме 933 Гц. Для обох положень у визначеному діапазоні лежить 19 ЧВК.

Під час оброблення на верстаті деталей із жароміцних сплавів робочі швидкості різання не перевищують 30–45 м/хв, сили різання великі, а частоти обертання досягають 2000 об/хв. Амплітуда коливань у такому випадку буде значно більшою, ніж при високошвидкісному різанні, що характеризується зняттям малого припуску на великій швидкості і з малими зусиллями різання. Тому першу отриману частоту можна вважати достатньо високою (приблизно відповідає 2500 об/хв для 4-зубої фрези), а отже, вузол не буде відкликатися на силове різання на середніх і низьких частотах обертання шпинделя.

Порівнюючи ЧВК двох досліджуваних положень (табл. 2) поворотного стола, варто зазначити, що немає чіткої закономірності зміни величини частот. Зміна положення моста приводить як до збільшення, так і до зменшення частот, що значною мірою залежить від площини і напрямку переміщень. Величина зміни частоти максимально досягає 10 %.

Таблиця 2

Частоти власних коливань двох досліджуваних положень поворотного стола

№ частоти	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
А0, Гц	170	180	218	370	395	437	439	518	592	677
А-90, Гц	169	184	228	356	412	447	456	570	604	677
№ частоти	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
А0, Гц	694	717	718	791	844	876	881	914	924	
А-90, Гц	699	712	721	780	850	870	875	896	91	

Проведення гармонічного аналізу дозволило відкинути частоти власних коливань окремих елементів досліджуваної системи, що не впливають на переміщення планшайби поворотного стола, а отже, і на якість та точність оброблення, за рахунок отримання амплітудно-частотної характеристики. До центру поворотного стола прикладається сила, що складається з трьох векторів, направлених вздовж осей системи координат геометричної моделі, кожна з яких дорівнювала 100Н. Визначалося відносне переміщення центру поворотного стола за трьома осями як результат коливань, що збурюються під дією гармонічно діючої сили, яка імітує силу різання. Демпфірування системи приймається на рівні 2 %.

На рис. 3 і 4 наводяться максимальні переміщення центру поворотного стола за осями *X, Y, Z*. Для обох положень моста за віссю *A* значні переміщення мали місце в межах перших семи частот власних коливань. На інших частотах збурення майже не відбувалося. Для обох випадків максимальні значення збурення спостерігаються на частотах f1, f2, f3, f5, f6, f7.

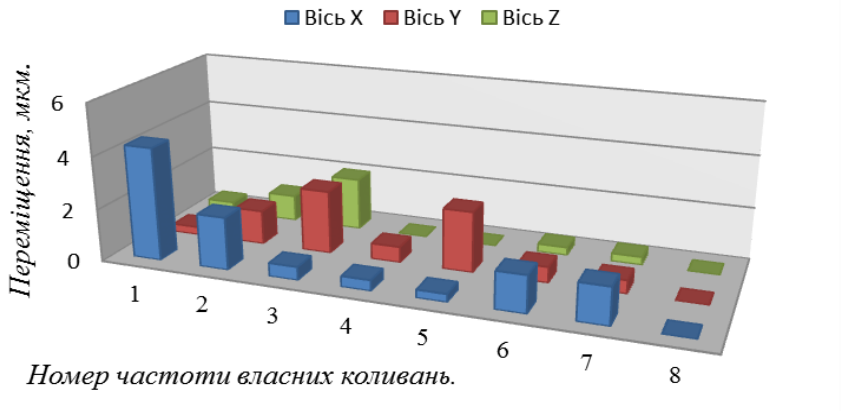


Рис. 3. Амплітуда збурення коливань від гармонічно діючої сили при А0

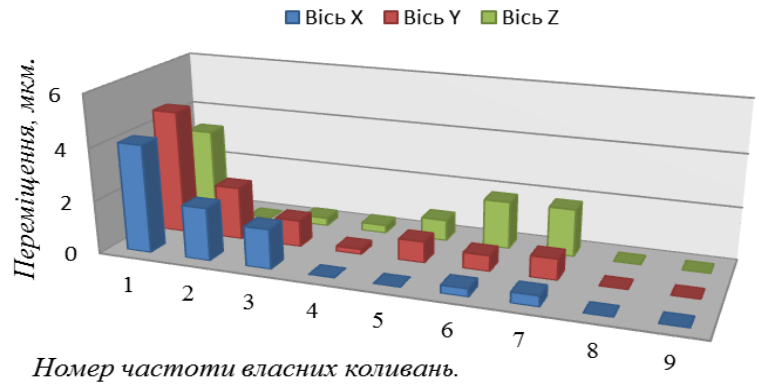
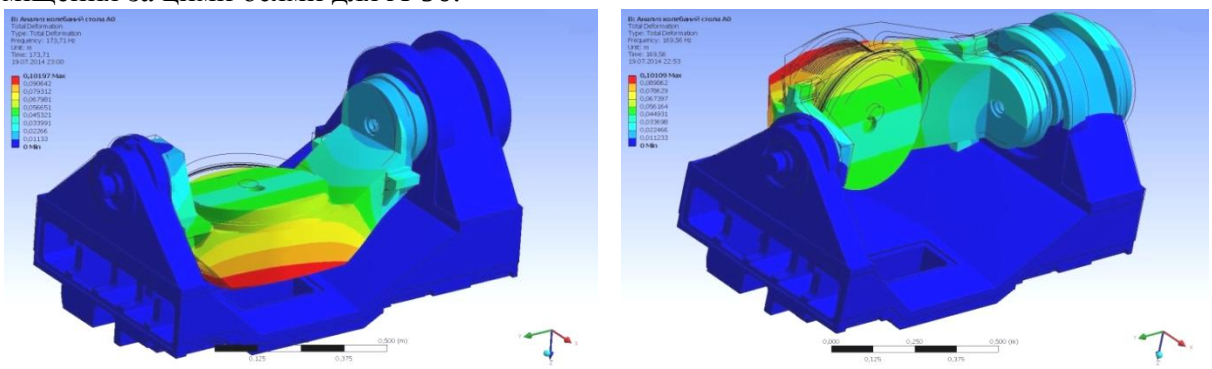


Рис. 4. Амплітуда збурення коливань від гармонічно діючої сили при А-90

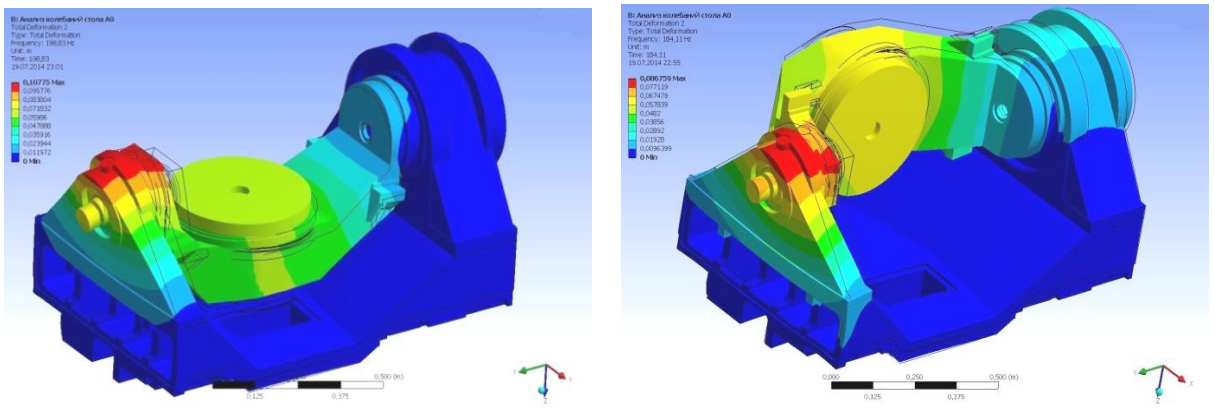
Відмінність у значеннях переміщень, а також осей координат, вздовж яких відбуваються коливання, полягає саме у положенні моста. На рис. 5 показана перша власна частота коливань, що характеризується поперечними переміщеннями моста вздовж осі *X*. У цьому випадку міст намагається передати коливання через жорстке з'єднання з обертовими валами, які, у свою чергу, через підшипники, встановлені в передній і задній опорах, передають коливання безпосередньо опорам. У повернутому стані незмінний за формою міст природно матиме таку ж форму коливань, але за віссю *Z*. Однак, якщо при А0 опори за віссю *X* симетричні, то при А-90 несиметричні. Маємо ідентичні величини переміщень для нульового положення за віссю *X*, а для А-90 – віссю *Z*. При А0 відзначимо майже повну відсутність коливань за осями *Y* і *Z*, а також достатньо великі переміщення за цими осями для А-90.



а *б*

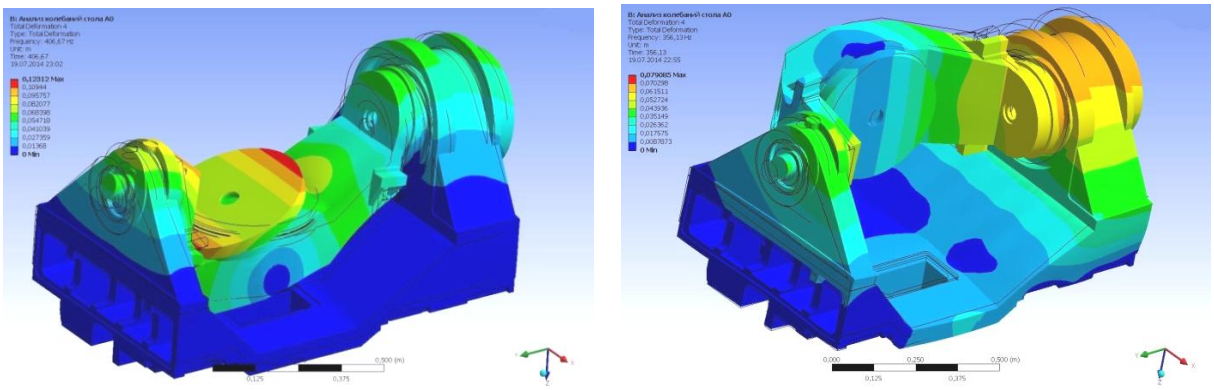
Рис. 5. Частота власних коливань f1(а – А0, f1=170,6; б – А-90, f1=169,5)

На другій і третій частотах власних коливань спостерігаються згинні переміщення задньої і передньої опор відповідно. В обох випадках при нульовому положенні моста деформації розподіляються по корпусу опори рівномірно і симетрично відносно осі симетрії. При положенні А-90 повернутий міст заважає опорам коливатися симетрично відносно площини *YZ* (рис. 6). Для передньої опори ситуація аналогічна (рис. 7).



а *б*

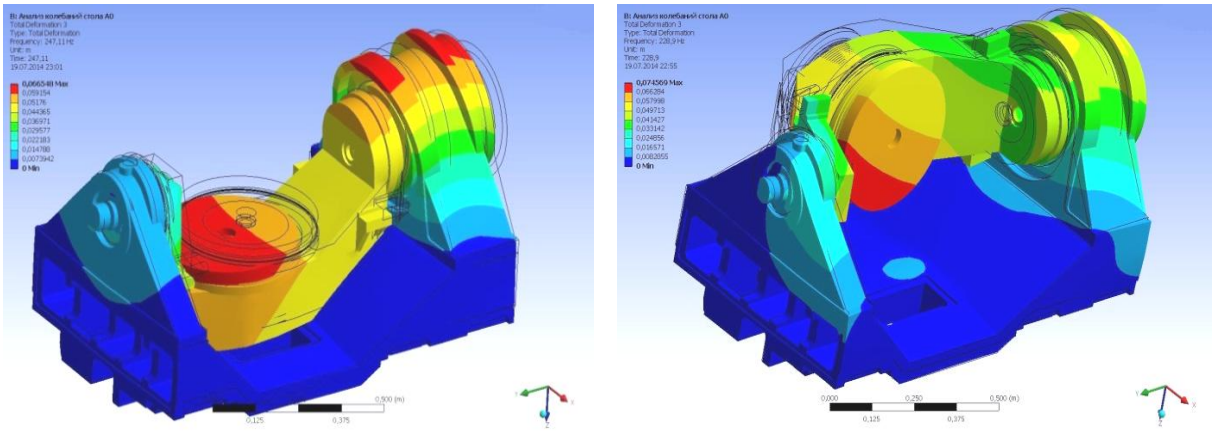
Рис. 6. Частота власних коливань f2(а – А0, f2=180,3; б – А-90, f2=184,1)



а *б*

Рис. 7. Частота власних коливань f3(а – А0, f3=218; б – А-90, f3=228,9)

На частоті f5 в обох положеннях спостерігаються крутні коливання моста навколо осі X, що стримуються передньою і задньою опорами (рис. 8).



а *б*

Рис. 8. Частота власних коливань f4 і f5 (а – А0, f5=395,2; б – А-90, f4=356,1)

Шоста і сьома частота власних коливань являють собою комбінацію згинних коливань задньої опори і планшайби поворотного стола, тільки на частоті f6 коливання опо-

ри не досягли максимуму, а визначена ЧВК відноситься скоріше до планшайби, а на частоті f7 навпаки, визначена ЧВК відноситься до задньої опори, а амплітуда коливань планшайби починає згасати. Подібне пояснюється близькістю розташування величин ЧВК елементів (f6=447.7Гц; f7=456;1Гц для А-90).

Аналіз впливу елементів поворотного стола на частоту власних коливань проводиться з метою визначення елементів, які матимуть найбільший вплив на частоту власних коливань системи. Знаючи такий елемент системи, виникає можливість у деяких межах значно впливати на ЧВК і їх амплітуду на етапі конструкторсько-технологічного проектування. Зміна жорсткості елементів поворотного стола умовно моделювалась за рахунок подвійного збільшення і зменшення модуля пружності матеріалу, з якого виготовлений елемент.

У табл. 3 наведено процентне відношення зміни ЧВК залежно від зміни модуля пружності для шести ведучих частот поворотного стола при А0.

Таблиця 3

Вплив зміни жорсткості базових деталей на частоту власних коливань у положенні А0

Елемент	Е, ГПа	f1	f2	f3	f5	f6	f7
Міст	55	141,5	161,7	207,4	341,2	392,3	394,7
	220	200,3	201,8	228,1	459,2	488,8	496,9
	Відношення, %	41,47	24,81	9,953	34,61	24,57	25,90
Задня опора	55	167,5	168,5	215,7	388,1	422,8	425,1
	220	172,8	189,3	219,7	400,3	445,2	448,8
	Відношення, %	3,211	12,55	1,849	3,145	5,300	5,591
Передня опора	55	167,5	179,0	201,0	388,1	421,7	437,1
	220	172,6	181,0	231,4	401,3	440,7	446,0
	Відношення, %	3,07	1,10	15,16	3,40	4,52	2,02
Каретка	55	159,2	164,2	183,5	375,2	380,0	390,9
	220	173,8	200,1	249,0	429,4	490,7	493,7
	Відношення, %	9,17	21,81	35,67	14,44	29,14	26,30
Кришка поворотного стола	35	169,7	179,0	217,4	393,9	434,7	436,9
	140	171,3	181,4	218,5	396,4	438,9	442,3
	Відношення, %	0,90	1,34	0,50	0,65	0,97	1,24
Підшипник передньої опори	2,08	163,5	174,1	206,8	384,2	409,1	438,8
	8,34	188,5	189,4	235,1	416,1	440,1	455,2
	Відношення, %	15,26	8,78	13,66	8,31	7,56	3,74
Підшипник задньої опори	12	171,8	182,0	218,8	403,4	440,8	464,0
	47	173,1	183,5	219,3	406,9	442,9	483,7
	Відношення, %	0,79	0,83	0,22	0,87	0,49	4,25
Підшипник поворотного стола	2,08	169,8	179,0	217,1	380,6	410,6	434,0
	8,34	171,4	181,4	218,5	401,4	439,8	456,8
	Відношення, %	0,92	1,30	0,62	5,46	7,10	5,26
Поворотний стіл	107	172,5	182,8	219,1	405,3	441,9	474,8
	430	172,5	182,9	219,1	405,	442,2	475,8
	Відношення, %	0,02	0,04	0,02	0,10	0,06	0,22

Найбільший вплив на зміну ЧВК має зміна модуля пружності моста, який безпосередньо передає коливання і переміщення на планшайбу, а також каретка. Міст чинить найбільший вплив на частоти f1, f2, f5, f6, f7. Взагалі на частоту f3, де коливається передня опора, суттєво впливає зміна жорсткості самої опори і каретки, до якої вона жорстко прикріплена. Задня і передня опори дуже слабо впливають на зміну ЧВК, крім частот, на яких вони безпосередньо коливаються. Зміни частот при збільшенні модуля пружності каретки сягають 35 %, при цьому на частоті f1, коли каретка опосередковано пов’язана з мостом, що коливається, зміна становить менше 10 %.

Умовна зміна жорсткості інших елементів несуттєво впливала на зміну ЧВК. Це може вказувати або на високу жорсткість елементів, або на те, що вони не беруть безпосередню участь у формуванні частот і форм коливань. Тільки підшипник передньої опори показав розмах ЧВК у досить широкому діапазоні – від 7 до 15 %.

У табл. 4 наведено зміни ЧВК залежно від зміни модуля пружності для А-90. В усіх випадках результати повторюють дані, отримані для нульового положення.

Таблиця 4

Вплив зміни жорсткості базових деталей на частоту власних коливань у положенні А-90

Елемент	Е, ГПа	f1	f2	f3	f5	f6	f7
Міст	55	140,1	167,6	211,2	361	366,1	406,7
	220	192,7	207,1	245,3	460,2	513,8	521,1
	Відношення, %	37,54	23,56	16,16	27,48	40,36	28,11
Задня опора	55	166,0	175,4	224,0	400,8	435,2	445,1
	220	172,6	190,6	233,0	421,4	455,7	464
	Відношення, %	3,96	8,64	4,02	5,15	4,71	4,23
Передня опора	55	165,0	180,4	218,9	404,0	443,7	452,2
	220	172,4	186,6	236,9	419,9	449,5	458,6
	Відношення, %	4,52	3,45	8,24	3,94	1,33	1,40
Каретка	55	155,7	166,6	200,8	350,2	403,1	431,3
	220	172,7	207,3	254,9	450,1	459,1	527,7
	Відношення, %	10,91	24,38	26,91	28,52	13,87	22,35

Для оцінювання впливу на ЧВК і величину переміщення центру поворотного стола комплексної зміни жорсткості елементів системи проведений модальний і гармонічний аналіз поворотного стола з подвоєними модулями пружності для моста і каретки. Треба розуміти, що збільшення жорсткості елементів поворотного стола можна досягти як за рахунок введення конструкторсько-технологічних змін (додавання ребер жорсткості, зміна форми тощо), так і за рахунок використання матеріалів з більш високим модулем пружності за тієї самої густини, що й у базовому матеріалі.

Таблиця 5

Частоти власних коливань двох досліджуваних положень поворотного стола при подвоєнні модуля пружності моста та каретки

№ частоти	1	2	3	4	5	6	7	8
А0, Гц	210,9	226,0	261,6	475,7	513,1	513,1	545,1	599,9
А-90, Гц	206,9	224,8	273,1	443,6	511,0	535,12	587,3	652,9

Як видно з табл. 5, подвоєння модуля пружності моста і каретки приводить до збільшення ЧВК поворотного стола в межах від 15 до 30 %. Зміна ЧВК досить суттєва, але, враховуючи що дані частоти досить високі і характерні для високошвидкісного різання, де сили різання достатньо малі, на перше місце виходить можливість зменшення амплітуди коливань.

Гармонічний аналіз показав суттєві зниження переміщень центру поворотного стола у порівнянні із конструкцією з базовими модулями пружності. Так при нульовому положенні для частот f5, f6, f7 залишилися тільки незначні збурення за віссю *Y*. Те ж саме стосується і частоти f2, де переміщення за віссю *X* дорівнює нулю, а за осями *Y* і *Z* знизилися в середньому на 30 % (рис. 9). Приблизно на 30 % зменшилися переміщення і на першій частоті.

Подібна картина спостерігається і для положення А-90. На першій частоті переміщення за осями *X* і *Y* зменшилися у три рази, а на частотах f5, f6, f7 (рис. 10) або значно знизилися, або відсутні взагалі. Деяке зростання переміщень спостерігається тільки на другій частоті за осями *X* та *Y*.

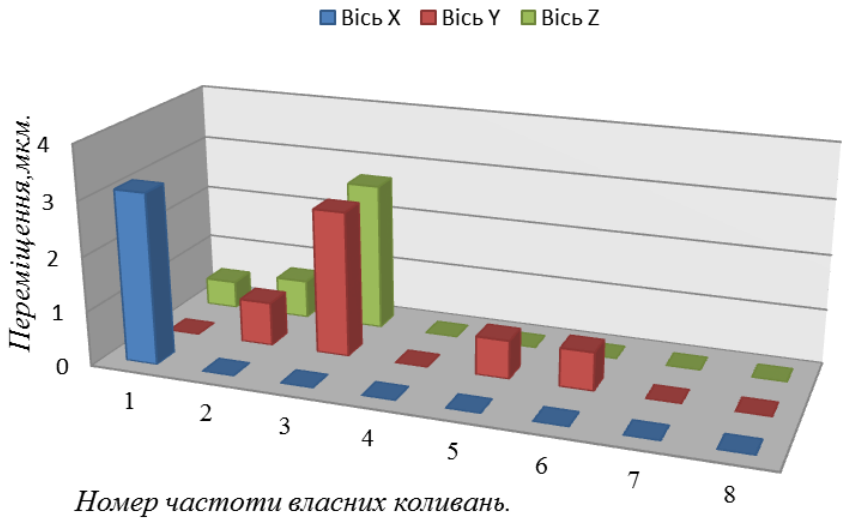


Рис. 9. Амплітуда збурення коливань від гармонічно діючої сили для положення А0

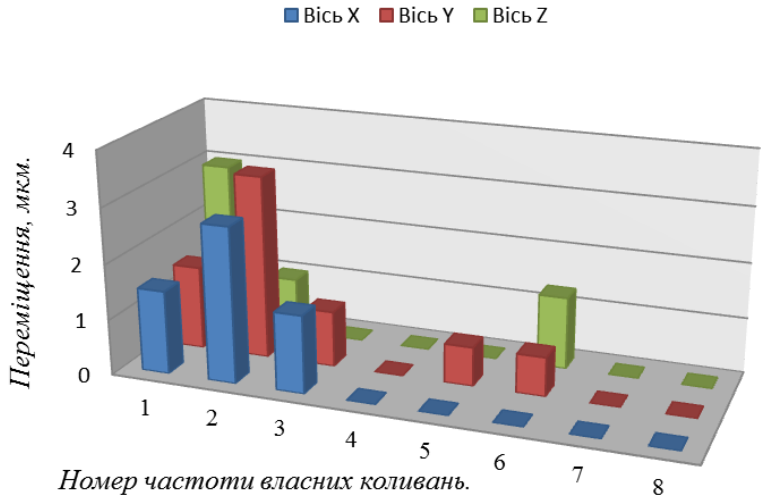


Рис. 10. Амплітуда збурення коливань від гармонічно діючої сили при положенні А-90

Таким чином, за рахунок варіювання жорсткістю окремих елементів системи з'являється можливість не тільки змінювати ЧВК поворотних столів у значних діапазонах, а і зменшити амплітуду коливань, що безпосередньо відображається на якості оброблених поверхонь, точності оброблення, а також на стійкості різального інструменту.

Висновки і пропозиції. У діапазоні робочих частот обертання шпинделя знайдено 19 ЧВК для двох положень поворотного стола. Найбільший вплив на точність оброблення матимуть частоти f1=170,6 Гц; f2=180,3Гц, f3=218 Гц; f5=395,2 Гц; f6=437 Гц; f7=439,5 Гц для нульового положення і f1=169,5 Гц; f2=184,1Гц, f3=228,9 Гц; f5=412,7 Гц; f6=447,7 Гц; f7= 456,1 Гц для положення А-90. Поворот моста суттєво не змінює ЧВК: максимальна різниця між двома положеннями не перевищує 10 % і значною мірою залежить від компоновки поворотного стола. Перша частота достатньо висока, тому поворотний стіл не відкликатиметься на силове різання.

При повороті моста переміщення центру стола змінюються за напрямком і величиною. Вплив на величину переміщень чинитиме несиметричність положення моста при повороті відносно осі обертання.

Зміна жорсткості моста і каретки найбільше відображається на зміні ЧВК системи, яка може становити до 40 %. Інші елементи впливають тільки на окремі ЧВК, де досліджуваний елемент безпосередньо виступає тілом, що коливається, або з ним контактує. Зміна положення поворотного стола не впливає на залежність ЧВК усіх елементів від модуля пружності.

Введення одночасного подвоєння модуля пружності моста і каретки приводить до збільшення величини і зменшення кількості ведучих ЧВК та зниження переміщень центру поворотного стола. Збільшення жорсткості можливе як за рахунок введення додаткових конструктивних елементів, так і підбором матеріалів з більш високим модулем пружності за тієї самої густини.

Проведення динамічного аналізу поворотних столів багатоцільових верстатів на етапі конструкторсько-технологічного проектування дозволяє попередньо спрогнозувати несприятливі умови роботи вузла та без застосування натурних досліджень внести конструктивні зміни, оцінити їх вплив на динамічну якість.

Список використаних джерел

1. *Кудинов В. А.* Динамика станков / В. А. Кудинов. – М. : Машиностроение, 1976. – 359 с.

2. *Орликов М. Л.* Динамика станков / М. Л. Орликов. – К. : Вища школа, 1989. – 272 с.

3. *Shil-Geun Kim* Analysis of Dinamic Characteristics and Evaluation of Dynamic Stiffness of a 5-axis Multi-tasking machine tool by using FEM and Exiter test / Kim Shil-Geun, Jang Sung-Hyun // International conference on Smart Manufacturing Aplication. – 2008. – P. 565–569.

4. *Dhupia J.* Dynamics of arch-type reconfigurable machine tool / J. Dhupia, B. Powalka, R. Katz // International journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – № 47. – P. 326–334.

5. *Patwari A.* Dynamic Modal Analysis of Vertical Machining Centre Components /A. Patwari, W. Faris // Advances in Acoustics and Vibration. – 2009. – P. 1–10.

РОЗДІЛ IV. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 621.791.01.6

Г.П. Болотов, д-р техн. наук
М.Г. Болотов, канд. техн. наук
М.М. Руденко, ст. викладач
Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ В УМОВАХ ДИФУЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ

Г.П. Болотов, д-р техн. наук
М.Г. Болотов, канд. техн. наук
М.Н. Руденко, ст. преподаватель
Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ

Hennadii Bolotov, Doctor of Technical Sciences
Maksym Bolotov, PhD in Technical Sciences
Mykhailo Rudenko, senior teacher
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

CONTROL OF ENERGY CHARACTERISTICS OF A GLOW DISCHARGE IN TERMS OF DIFFUSION WELDING

Охарактеризовано основні параметри горіння тліючого розряду, що впливають на процес нагріву деталей під час дифузійного зварювання. Визначені основні керуючі дії та їх вплив на абсолютні й питомі енергетичні характеристики тліючого розряду.

Ключові слова: *дифузійне зварювання, тліючий розряд, енергетичні характеристики, керування.*

Охарактеризованы основные параметры горения тлеющего разряда, влияющие на процесс нагрева деталей при диффузионной сварке. Определены основные управляющие воздействия и их влияние на абсолютные и удельные энергетические характеристики тлеющего разряда.

Ключевые слова: *диффузионная сварка, тлеющий разряд, энергетические характеристики, управление.*

The characteristic of the main parameters of burning glow discharge affecting the process of heating parts with diffusion welding. The basic control actions and their impact on absolute and specific power characteristics of glow discharge

Key words*: diffusion welding, glow discharge, power characteristics, control.*

Постановка проблеми. У промисловості знаходять все більш широке застосування зварні з'єднання складної форми, виконані з однорідних та різнорідних металів та сплавів, що мають високі механічні та експлуатаційні характеристики, але обмежену здатність до зварювання. Для отримання таких з'єднань найбільш ефективно застосовуються способи зварювання тиском, зокрема, дифузійне зварювання без розплавлення вихідних матеріалів, яке здійснюється одночасно на значній площі і вимагає застосування джерел енергії, що мають невисокий коефіцієнт зосередженості, забезпечують прецизійне регулювання термічного циклу зварювання і мають адаптивність до зміни форми і матеріалу виробів.

Результати попередніх досліджень. Багаторічний досвід застосування дифузійного зварювання у різних галузях виробництва і численні дослідження ефективності технологічних процесів [1] показали, що серед застосованих на сьогодні для дифузійного зварювання джерел енергії (радіаційні, індукційні, електроконтактні) найбільш повно вказаним вимогам відповідає нагрів виробів тліючим розрядом, що горить у середовищі захисних газів при тисках, нижче атмосферного [2]. Технологічні властивості іонного нагріву роблять ефективним його застосування під час зварювання виробів як відносно простої, так і складної форми у серійному, одиничному і ремонтному виробництвах. Однак подальший розвиток і широке промислове застосування зварювання в тліючому

розряді нині обмежується недостатньо розвиненими уявленнями щодо механізму нагріву тліючим розрядом середніх тисків та засобів керування його енергетичними характеристиками. Це приводить до того, що у виробництві під час керування процесами зварювання помітну роль відіграє людський фактор, пов'язаний із суб'єктивністю прийняття та виконання рішень в умовах багатофакторного технологічного процесу, що супроводжується нестабільністю якісних показників з'єднань та недостатньою продуктивністю.

Мета роботи. Метою роботи є визначення ступеня кореляції параметрів режиму тліючого розряду з абсолютними та питомими характеристиками енерговиділення у розрядній плазмі та енергетичною ефективністю нагріву.

Виклад основного матеріалу. До основних енергетичних характеристик розряду відносять: повну потужність $W = IU_p$, величину середнього питомого об'ємного енерговкладу jE в об'ємі позитивного стовпа розряду і питому потужність $q = jU_к$ у катодній плямі розряду, розташованій на поверхні деталей у зоні нагріву, обумовлену бомбардуванням цієї поверхні прискореними іонами (тут j, $U_к$, E, відповідно, густина струму в катодній плямі, величина катодного падіння потенціалу і напруженість електричного поля у стовпі розряду).

Питомий об'ємний енерговклад jE визначає частку енергії позитивного стовпа, що надходить через прикатодну область розряду до зварюваних деталей і сприяє їх нагріванню. Питома електрична потужність q, що виділяється в катодній плямі, характеризує у свою чергу як густину теплового потоку на поверхні деталей, так і їх ефективний об'єм, що піддається безпосередньому нагріванню.

Специфічною особливістю тліючого розряду як поверхневого джерела нагріву є можливість плавного регулювання площі плями нагрівання $S_н$ і густини потоку q теплової енергії, що вкладається у виріб. Ці властивості зумовлені густиною струму в катодній плямі розряду, значення якої визначається природою газу, матеріалом катода і змінюється залежно від тиску газу в межах 10^{-3} ... 1 А/см^2. На рис. 1 цю властивість проілюстровано схемами розташування розрядного світіння на поверхні циліндричного катода. Світіння зображено штрихуванням, зміна площі якої відображає зміну густини струму в катодній плямі. З підвищенням тиску зростає густина струму і, відповідно, підвищується інтенсивність нагріву тліючим розрядом. При незмінному тиску збільшення струму нормального тліючого розряду тягне за собою збільшення площі катодної плями при практично незмінній густині енергії у плямі нагріву.

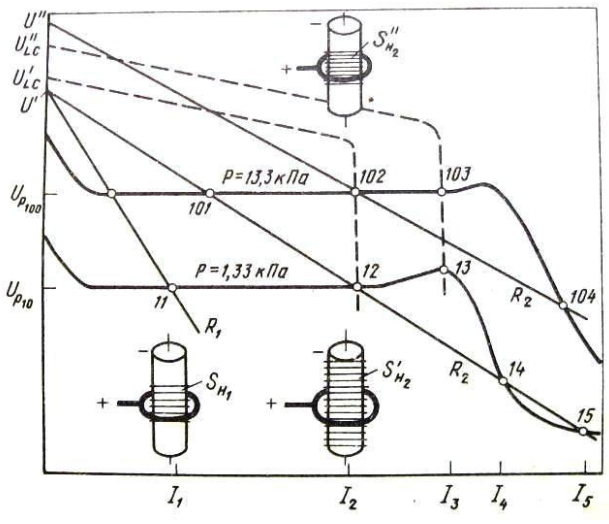
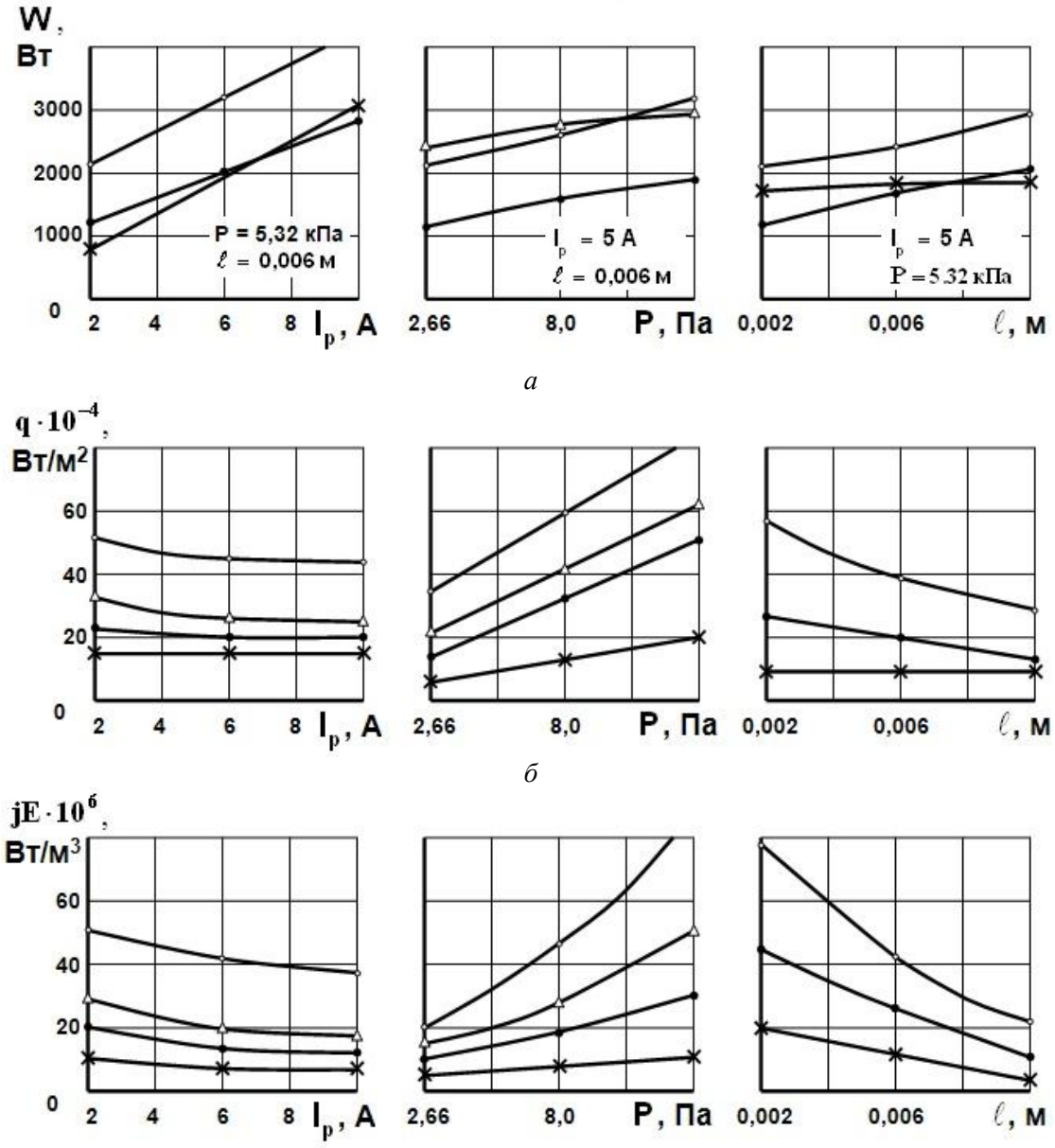


Рис. 1. Схема зміни площі нагрівання тліючим розрядом Sн при збільшенні струму розряду I (Sн1 , S'н2) та тиску газу P (S'н2 , S''н2)

Оптимальне керування енергетичними складовими теплового балансу тліючого розряду визначає ефективність впливу на термічний цикл зварювання, формування температурних полів у деталях, підвищення продуктивності та економічності нагріву.

Енергетичні характеристики розряду задаються електричними і технологічними параметрами режиму його горіння: струмом розряду, тиском і родом газу, протяжністю міжелектродного проміжку. Експериментально встановлені залежності між ними для використовуваних на практиці газів – аргону, азоту, водню

і гелію в діапазоні зміни струмів розряду 2 ... 8 А, тисків газу 2,66 ... 13,3 кПа, міжелектродних відстаней 0,002 ... 0,01 м наведені на рис. 2.



○ – азот, ● – аргон, Δ – водень, х – гелій

Рис. 2. Залежність потужності тліючого розряду (а), густини електричної потужності (б) та питомої об'ємної потужності (в) від величини струму розряду Ір, тиску газу Р і міжелектродної відстані ℓ

Як випливає з наведених залежностей, енергетичні характеристики тліючого розряду значною мірою визначаються властивостями газового середовища, в якому горить розряд. Ці властивості характеризуються наведеними значеннями густини струму (так званою «нормальною» густиною струму $j_{но}$) і величиною нормального катодного падіння потенціалу $U_к$, значення яких для використовуваних газів наведені в табл. 1.

Оскільки основна частка енергії тліючого розряду, що забезпечує нагрівання катода, припадає на електричну енергію, що виділяється в прикатодній області та визначається, в основному, величиною падіння потенціалу $U_к$ в цій області, то найбільш ефективними з енергетичного погляду газовими середовищами є азот і водень, що мають найбільші значення катодного падіння потенціалу (215 і 250 В відповідно).

Таблиця 1

Характеристики тліючого розряду для різних газових середовищ [3]

Параметр розряду	Газове середовище			
	гелій	аргон	водень	азот
Нормальна густина струму $j_{но}$, А/м^2·Па	2,2	160	72	226
Катодне падіння потенціалу $U_к$, В	150	165	250	215

Отримані експериментальні залежності показують, що параметри режиму горіння тліючого розряду істотно різним способом впливають на характер зміни основних складових енергетичного балансу розряду. Оскільки ці параметри в умовах зварювання та паяння можуть мати досить широкий діапазон варіювання, а технічна реалізація управління ними має різну ступінь складності, доцільно визначити ступінь кореляції цих параметрів з енергетичними характеристиками розряду для виявлення найбільш значущих з них.

Оцінювання ступеня таких взаємодій проводили методом «похитування» параметрів, коли фіксували зміну шуканої величини (*W, jE* або *q* у нашому випадку) у разі відхилення одного з параметрів режиму від деякого середнього значення на 25 % у бік його збільшення і зменшення при одночасній стабілізації інших параметрів. За середні значення приймали: для струму розряду 4А, тиску газу 8,0 кПа, міжелектродної відстані 0,006 м. Усереднені значення отриманих коефіцієнтів зв'язку наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Коефіцієнти зв'язку параметрів режиму з енергетичними характеристиками тліючого розряду

Газове середовище	Енергетичні характеристики розряду	Коефіцієнти зв'язку для параметрів режиму горіння розряду *		
		Струм розряду	Тиск газу	Міжелектродна відстань
Азот	W	0,65	0,3	
	jE	-0,29	1,67	-1,52
	q	0,21	1,55	-0,21
Водень	W	0,81	0,19	
	jE	-0,21	1,52	-1,31
	q	0,18	1,28	-0,17
Аргон	W	0,89	0,11	
	jE	-0,28	0,86	-1,1
	q	0,13	0,67	-0,26

Примітка: *від'ємні значення коефіцієнтів свідчать про зворотньопропорційну залежність відповідних параметрів з енергетичними характеристиками.

Отримані значення коефіцієнтів зв'язку показують, що найбільш тісно з питомими енергетичними характеристиками позитивного стовпа і прикатодної зони пов'язані зміни тиску газу в камері, що дає підставу вважати цей параметр режиму основним у регулюванні цих характеристик. Слід зазначити і досить помітний вплив величини міжелектродної відстані анод-катод (деталь) на величину питомого енерговкладу *jE* у позитивному стовпі розряду. Видно, що зі збільшенням міжелектродного проміжку енергетичні характеристики розряду погіршуються. Це відбувається незважаючи на те, що зі збільшенням проміжку падіння напруги на розряді дещо зростає. Однак це одночасно супроводжується зниженням напруженості електричного поля в стовпі. Ймовірно, під час використання відносно простих технічних рішень для регулювання величини міжелектродного проміжку зміною положення анода дистанційно та з достатньою точністю і цей параметр може бути ефективним способом управління енергетичними характеристиками розрядної плазми.

Повна потужність розряду визначається величиною розрядного струму, оскільки падіння напруги на розрядному проміжку встановлюється автоматично залежно від тиску газу та відстані анод-катод і при зміні останніх у досить широких межах змінюється досить незначно. Регулювання розрядного струму може здійснюватися двома способами: зміною опору зварювального кола і варіюванням напруги холостого ходу джерела. Такий спосіб регулювання термічного циклу зварювання відрізняється найбільшою швидкодією і відносною простотою реалізації.

Оскільки широка номенклатура виробів, що зварюються, визначає широкий діапазон зміни умов і режимів зварювання, очевидно, складним способом буде змінюватися й ефективність нагріву, що визначається величиною ефективного ККД η_o, який також може змінюватися в досить широких межах. Це вимагає врахування цього фактора під час вибору та призначення режимів зварювання. У зв'язку з цим на підставі результатів, наведених вище, і з використанням методики, описаної в [4], побудована номограма (рис. 3) для визначення величини η_o під час нагрівання в середовищі азоту залежно від основних параметрів режиму горіння тліючого розряду – струму розряду, тиску газу і міжелектродної відстані. Оскільки, як випливає з табл. 2, коефіцієнти зв'язку цих параметрів з енергетичними характеристиками розряду в азоті і водні дуже близькі, ця номограма може із задовільною точністю застосовуватися і для оцінювання величини η_0 під час нагрівання в середовищі водню. З номограми випливає, що в діапазоні використовуваних режимів іонного нагріву величина η_0 змінюється в межах 0,6 ... 0,85, тобто майже на 30 %.

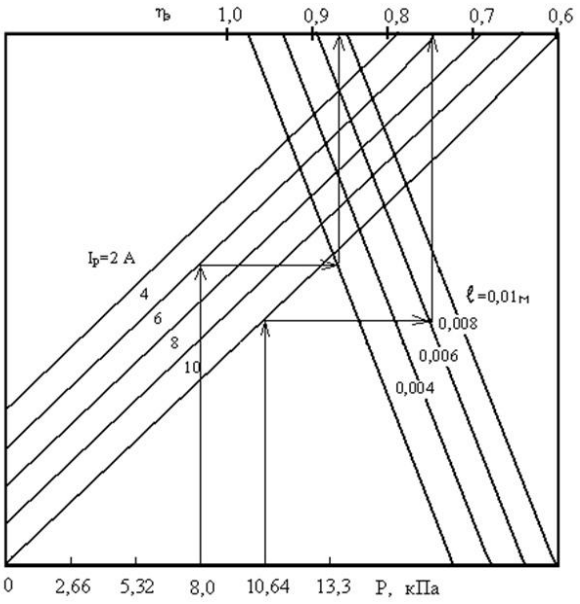


Рис. 3. Номограма для визначення величини ефективного ККД, ηо нагріву тліючим розрядом у середовищі азоту залежно від тиску газу P, струму розряду Ір і міжелектродної відстані ℓ.

Ключ номограми: $P \to I_p \to \ell \to \eta_o$

В умовах змінної номенклатури деталей, що з'єднуються і, відповідно, широкого діапазону зміни режимів нагріву і зварювання необхідно враховувати настільки помітне відхилення величини ККД під час вибору значень параметрів режиму і потужності розряду, необхідної для виконання технологічних операцій.

Висновки

1. Основними керуючими діями, що характеризують режим процесу нагріву тліючим розрядом, є струм розряду, який визначає повну потужність, що виділяється в розрядному проміжку, та тиск газу, зміною якого регулюються питомі енергетичні характеристики розряду.

2. Енергетична ефективність нагріву тліючим розрядом суттєво залежить від параметрів режиму, що необхідно враховувати під час їх призначення для конкретних технологічних процесів.

Список використаних джерел

1. *Диффузионная* сварка материалов : справочник / под ред. Н. Ф. Казакова. – М. : Машиностроение, 1981. – 271 с.

2. *Котельников Д. И.* Сварка давлением в тлеющем разряде / Д. И. Котельников. – М. : Металлургия, 1981. – 116 с.

3. *Райзер Ю. П.* Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1987. – 592 с.

4. *Болотов Г. П.* Баланс энергии на катоде тлеющего разряда / Г. П. Болотов, А. И. Сатюков // Автоматическая сварка. – 1998. – № 3. – С. 10–12.

УДК 621.791.754:51-74

И.В. Пентегов, д-р техн. наук
С.В. Рымар, д-р техн. наук
В.Н. Сидорец, д-р техн. наук
А.М. Жерносеков, канд. техн. наук
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАСПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ДУГОВОЙ СВАРКИ

І.В. Пентегов, д-р техн. наук
С.В. Римар, д-р техн. наук
В.М. Сидорець, д-р техн. наук
А.М. Жерносєков, канд. техн. наук
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДА ПРИ РІЗНИХ ВИДАХ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Igor Pentegov, Doctor of Technical Sciences
Sergey Rymar, Doctor of Technical Sciences
Vladimir Sydorets, Doctor of Technical Sciences
Anatolii Zhernosiekov, PhD in Technical Sciences
The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

EFFICIENCY OF ELECTRODE MELTING IN DIFFERENT TYPES OF THE ARC WELDING

Определены технологическая и энергетическая эффективности процесса плавления электрода при различных видах дуговой сварки сталей. Соосный упорядоченный отрыв капли расплавленного металла электрода без значительных возмущений, уменьшение теплоотвода с поверхности капли и электрода, подогрев электрода сварочным током повышают технологическую и энергетическую эффективности процесса сварки.

Ключевые слова: *дуговая сварка, сталь, скорость плавления, сварочный электрод, коэффициент расплавления, эффективность расплавления.*

Визначені технологічна та енергетична ефективності процесу плавлення зварювального електрода при різних видах дугового зварювання сталей. Співвісний упорядкований відрив краплі розплавленого металу електрода без значних збурень, зменшення тепловідводу з поверхні краплі та електрода, підігрів електрода зварювальним струмом підвищують технологічну та енергетичну ефективності процесу зварювання.

Ключові слова: *дугове зварювання, сталь, швидкість плавлення, зварювальний електрод, коефіцієнт розплавлювання, ефективність розплавлювання.*

Technological and energy efficiency of the melting process of the electrode in different types of arc welding of steels have been defined. Coaxial orderly separation droplets of molten metal electrode without significant perturbation, reduction of heat removal from the surface of the drop and the electrode, heating of the electrode by welding current increase the technological and energy efficiency of the welding process.

Key wards: *arc welding, steel, melting rate, welding electrode, melting factor, melting efficiency.*

Постановка проблемы. Определение технологической и энергетической эффективности процесса плавления сварочного электрода при различных видах дуговой сварки ста-

лей было и остается актуальной задачей. Статья продолжает исследования, начатые авторами в работах [1–4], которые посвящены выявлению основных факторов, влияющих на плавление сварочного электрода при дуговой сварке сталей, а также учету этих факторов при определении массовой скорости плавления электрода и коэффициента его расплавления.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам плавления электрода при дуговой сварке сталей посвящено много работ, в частности работы [5–7], анализ которых проведен авторами в работах [1–4].

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. В опубликованных авторами работах не затрагивались вопросы эффективности процесса плавления сварочного электрода при различных видах дуговой сварки сталей.

Целью статьи является исследование технологической и энергетической эффективности процесса плавления сварочного электрода при различных видах дуговой сварки сталей.

Скорость плавления сварочного электрода и ее аппроксимации. Зависимость массовой скорости плавления сварочного электрода G_p (производительности плавления) обычно полагается прямо пропорциональной току сварки I_{sv} [5–7]:

$$G_p = \alpha_p I_{sv}, \quad (1)$$

где α_p – коэффициент расплавления электрода.

С развитием сварочных технологий и источников питания сварочной дуги, позволяющих обеспечить регулировку сварочного тока в широких пределах, зависимость (1) не во всех случаях позволяет получить результаты, хорошо согласующиеся с опытом, особенно при малых и больших значениях сварочного тока. Коэффициент α_p, сам сложным образом зависит от многих факторов: тока сварки, его вида и полярности, наличия или отсутствия коротких замыканий, кратности тока короткого замыкания источника питания, длительности непрерывного интервала сварки, наличия импульсов тока, режима сварки, окружающей среды, положения электрода в пространстве и др. [1–4].

Массовая скорость плавления электрода определяется из баланса мощностей и может быть записана в виде:

$$G_p = \frac{P_p + P_a - P_{k,izl}}{q} = \frac{U_{ekv} I_{sv} + R I_{sv}^2 - P_{k,izl}}{q}. \quad (2)$$

Здесь P_p – активная мощность, передаваемая от дуги в каплю расплавленного металла и электрод для его расплавления, $P_p = U_{eqv} I_{sv}$, где U_{eqv} – эквивалентное напряжение дуги [3]; P_a – активная мощность, расходуемая на нагрев электрода при прохождении по нему сварочного тока, $P_a = R I_{sv}^2$, где R – активное сопротивление электрода; $P_{k,izl}$ – мощность, рассеиваемая с поверхности капли и электрода в окружающую среду конвекцией и излучением; q – удельные затраты тепла на нагрев и расплавление электродного металла, Дж/кг (см. формулу (16) работы [3]).

Тогда с учетом формулы (1) коэффициент α_p равен:

$$\alpha_p = \frac{P_p + P_a - P_{k,izl}}{q I_{sv}} = \frac{U_{ekv} + R I_{sv} - P_{k,izl} / I_{sv}}{q}. \quad (3)$$

Представим коэффициент расплавления электрода в виде аппроксимации:

$$\alpha_p = a_0 + a_1 I_{sv} - a_2 / I_{sv}, \quad (4)$$

в которой коэффициенты равны: $a_0 = U_{eq}/q$; $a_1 = R/q$; $a_2 = P_{k,izl}/q$.

При такой аппроксимации зависимость массовой скорости плавления электрода от сварочного тока примет вид:

$$G_p = a_0 I_{sv} + a_1 I_{sv}^2 - a_2. \quad (5)$$

В правой части формул (4) и (5) первое слагаемое обусловлено мощностью, передаваемой от дуги в каплю расплавленного металла и электрод, второе слагаемое – мощ-

ностью, расходуемой на нагрев электрода проходящим током, третье слагаемое – мощностью, рассеиваемой с поверхности капли и электрода в окружающую среду конвекцией и излучением.

Формулы (4) и (5) позволяют произвести анализ и оценить уровень значений величин α_p и G_p при различных видах сварки.

При подводной сварке покрытым электродом происходит интенсивный отвод тепла с его поверхности водой, поэтому коэффициент a_2 будет очень большой. Это приводит к значительному уменьшению коэффициента расплавления электрода α_p и массовой скорости его плавления G_p, делая их значения наименьшими среди всех видов сварки. В связи с этим сварочный процесс при малых токах идти не может, так как отвод тепла водой настолько велик, что вкладываемой мощности может не хватить на поддержание плавления металла. Эта одна из причин, по которой при подводной сварке [4] необходимо обеспечивать больший уровень тока, по сравнению со сваркой покрытым электродом в атмосфере [2; 3].

При сварке покрытым электродом в атмосфере, по сравнению с подводной сваркой, коэффициент a_2 уменьшается, и значения α_p и G_p возрастают.

Еще большие значения α_p и G_p наблюдаются при автоматической и механизированной сварке в среде защитных газов электродной проволокой, когда вылет электрода из мундштука, вследствие движения проволоки не успевает перегреваться, при этом снижаются потери на конвекцию и излучение с поверхности электрода и уменьшается значение коэффициента a_2.

Наибольших значений величины α_p и G_p достигают при импульсно-дуговой автоматической сварке в среде защитных газов, когда капли расплавленного металла переносятся в режиме «один импульс – одна капля» [8] (в английской версии One Pulse – One Drop). Во время паузы тока электрод практически не нагревается, время пребывания электрода и капли под сварочным током сокращается. При этом происходит резкое уменьшение потерь на конвекцию и излучение с поверхности капли расплавленного металла, сразу переносимой в сварочную ванну, и значение коэффициента a_2 оказывается пренебрежимо мало.

При автоматической и механизированной сварке в среде защитных газов электродной проволокой для приближенных расчетов можно полагать коэффициент $a_2 = 0$. При этом формула (4) хорошо согласуется с аппроксимацией, предложенной в работе [9].

Эффективность процесса плавления. Чтобы определить эффективность процесса плавления электрода запишем формулу для коэффициента полезного действия (КПД):

$$\eta_{pl} = \frac{P_p + P_a - P_{k,izl}}{P_p + P_a} = \frac{U_{ekv} I_{sv} + R I_{sv}^2 - P_{k,izl}}{U_{ekv} I_{sv} + R I_{sv}^2} = 1 - \frac{P_{k,izl}}{P_p + P_a} = 1 - \frac{P_{k,izl}}{U_{ekv} I_{sv} + R I_{sv}^2}. \qquad (6)$$

Здесь для процесса плавления электрода мощности P_p и P_a являются полезными, способствующими его плавлению, а $P_{k,izl}$ – мощностью потерь.

Анализируя формулу (6), можно заключить, что наименьшее значение КПД будет наблюдаться при подводной сварке покрытым электродом, когда с электрода осуществляется интенсивный отвод тепла водой и мощность, рассеиваемая с поверхности электрода в окружающую среду конвекцией и излучением $P_{k,izl}$ будет велика.

При сварке покрытым электродом в воздухе, по сравнению с подводной сваркой, мощность $P_{k,izl}$ будет уменьшаться, увеличивая значение КПД.

Еще большее увеличение КПД будет наблюдаться при автоматической и механизированной сварке в среде защитных газов электродной проволокой, когда вылет электрода малый, и вследствие движения, практически не нагревается, резко уменьшая тем самым величину $P_{k,izl}$.

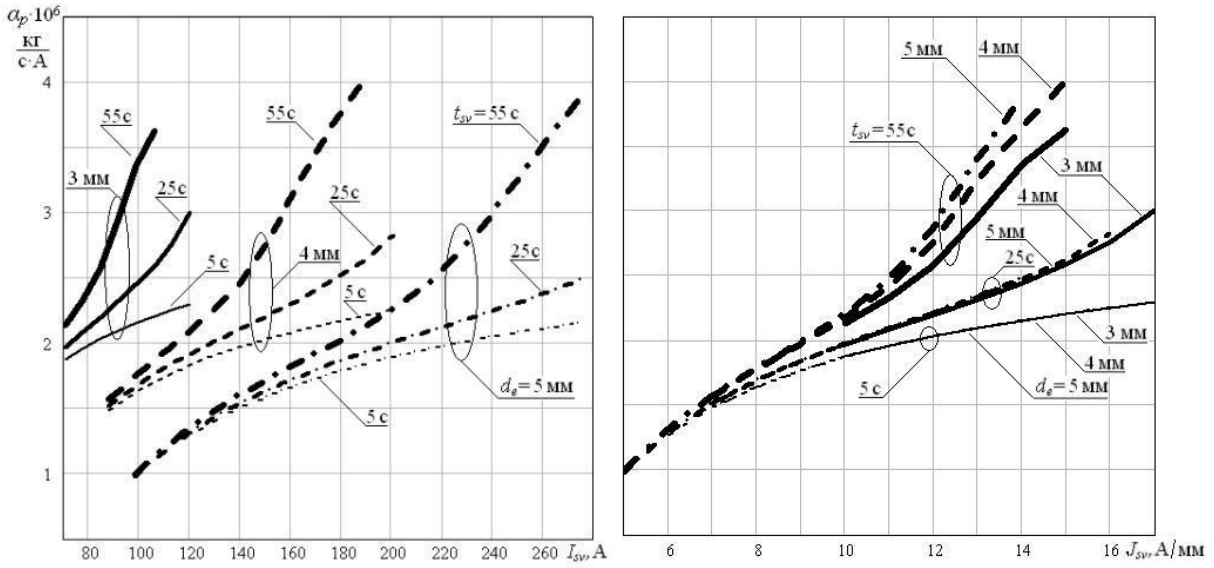
Наибольшее значение КПД принимает при импульсно-дуговой автоматической сварке в среде защитных газов, когда капли расплавленного металла переносятся в режиме «один импульс – одна капля». В этом случае величина $P_{k,izl}$ оказывается очень малой.

Формулу расчета КПД процесса плавления электрода можно записать в другом виде:

$$\eta_{pl} = \frac{G_p q}{G_p q + P_{k,izl}} = \frac{\alpha_p I_{sv} q}{\alpha_p I_{sv} q + P_{k,izl}} = \frac{1}{1 + \dfrac{P_{k,izl}}{G_p q}} = \frac{1}{1 + \dfrac{P_{k,izl}}{\alpha_p I_{sv} q}}. \quad (7)$$

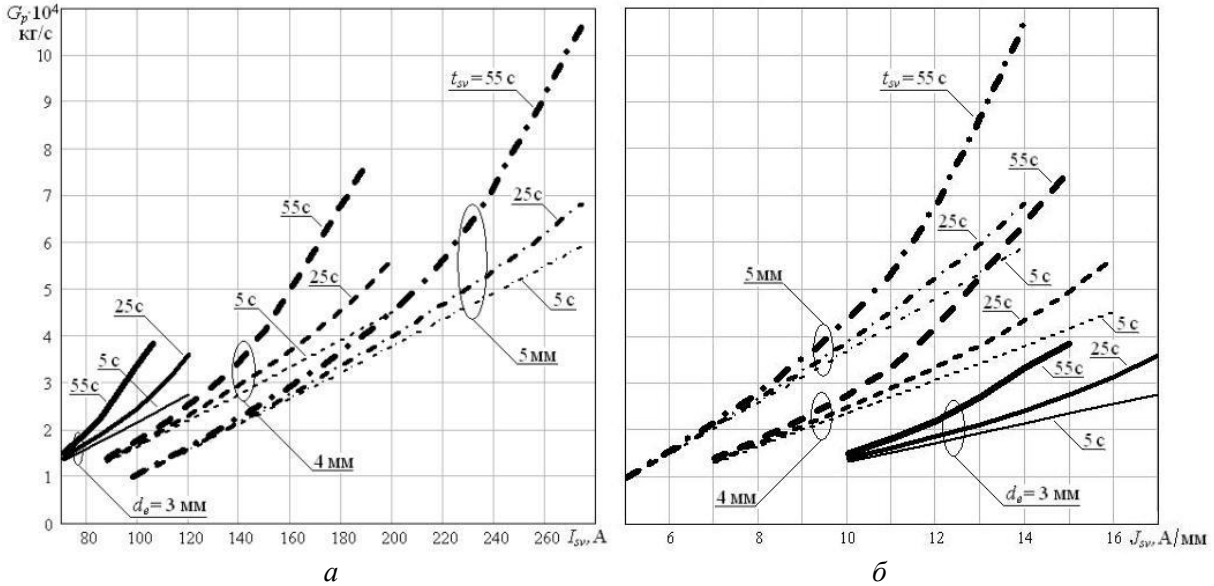
Чем больше величина G_p, тем больше будет значение КПД. Чем большее значение принимает величина $P_{k,izl}/(G_p q) = P_{k,izl}/(\alpha_p I_{sv} q)$, тем КПД становится меньше.

Анализ зависимостей. На рис. 1–3 приведены зависимости коэффициента расплавления α_p, массовой скорости плавления G_p и КПД процесса плавления η_{pl} покрытых электродов различных диаметров d_e от тока сварки I_{sv} и плотности тока в электроде J_{sv} в разные моменты времени сварки t_{sv}, полученные с применением формул из работы [3] при горизонтальном расположении покрытого электрода.



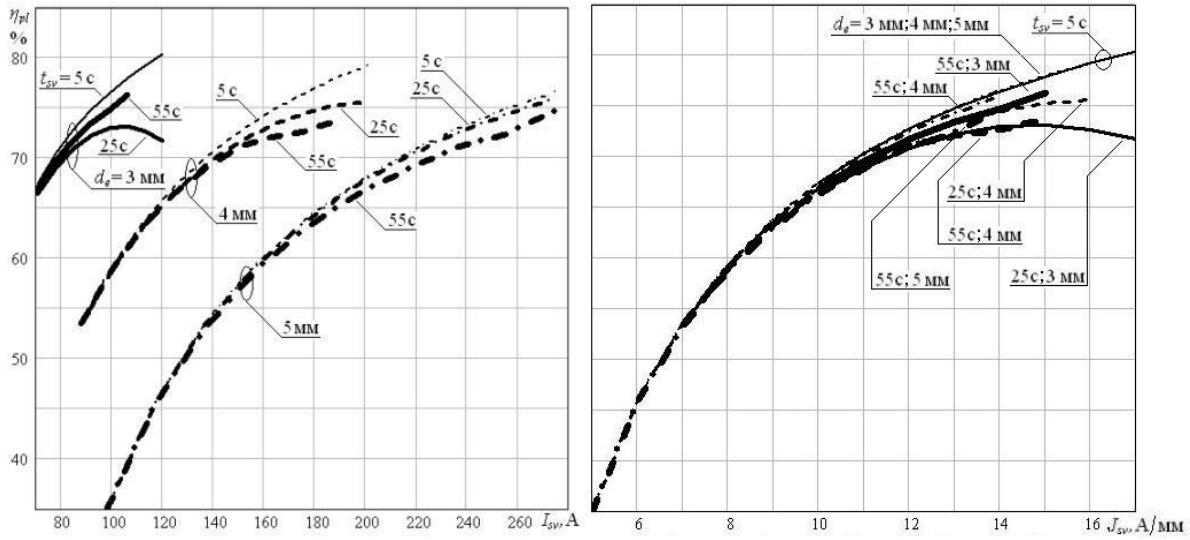
а *б*

Рис. 1. Зависимость коэффициента расплавления αр покрытого электрода от: а – тока сварки Isv; б – плотности тока в электроде Jsv



а *б*

Рис. 2. Зависимость массовой скорости плавления Gp покрытого электрода от: а – тока сварки Isv; б – плотности тока в электроде Jsv



а *б*

Рис. 3. Зависимость КПД процесса плавления ηpl покрытого электрода от: а – тока сварки Isv; б – плотности тока в электроде Jsv

Коэффициент кратности тока короткого замыкания источника питания k_{kz} = 1,6, коэффициент, учитывающий долю времени короткого замыкания $k_{t,kz}$ = 0,1, температура капли T_{kap} = 2800 *K*. На рис. 3 для электрода d_e = 3 мм начальная длина электрода составляла 30 см, для электродов d_e = 4 и 5 мм начальная длина – 40 см.

На рис. 1, *а* и 2, *а* видно, что при меньшем диаметре электрода величины α_p и G_p имеют большие значения, чем при большем диаметре электрода, и возрастают с увеличением сварочного тока I_{sv} и времени сварки t_{sv}.

Из рассмотрения рис. 3, *а* можно заключить, что при меньших диаметрах электрода значения КПД процесса плавления электрода η_{pl} при одинаковых токах выше, чем при больших диаметрах. При рассматриваемых параметрах сварочного процесса для электродов диаметром 4 и 5 мм значения КПД возрастают с увеличением тока сварки I_{sv}, причем в ранние моменты времени сварки t_{sv} КПД больше, чем в более поздние моменты времени. Это связано с увеличением мощности, отводимой с поверхности электрода при его большем нагреве с течением времени сварки. При диаметре электрода 3 мм наибольшие значения КПД также наблюдаются при меньшем времени сварки – на 5-й секунде. Немного меньшие значения оказываются на 55-й секунде. Еще меньшие – на 25-й секунде. Причем на 5-й и 55-й секундах значения КПД возрастают с увеличением тока. На 25-й секунде сварки значения КПД с увеличением тока сначала возрастает, а потом убывает. Такое поведение кривой вызвано тем, что с увеличением тока происходит нагрев электрода, увеличивающий КПД, но при дальнейшем росте тока происходит более интенсивный отвод тепла с поверхности электрода и КПД начинает уменьшаться.

Из рис. 1, *б* – 3, *б* видно, что величины α_p, G_p и η_{pl} возрастают с увеличением плотности тока в электроде J_{sv}.

Таким образом, наилучшими технологическими параметрами α_p и G_p и наибольшим КПД η_{pl} характеризуются интенсивные процессы сварки с большими плотностями тока в электроде.

На рис. 4–6 приведены зависимости коэффициента расплавления α_p, массовой скорости плавления G_p и КПД процесса плавления η_{pl} покрытых электродов различных диаметров от времени сварки t_{sv} при разных токах сварки I_{sv}.

Видно, что коэффициент расплавления электрода α_p при меньшем диаметре электрода имеет большие значения, чем при большем диаметре электрода, и возрастает с увеличением тока и времени сварки.

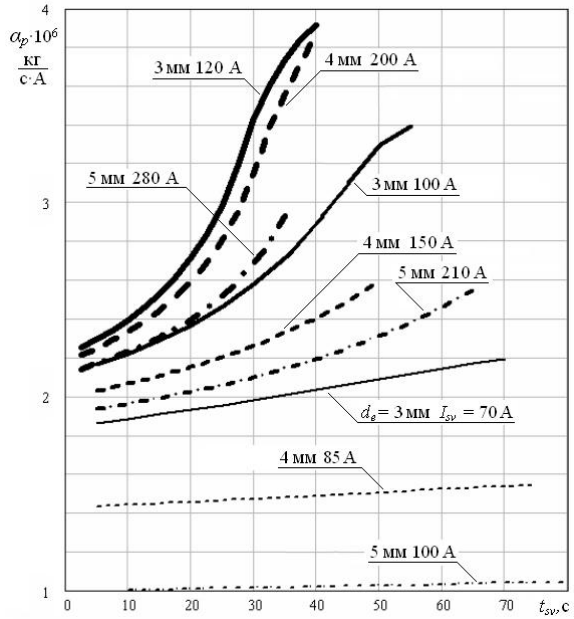


Рис. 4. Зависимость коэффициента расплавления αp покрытого электрода от времени сварки tsv

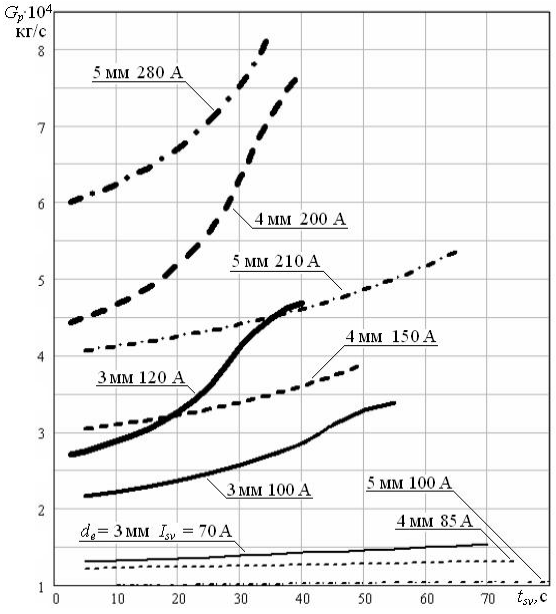


Рис. 5. Зависимость массовой скорости плавления Gp покрытого электрода от времени сварки tsv

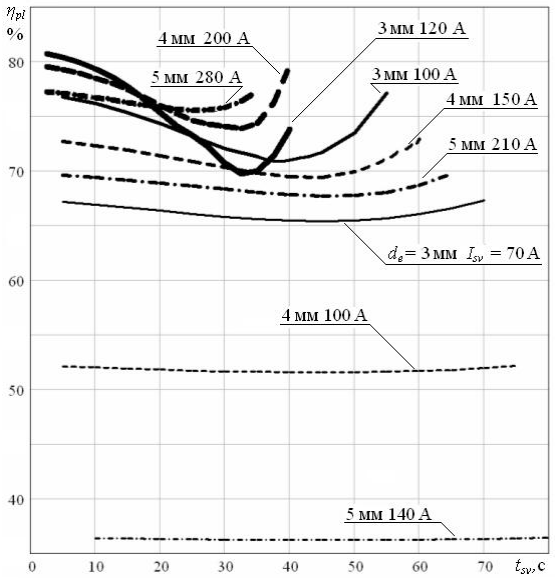


Рис. 6. Зависимость КПД процесса плавления η_{pl} покрытого электрода от времени сварки t_{sv}

Поведение зависимостей массовой скорости плавления электрода G_p сложным образом зависит от диаметра электрода, времени сварки и тока сварки. Так, при диаметре электрода 3 мм и токе 70 А значения G_p больше, чем при диаметре электрода 4 мм и токе 85 А, и еще больше, чем при диаметре электрода 5 мм и токе 100 А. Напротив, при больших токах сварки большие значения величины G_p наблюдаются при больших диаметрах электрода и больших токах. При этом во всех случаях, с течением времени, значения G_p увеличиваются.

При диаметре электрода 3 мм и токе сварки 70 А значения КПД выше, чем при диаметре электрода 4 мм и токе сварки 85 А, и еще выше, чем при диаметре электрода 5 мм и токе сварки 100 А. Еще большие значения КПД наблюдаются при диаметре электрода 3 мм и токе сварки 100 А, где они выше также значения КПД при диаметре электрода 4 мм и токе сварки 150 А, и еще выше, чем при диаметре электрода 5 мм и токе сварки 210 А.

Более сложная картина наблюдается при диаметре электрода 3 мм и токе сварки 120 А значения КПД в начальный период сварки оказываются выше, чем при диаметре электрода 4 мм и токе сварки 200 А, и еще выше, чем при диаметре электрода 5 мм и токе сварки 280 А, однако, с течением времени (с 18 секунды сварки), значения КПД для электрода диаметром 3 мм оказываются ниже значений КПД для электродов диаметром 4 и 5 мм, а для электрода диаметром 4 мм – меньше, чем для электрода диаметром 5 мм.

Для всех зависимостей КПД (рис. 6) с течением времени сварки характерно сначала уменьшение значений КПД процесса расплавления электрода, а затем их увеличение. Это связано с тем, что по мере нагрева электрода проходящим током и интенсивным отводом тепловой мощности в окружающую среду КПД уменьшается. По мере распла-

вления электрода уменьшается его длина, а соответственно и площадь его охлаждения, уменьшается доля отводимой в окружающую среду тепловой мощности, и КПД процесса расплавления увеличивается.

Таким образом, полученные формулы позволяют анализировать поведение зависимостей коэффициента расплавления α_p электрода, массовой скорости его плавления G_p и КПД процесса плавления η_{pl} покрытого электрода.

Приведем здесь так же формулу для определения КПД процесса сварки η_{sv}, которое отличается от КПД процесса плавления электрода. Для этого к мощности $P_{k,izl}$ в выражениях (6) и (7) необходимо добавить потери на испарение расплавленного металла P_ξ:

$$\eta_{sv} = 1 - \frac{P_{k,izl} + P_\xi}{P_p + P_a} = 1 - \frac{P_{k,izl} + P_\xi}{U_{ekv} I_{sv} + R I_{sv}^2} = \frac{1}{1 + \dfrac{P_{k,izl}}{G_p q} + \dfrac{P_\xi}{G_p q}} = \frac{1}{1 + \dfrac{P_{k,izl} + P_\xi}{\alpha_p I_{sv} q}}. \quad (8)$$

Потери P_ξ определяются путем умножения величины G_p на второе слагаемое правой части выражения (16) работы [3]:

$$P_\xi = G_p \xi \cdot \left(\int_{T_0}^{T_{dug}} C_p \ \theta \ d\theta + \sum_{i=k}^{5} \lambda_{Ai} + r \right), \quad (9)$$

где ξ – коэффициент, учитывающий долю испаряемого электродного металла в процессе сварки; C_p – удельная теплоемкость стали, являющаяся функцией температуры электрода θ; T_0 – температура нагрева электрода; T_{dug} – температура дуги; λ_{Ai} – удельные теплоты фазовых превращений железа; r – удельная теплота испарения железа. Заметим, что в выражении (8) отношение $P_\xi/(G_p q)$, согласно формуле (9), не зависит от величины G_p.

Визуальное наблюдение переноса металла. Процесс плавления электрода, образование капли расплавленного металла и ее поведение можно определить скоростной киносъемкой или осциллографированием напряжения и тока на дуге.

Для иллюстрации приведем фотографии скоростной киносъемки процесса плавления сварочного электрода при некоторых видах сварки, на которых видно образование капли расплавленного металла электрода, ее размер относительно электродной проволоки, поведение капли перед отрывом от электрода и ее перенос в сварочную ванну. Чем больше размер капли и чем дольше происходит ее отрыв, тем меньше КПД процесса плавления электрода из-за большого рассеяния тепловой энергии с капли в окружающую среду.

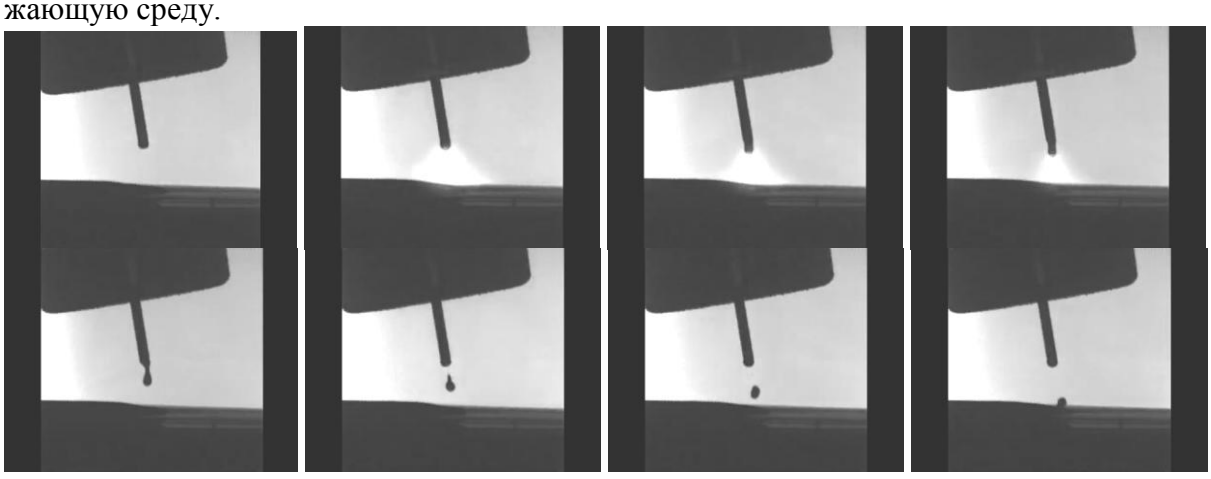


Рис. 7. Процесс переноса металла при импульсно-дуговой сварке в среде защитных газов «один импульс – одна капля» на обратной полярности [11]

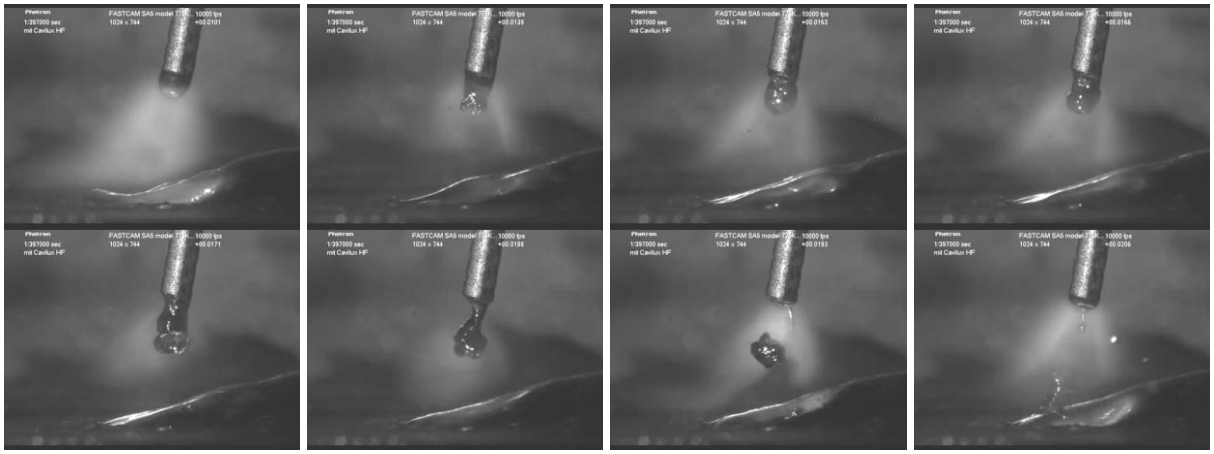


Рис. 8. Процесс переноса металла при сварке в среде защитных газов постоянным током на обратной полярности [12]

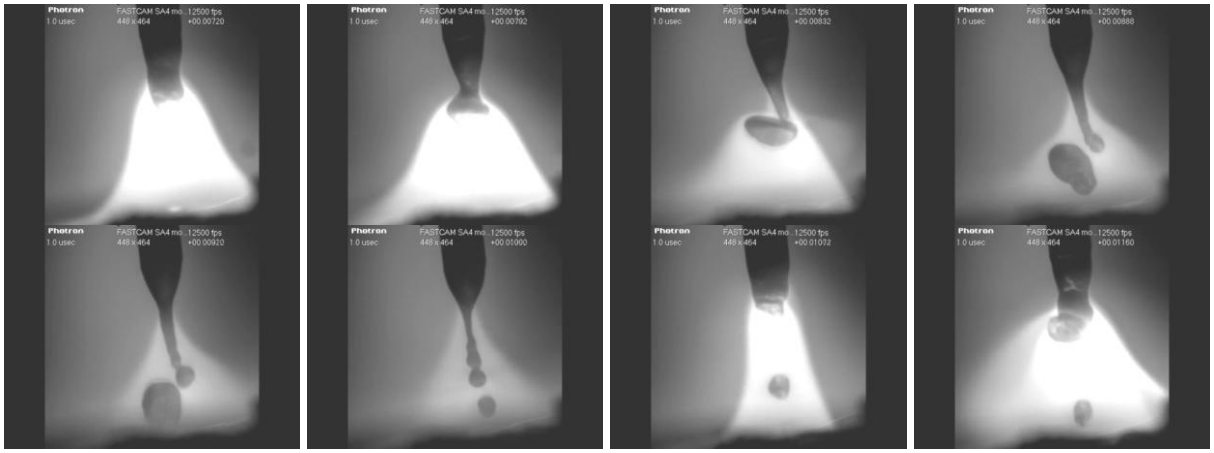


Рис. 9. Процесс переноса металла при импульсно-дуговой сварке в среде защитных газов с произвольными параметрами на обратной полярности [13]

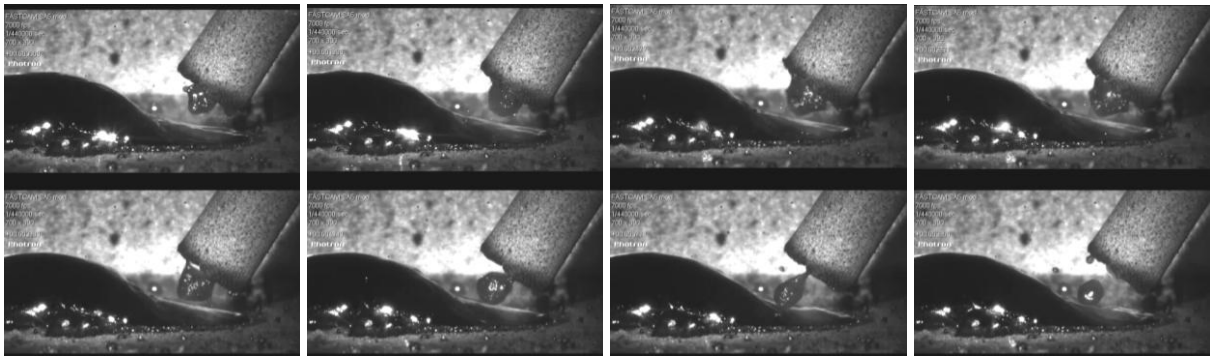


Рис. 10. Процесс переноса металла при дуговой сварке покрытым электродом [14]

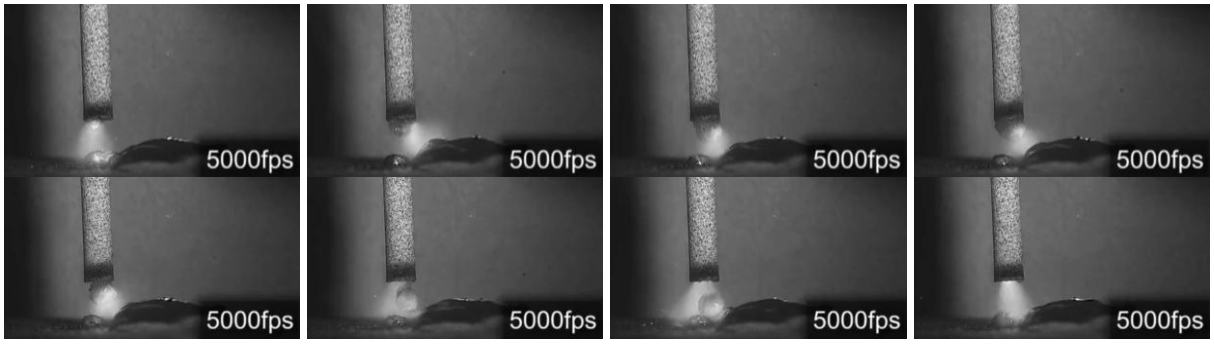


Рис. 11. Процесс переноса металла при дуговой сварке расположенным вертикально покрытым электродом [15]

С точки зрения повышения коэффициента расплавления электродного металла и КПД процесса плавления электрода очень хорошо зарекомендовала себя импульсно-дуговая сварка, особенно процесс «один импульс – одна капля». При этом процесс переноса металла электрода идет спокойно без возмущений [11], капли расплавленного металла близки по размеру, имеют малый диаметр, равный диаметру электрода, они не деформируются и рассеяние тепловой энергии с них минимально (рис. 7). Особенно это заметно при сравнении со сваркой [12] (рис. 8) и импульсно-дуговой сваркой с произвольными параметрами [13] (рис. 9). На постоянном токе наблюдается медленный отрыв капли, ее деформирование, диаметр капли больше диаметра электрода, из-за чего рассеяние тепловой энергии с них велико, что уменьшает КПД процесса плавления электрода. На указанных рисунках приведены процессы при дуговой сварке проволокой на обратной полярности в среде защитных газов.

Подобные процессы переноса металла наблюдаются и при дуговой сварке покрытым электродом (рис. 10 и 11) [14; 15].

Дальнейшие исследования плавления электрода при различных видах сварки должны быть посвящены более углубленному исследованию этих процессов.

Выводы и предложения. Полученные формулы для технологической и энергетической эффективности процесса плавления сварочного электрода при различных видах дуговой сварки сталей позволяют анализировать поведение зависимостей коэффициента расплавления электрода, массовой скорости его плавления и коэффициента полезного действия процесса плавления электрода. Процесс сварки с соосным упорядоченным отрывом капли расплавленного металла электрода, уменьшение теплоотвода с поверхности капли и электрода, подогрев электрода проходящим током повышает технологическую и энергетическую эффективность сварочного процесса. Наибольшим коэффициентом полезного действия и наилучшими технологическими параметрами (коэффициентом расплавления и массовой скоростью плавления) характеризуются интенсивные процессы сварки с большими плотностями тока в электроде.

Список литературных источников

1. *К аналитическому* определению коэффициента расплавления при дуговой сварке сталей / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорец, О. И. Петриенко, А. М. Жерносеков // Вісник ЧДТУ. Серія “Технічні науки”. – 2012. – № 2 (57). – С. 89–96.

2. *Изменение* коэффициента расплавления покрытого сварочного электрода в процессе его нагрева и плавления при дуговой сварке сталей без коротких замыканий / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорец, С. В. Рымар, О. И. Петриенко // Вісник ЧДТУ. Серія “Технічні науки”. – 2012. – № 3 (59). – С. 110–120.

3. *Расплавление* покрытого сварочного электрода при дуговой сварке сталей с короткими замыканиями / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорец, С. В. Рымар, О. И. Петриенко // Вісник ЧДТУ. Серія “Технічні науки”. – 2013. – № 1 (63). – С. 93–103.

4. *Расплавление* покрытого сварочного электрода при подводной дуговой сварке / И. В. Пентегов, С.В. Рымар, В.Н. Сидорец и др. // Вісник ЧДТУ. Серія “Технічні науки”. – 2013. – № 4 (69). – С. 65–75.

5. *Теоретические* основы сварки / В. В. Фролов, В. А. Винокуров, В. Н. Волченко и др. – М. : Высш. школа, 1970. – 592 с.

6. *Лесков Г. И.* Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 335 с.

7. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением ; под ред. акад. Б. Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.

8. *Патон Б. Е.* Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса / Б. Е. Патон, А. Г. Потапьевский, Н. В. Подола // Автоматическая сварка. – 1964. – № 1. – С. 1–6.

9. *Варуха Е. Н.* Расчет скорости плавления предварительно нагретого электрода при сварке в углекислом газе / Е. Н. Варуха // Сварочное производство. – 2012. – № 2. – С. 3–8.

10. *Особенности* расплавления электрода при дуговой сварке сталей / В. Н. Сидорец, А. М. Жерносеков, И. В. Пентегов, О. И. Петриенко // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 2. – С. 34-37.

11. *DP One* Drop per Pulse Transfer [Электронный ресурс] – Режим доступа : http://www.youtube.com/watch?v=r9ixn3p5az4.

12. *MIG* Flux Cored Welding with High Speed Camera – Photron SA5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.youtube.com/watch?v=MRIGks3gxG0&feature= related.

13. *Photron* Highspeed Movie Schweiβen, Impulslichtbogen [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.youtube.com/watch?v=DVLhZxvzYzc&feature=relmfu.

14. *Welding* with Cavitar CAVILUX HF – High Speed Movie [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.youtube.com/watch?v=je8VghtYo5o&list=PL10AE97B5D 796F606.

15. *Laser* Illuminated Weld [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.youtube.com/ watch?v=AU8X4MxcGJ4.

УДК 621.791:666.1.037.42

Л.Я. Березін, канд. техн. наук
Т.Р. Ганєєв, канд. техн. наук
Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ВУЗЛІВ МІДЬ-АЛЮМІНІЙ-СИТАЛ

Л.Я. Березин, канд. техн. наук
Т.Р. Ганеев, канд. техн. наук
Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ УЗЛОВ МЕДЬ-АЛЮМИНИЙ-СИТАЛЛ

Leonid Berezin, PhD in Technical Sciences
Timur Hanieiev, PhD in Technical Sciences
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

FEATURES OF WELDING TECHNOLOGY OF COPPER-ALUMINUM-SITALL UNITS

Запропоновано особливості технології виготовлення у твердій фазі вузлів мідь-алюміній-ситал з використанням дифузійного зварювання у вакуумі та зварювання в електричному полі.

Ключові слова: *технологія, зварювання, тверда фаза, мідь, алюміній, ситал.*

Предложены особенности технологии изготовления в твердой фазе узлов медь-алюминий-ситалл с использованием диффузионной сварки в вакууме и сварки в электрическом поле.

Ключевые слова: *технология, сварка, твердая фаза, медь, алюминий, ситалл.*

Are offered features manufacturing technology nodes to the solid phase copper-aluminum-sitall using diffusion welding in vacuo and welding in the electric field.

Key words: *technology, welding, solid phase, copper, aluminum, glass ceramics.*

Постановка проблеми. У деяких сучасних електронних та іонних приладах є необхідність отримання прецизійних вузлів при температурах, що не перевищують задану межу. Наприклад, приєднання мідних анодів до ситалового корпусу лазерних гіроскопів, де температура отримання нероз'ємного з'єднання не повинна перевищувати 723 К. Використання дифузійного зварювання у вакуумі (ДЗВ) не дозволяє вирішити поставлене завдання. Так, для отримання з'єднань неметалів (ситали, кварцове скло, кераміки) з міддю температура зварювання повинна бути значно більше 723 К (у більшості випадків вона більше 1000 К). При цьому товщина міді повинна бути не більше 0,5 мм, що пов'язано з виникненням великих зварювальних напружень. Поява цих напружень в основному викликана різницею в ТКЛР матеріалів, що зварюються, та товщиною металу. Чим вища температура зварювання, тим більше негативний вплив вказаних факторів [1].

Вирішити питання, що розглядається, могло б дозволити використання зварювання в електричному полі (ЗЕП) високої напруги [2].

Мета та завдання роботи. Метою цієї роботи було встановлення можливості отримання в твердій фазі вакуумщільних вузлів ситалу СО-115М з міддю товщиною не менше 1,5 мм при температурах зварювання, що не перевищують 723 К з використанням ДЗВ та ЗЕП. Для досягнення поставленої мети вирішувалися три завдання:

1) отримання з'єднання ситал-мідь напряму;

2) поетапне отримання з'єднання ситал-мідь з використанням проміжної прокладки з використанням ДЗВ і ЗЕП;

3) отримання з'єднання ситал-мідь з використанням проміжної прокладки з використанням ДЗВ і ЗЕП за один технологічний цикл.

Виклад основного матеріалу досліджень. На першому етапі роботи дослідження щодо отримання зварних з'єднань ситал-мідь напряму (без проміжної прокладки) при температурах зварювання $T_{зв} \leq 723$ К дали негативний результат. ЗЕП відбувається в атмосфері повітря при нормальному атмосферному тиску. В цих умовах під час нагріву на поверхні міді утворюється окис міді, який не дозволяє створити якісного зварного з'єднання.

На другому етапі роботи проводилися дослідження щодо отримання зварного з'єднання ситал-мідь з використанням проміжної прокладки та використання ДЗВ і ЗЕП. За проміжну прокладку був використаний алюміній марки А999 (ГОСТ 11069–71), як матеріал, що має непогану здатність до дифузійного зварювання у вакуумі з безкисневою міддю марки МБ (ГОСТ859-66) та гарну деформаційну здатність (табл.).

Таблиця

Властивості матеріалів, що зварювалися [3; 4; 5]

Матеріал	Властивість				
	$E \cdot 10^3$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\alpha \cdot 10^7$, $К^{-1}$	$T_{пл}$, К
СО-115М	93,8	100	–	2,5 – 6 (323К – 693 К)	–
МБ	11,5	200-240	45-55	170 (293 – 393 К)	1356
А999	7,1·10	50	49	276,8 (293 – 773 К)	933,2

Процес отримання зварного з'єднання ситал-мідь з використанням проміжної алюмінієвої прокладки був розділений на два етапи:

1 – отримання вузла мідний виріб (анод) – алюмінієва прокладка з використанням ДЗВ;

2 – зварювання вузла мідь-алюміній з ситаловим корпусом приладу з використанням ЗЕП.

Для реалізації першого етапу було випробувано деякі рекомендовані варіанти режимів зварювання ДЗВ [1] у діапазонах: температура зварювання $T_{зв}$ = 673 – 873 К; питомий тиск зварювання $P_{зв.пит.}$= 5 – 10 МПа; витримка при температурі зварювання і під тиском $t_{зв}$ = 10 – 60 хв; величина вакууму $1{,}3 \cdot 10^{-1}$ – $1{,}33 \cdot 10^{-3}$ Па. Цей етап зварювання включав технологічні операції: вхідний контроль матеріалів, що зварювалися; механічне оброблення та знежирення поверхонь, що будуть зварюватися; складання вузла; відпалювання міді; зварювання; контроль якості. Відпрацювання оптимального режиму ДЗВ мідь-алюміній проводилося на зразках-імітаторах з наступними механічними випробуваннями на розтяг (рис. 1). Товщина алюмінію перед ДЗВ з міддю була 0,7±0,1 мм. Як основний режим ДЗВ для реальних вузлів був вибраний: $T_{зв}$ = 698±5 К; $P_{зв.пит.}$= 10 МПа; $t_{зв}$ = 10 хв; вакуум $2{,}7 \cdot 10^{-2}$ Па. Для вказаного режиму зварювання міцність з'єднань на розтяг була не менше 30 МПа, що задовольняє технічним умовам на виготовлення багатьох приладів.

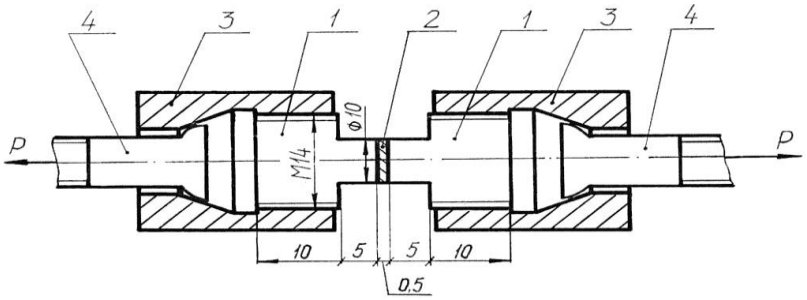


Рис. 1. Схема випробувань зразків-імітаторів для визначення оптимального режиму ДЗВ мідь-алюміній: 1 – зразки з міді; 2 – алюмінієва прокладка; 3 – гайка; 4 – гвинт з шаровою опорою

Для відпрацювання режимів ДЗВ з реальним мідним виробом (анод лазерного гіроскопа) використовувався пристрій, що зображено на рис. 2.

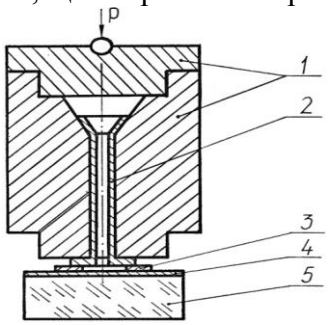


Рис. 2. Пристосування для дифузійного зварювання анода з алюмінієвою прокладкою: 1 – пристосування; 2 – анод; 3 – алюмінієва прокладка; 4 – алюмінієва фольга; 5 – кварцовий столик

На другому етапі проводили ЗЕП в атмосфері повітря мідно-алюмінієвого вузла з ситаловим корпусом з такою послідовністю технологічних операцій: знежирення, травлення і механічне оброблення поверхні алюмінію під зварювання з ситалом; хімічне очищення ситалу (рекомендації щодо очищення ситалу перед ЗЕП наведено в [6]); складання вузла; зварювання; контроль якості. Режими зварювання та особливості технології відпрацьовувалися на макетах (рис. 3). ЗЕП алюміній-ситал виконували без компенсаційного кільця та з компенсаційним кільцем для зменшення залишкових напружень у зоні утворення зварного з’єднання.

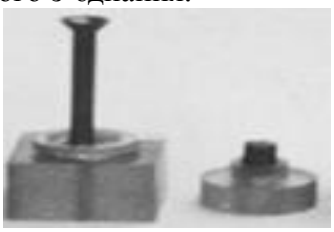


Рис. 3. Вид макетів для відпрацьовування режимів зварювання

Відпрацювання режимів ЗЕП алюміній-ситал проводилося з використанням механічних випробувань на відрив. Одна із схем проведення таких випробувань наведена на рис. 4.

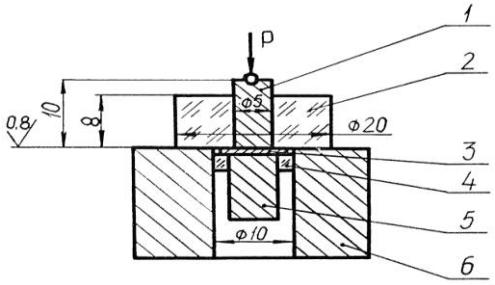


Рис. 4. Схема моделі вузла для проведення механічних випробувань на відрив: 1 – пуансон; 2 – ситал; 3 – алюмінієва прокладка; 4 – компенсаційне кільце; 5 – деталь з міді; 6 – опора

Як основний режим ЗЕП для реальних вузлів був вибраний: $T_{зв}$ = 603±5 К; $P_{зв.пит.}$= 10 -15 МПа; густина струму $(4–5)\cdot10^{-3}$ mA·мм$^{-2}$; $t_{зв}$ = 10 хв. Для вказаного режиму зварювання міцність з'єднань на відрив була не менше 20 МПа.

Для зменшення питомого тиску зварювання при ЗЕП та покращення якості зварювання проводилося попереднє оброблення тиском (пресування) опорної поверхні алюмінію, що буде контактувати з поверхнею ситалового корпусу з використанням металевих полірованих шайб зі сплаву типу ВК та кварцового скла марок КВ. Дослідження показали, що використання кварцових шайб (рис. 5), поверхня яких була відполірована до $R_a \le 0,02$ мкм, дозволяє отримати більш якісну (дзеркальну) поверхню алюмінію з погляду величини мікрошорсткості поверхні. Перед обробленням тиском проводилося хімічне очищення алюмінію в ацетоні і розчині їдкого натру з наступним освітленням в азотній кислоті. Товщина алюмінію після пресування і перед ЗЕП знаходилася в межах 0,5–0,55 мм.

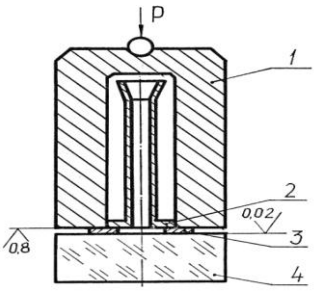


Рис. 5. Пристосування для пресування алюмінієвої прокладки: 1 – пуансон; 2 – анод; 3 – алюмінієва прокладка; 4 – матриця (кварцове скло)

Для всіх елементів та етапів зварювання проводився контроль якості [7]:

– *Попередній*:

✓ контроль геометричних розмірів деталей, що входять до складу вузла;

✓ контроль мікрошорсткості поверхонь, що зварюються (шорсткість поверхонь міді і алюмінію під ДЗВ повинна бути $R_a \le 20$ мкм за ГОСТ 2789-73, шорсткість поверхні алюмінію під ЗЕП з ситалом повинна бути $R_a \le 0,1$ мкм, а поверхні ситалу $R_a \le 0,02$ мкм);

✓ контроль залишкових напружень у ситалі перед ЗЕП повинні бути не більше 0,2 МПа (вибірково);

✓ контроль якості очищення поверхонь, що зварюються;

– *Проміжний*:

✓ дотримання величин усіх параметрів режиму зварювання для ДЗВ і ЗЕП (для ЗЕП особливо густини повного струму та спаду густини струму);

✓ контроль експлуатації зварювального обладнання (вибірково);

– *Заключний контроль*:

✓ механічні випробування на відрив;

✓ візуальний огляд звареного вузла неозброєним оком та за допомогою лупи;

✓ металографія;

✓ повторні нагріви до заданих температур (для окремих макетів та для реальних зварних конструкцій);

✓ термоудари в камері тепла та холоду (для окремих макетів та для реальних зварних конструкцій);

✓ механічні діяння на вібростенді (для окремих макетів та для реальних зварних конструкцій);

✓ механічні удари на ударному стенді (для окремих макетів та для реальних зварних конструкцій);

✓ поляризаційно-оптичні обстеження вузлів (для окремих макетів та для реальних зварних конструкцій);

✓ перевірка на вакуумщільність (для окремих макетів та для реальних зварних конструкцій).

Враховуючи прецизійність реальних вузлів і приладів, велика увага повинна приділятися етапу підготовки деталей вузлів і відповідному технологічному оснащенню. Так, наприклад, під час виготовлення вузла анода лазерних гіроскопів непаралельність поверхонь алюмінієвої прокладки під ДЗВ з міддю і ЗЕП з ситалом повинна бути не більше 0,05 мм на довжині 100 мм. Товщина алюмінієвої прокладки під ДЗВ – 0,7±0,05 мкм, а перед ЗЕП – 0,5±0,1 мм. Механічне оброблення поверхонь алюмінієвої прокладки і мідного анода під ДЗВ доцільно проводити в пристосуваннях, що зображені на рис. 6.

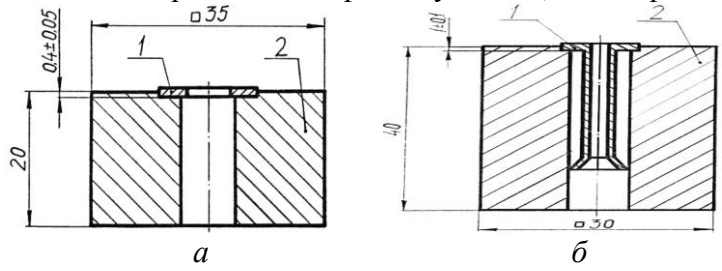


Рис. 6. Пристосування для механічного оброблення поверхонь: а – для алюмінієвої прокладки; б – для мідного анода; 1 – деталь, що обробляється, 2 – пристосування

Для зварювання реальних об'єктів (приварювання вузла мідний анод-алюмінієва прокладка до ситалового моноблока лазерного гіроскопа) використовувався спеціальний кондуктор (рис. 7).

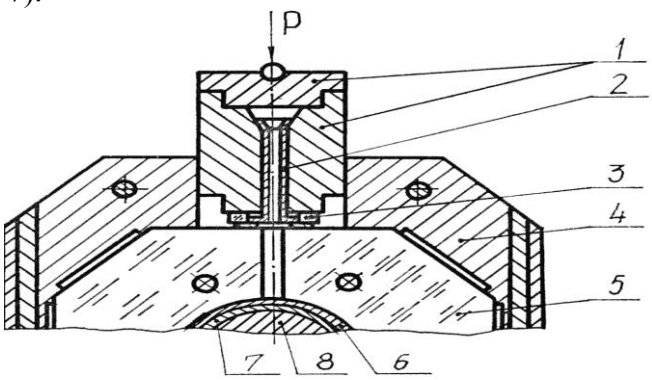


Рис. 7. Кондуктор для зварювання в електричному полі анода з моноблоком: 1 – пристосування для вузла анод-алюмінієва прокладка – перший електрод; 2 – вузол анод-алюмінієвої прокладки; 3 – компенсаційне кільце; 4 – кондуктор; 5 – моноблок; 6 – підкладка; 7 – підкладка з алюмінієвої фольги; 8 – другий електрод

Дослідження та випробування макетів та реальних об'єктів показали можливість використання поетапного варіанта отримання якісних вузлів мідь-алюміній-ситал та промислового його використання. Для напрацьованих режимів зварювання та при забезпеченні всіх технологічних особливостей процесу було досягнуто в 100 % випадках дотримання технічних вимог до реальних вузлів після відповідних випробувань. Режими зварювання обираються відповідно до форми, розмірів та властивостей елементів вузла. Всі етапи процесу отримання вузлів мідь-алюміній-ситал у два етапи реалізуються на відповідному зварювальному обладнанні (установки для дифузійного зварювання та зварювання в електричному полі) [8] та технологічному оснащенні.

Для отримання з'єднання ситал-мідь через проміжну прокладку з використанням ДЗВ і ЗЕП за один технологічний цикл було розроблено спеціалізоване зварювальне обладнання – комбінована установка, яка дозволяє проводити на ній ДЗВ і ЗЕП [8]. У

зварювальну установку відразу завантажується вузол мідь-алюміній-ситал. Усі елементи вузла проходять попередню підготовку, як і для двоетапного зварювання. На першій стадії процесу зварювальна установка працює в режимі дифузійного зварювання міді з алюмінієм. Одночасно, під час витримки, відбувається оброблення тиском поверхні алюмінію, що контактує з поверхнею ситалового елемента вузла. При цьому величина зовнішнього тиску підбирається достатньою для ДЗВ міді з алюмінієм та забезпечення утворення фізичного контакту алюміній-ситал перед наступною стадією процесу – ЗЕП алюмінію з ситалом. Зварювання в електричному полі відбувається за режимами, як і для двоетапного зварювання після зменшення температури до заданої величини. Роботи в цьому напрямку, які проводилися тільки для макетів, дали позитивні результати. Під час цих досліджень була встановлена можливість отримання вузлів мідь-алюміній-ситал за один технологічний цикл в одну стадію за рахунок поєднання процесів ДЗВ і ЗЕП. Однак потрібні додаткові дослідження для зниження температури на першій стадії зварювання з використанням ДЗВ (відпалювання міді) до допустимих значень згідно з технічними вимогами ($T_{зв} \leq 723$ К).

Висновки

1. Розглянуто можливі варіанти отримання герметичних з'єднань мідь-алюміній-ситал з використанням дифузійного зварювання у вакуумі та зварювання в електричному полі.

2. Проаналізовано можливість промислового застосування технології поетапного зварювання мідних анодів із ситаловим корпусом приладу через алюмінієву прокладку в два етапи: отримання вузла мідь-алюміній з використанням дифузійного зварювання у вакуумі і зварювання вузла мідь-алюміній з використанням зварювання в електричному полі.

3. Охарактеризовано технологічні особливості і наведено практичні рекомендації для отримання зварних з'єднань мідь-алюміній-ситал як на етапі проведення досліджень, так і для реальних промислових умов.

4. Показано можливість отримання з'єднання ситал-мідь через проміжну алюмінієву прокладку з використанням ДЗВ і ЗЕП за один технологічний цикл на спеціалізованій зварювальній установці.

Список використаних джерел

1. *Диффузионная* сварка материалов : справочник / под ред. Н. Ф. Казакова. – М. : Машиностроение, 1981. – 271 с.

2. *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.

3. *Материалы* в машиностроении. Выбор и применение / под ред. Л. П. Лужникова. – М. : Машиностроение, 1967. – Т. 1. – 304 с.

4. *Структура* и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов : справочник / З. Н. Арчакова, Г. А. Балахонцев, И. Г. Басова и др. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1984. – 408 с.

5. *Физические* свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц и др. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.

6. *Березін Л. Я.* Вплив хімічного очищення поверхні ситалу на якість з'єднання з алюмінієм зварювання в електростатичному полі / Л. Я. Березін, С. В. Олексієнко, Т. М. Недей // Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки». – Чернігів, 2004. – № 21. – С. 102–111.

7. *Березін Л. Я.* Критерії якості зварювання в електричному полі високої напруги / Л. Я. Березін // Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки». – Чернігів, 2013. – № 1 (63). – С. 103–111.

8. *Березін Л. Я.* Обладнання для проведення процесу зварювання в зовнішніх електричних полях високої напруги / Л. Я. Березін // Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки». – Чернігів, 2013. – № 2 (65). – С. 94–103.

УДК 621.791.75

Е.В. Лаврова, канд. техн. наук
ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Украина

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАПЛАВКИ ПОД ФЛЮСОМ ЛЕНТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ С УПРАВЛЯЕМЫМ ПЕРЕНОСОМ ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА

О.В. Лаврова, канд. техн. наук
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ ПІД ФЛЮСОМ СТРІЧКОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ З КЕРУЮЧИМ ПЕРЕНЕСЕННЯМ ЕЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛУ

Olena Lavrova, PhD in Technical Sciences
State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», Mariupol, Ukraine

DEVELOPMENT OF THE DEVICE FOR SUBMERGED ARC WELDING WITH STRIP ELECTRODE WITH CONTROLLED ELECTRODE METAL TRANSFER

Усовершенствован механизм наплавки под флюсом ленточным электродом, обеспечивающий управляемый перенос электродного металла путем введения новых операций, что приводит к повышению качества наплавленной поверхности. Предлагаемый метод заключается в том, что ленточный электрод изгибают по оси перпендикулярно оси подачи электрода и при воздействии на выступ пружинным механизмом преобразуют непрерывную (постоянную) скорость подачи ленточного электрода в импульсное движение торца электрода.

Ключевые слова: *наплавка, лента, электрод, металл, скорость, капля.*

Удосконалено механізм наплавлення під флюсом стрічковим електродом, що забезпечує кероване перенесення електродного металу за допомогою введення нових операцій, що приводить до підвищення якості наплавленої поверхні. Запропонований метод полягає в тому, що стрічковий електрод згинають по осі перпендикулярно осі подачі електрода і при впливі на виступ пружинним механізмом перетворюють непреривну (постійну) швидкість подачі стрічкового електрода в імпульсний рух торця електрода.

Ключові слова*: наплавлення, стрічка, електрод, метал, швидкість, крапля.*

Improved mechanism for surfacing submerged strip electrode that provides controlled transfer of electrode metal by introducing new operations, which leads to higher quality build-up surface. The proposed method is that the tape electrode izgbayut axis perpendicular from the feed axis of the electrode, and when exposed to the ledge spring mechanism converts nepreryvanuyu (constant) flow rate in the strip electrode pulse movement of the electrode tip.

Key words: *facing, tape, electrode, metal, velocity, drop.*

Постановка проблемы. Предлагаемые в настоящее время способы управляемого переноса электродного металла с торца электрода требуют дополнительных затрат и источников электроэнергии. Механические способы принудительного переноса электродного металла отличаются простотой и практически не требуют дополнительной энергии. Если для проволочных электродов механические способы нашли применение, то для ленточного такие решения отсутствуют. Поэтому разработка кинематической схемы и конструкции устройств для наплавки под флюсом ленточным электродом с принудительным механическим переносом электродного металла, позволяющие регулировать амплитуду колебаний торца электрода и обеспечивать равномерность наплавки по всей ширине валика является актуальной научной задачей.

Анализ последних достижений и публикаций. Однако, несмотря на имеющиеся данные о преимуществах применения механизмов импульсной подачи электродной проволоки, они не получили широкого распространения. Причиной этого является недостаточные для длительного периода эксплуатации надежность механизмов, невозможность получения для ряда механизмов импульсов с требуемыми для эффективного массопереноса характеристиками (шагом, частотой, ускорением) [1–4].

Известно устройство [2] для реализации способа дуговой сварки плавящимся электродом, в котором электродную проволоку с помощью приводных роликов и сварочной горелки подают в зону сварки с периодическими увеличениями скорости подачи, а между подающими роликами установлен механизм импульсной подачи в виде корпуса с

пазом, две стойки которого параллельны одна другой, а третья, размещенная между ними, подвижна, электродную проволоку пропускают через указанный паз и изгибают в нем в сторону подвижной стенки, а увеличение скорости подачи производят путем импульсного перемещения подвижной стенки в сторону проволоки до ее выпрямления.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Для наплавки под флюсом ленточным электродом важна не только импульсная подача, но и частота колебаний торца ленточного электрода, а также другие факторы, обеспечивающие принудительный сброс металла для равномерного распределения тепловой энергии в сварочной ванне.

Существует механизм импульсной подачи электродной проволоки с регулированием параметров импульсов [3], содержащим направляющие для электрода (основание), токоподвод, два модулятора с эксцентриками, имеющими достаточно близкие значения эксцентриситетов, расположенные оппозитивно относительно друг друга, что дает возможность максимально сбалансировать механизм. Однако основной проблемой рассматриваемого механизма является регулирование параметров принудительного переноса капли. Такие данные позволят уточнить физические процессы, лежащие в основе наблюдаемых явлений, и управлять этими процессами.

Цель статьи. Главной целью этой работы является создание устройств для наплавки ленточным электродом под флюсом с принудительным механическим переносом электродного металла, в котором за счет изменения формы элементов достигается контролируемый сброс электродного металла, соответственно контролируемое оплавление ленточного электрода и распределение тепловой энергии в сварочной ванне, что позволит повысить качество наплавленных изделий с помощью более простого и надежного устройства.

Изложение основного материала. Схема устройства представлена на (рис. 1) и состоит из: ленточного электрода (1), направляющих для ленточного электрода (2) и (4), кулачкового механизма (3), вращающихся подающих роликов (5) с радиусом *r* и эксцентриситетом *e*, пружины (6).

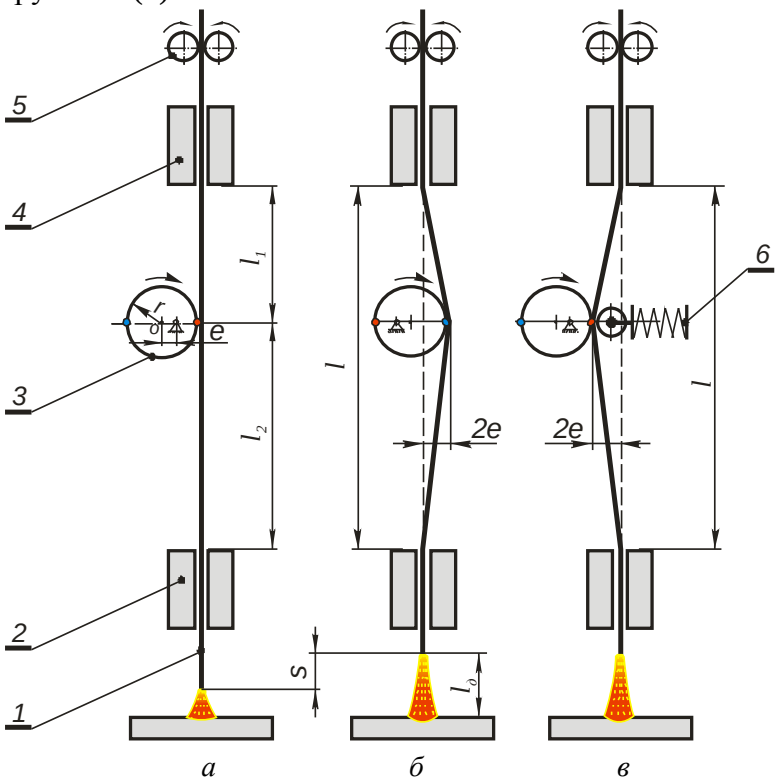


Рис. 1. Устройство для наплавки ленточным электродом под флюсом: а – начальное положение кулачка без изгиба ленточного электрода; б – изгиб ленточного электрода на величину, равную 2е; в – возвратное действие ленточного электрода за счет пружины на величину 2е

На (рис. 1, *а*) показано начальное положение ленточного электрода, при котором ленточный электрод испытывает нагрузки в трех точках с плечами l_1 и l_2. Перегиб ленточного электрода осуществляется в точках выхода из направляющих и под влиянием кулачкового механизма в положении, когда эксцентриситет *е* касается ленточного электрода.

После того, как кулачек начинает совершать вращательные движения, ленточный электрод принимает положение (рис. 1, *б*), где ленточный электрод под действием кулачка прогибается на расстояние *2е* и испытывает перегиб в двух точках с плечом *l*, а торец ленточного электрода осуществит возвратно-поступательное движение на расстояние *s* с увеличением длины дуги до величины $l_д$.

В случае возвратного изгиба ленточного электрода пружиной (6) после прогиба кулачковым механизмом (рис. 1, *в*), ленточный электрод осуществит изгиб на расстояние *2е* с плечом *l*.

Для получения расчетного алгоритма оценки параметров колебаний торца ленточного электрода, согласно предложенному устройству, составим кинематическую схему его, приняв некоторые упрощения реальных взаимодействий всех звеньев устройства (рис. 2).

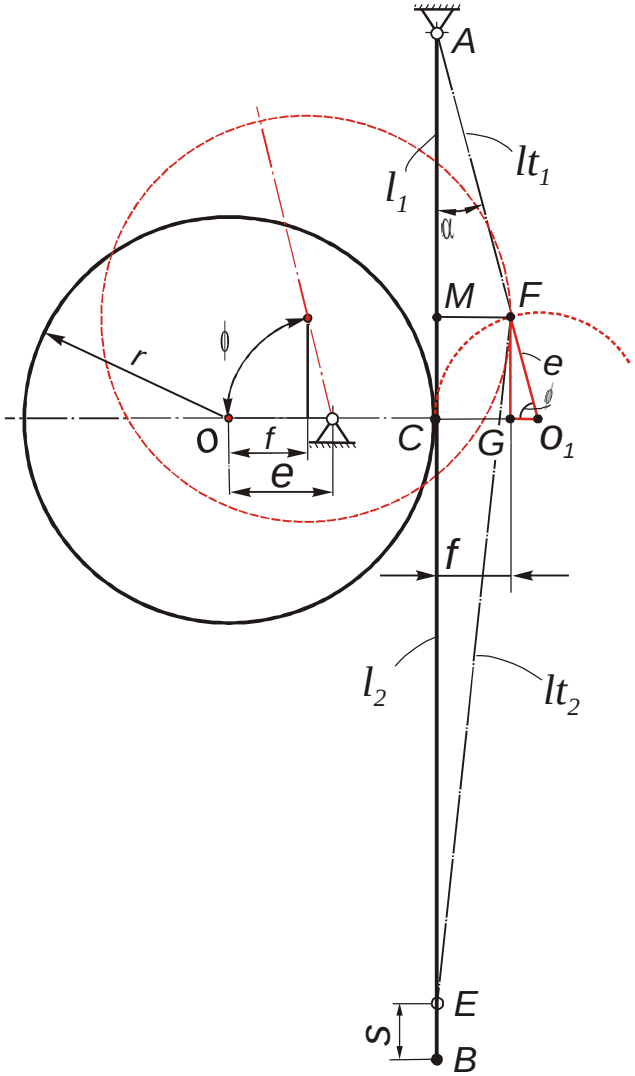


Рис. 2. Кинематическая схема устройства

Кулачек с радиусом *r* и величиной эксцентриситета *е* осуществляет вращательные движения на угол φ с перемещением на расстояние f, при этом касание кулачка с ленточным электродом произойдет в точке *С*. При таком положении кулачкового механизма образуются плечи l_1 и l_2.

При повороте кулачкового механизма происходит касание с ленточным электродом в точке *F* на расстоянии от основания до точки *M*. Постоянство контакта кулачкового механизма с электродом обеспечивается за счет сил упругости изогнутого электрода.

При повороте кулачкового механизма за время *t* на угол φ происходит изменение начальной стрелки прогиба электрода на величину *f(t),* а точка касания кулачкового механизма с ленточным электродом переместится в точку *F*. Ленточный электрод отклоняется на угол α по отношению к основанию устройства и образуются плечи l_{t1} и l_{t2} (рис. 1).

В результате работы такой системы устройства торец ленточного электрода осуществляет перемещение на расстояние *S* из точки *B* торец в точку *E*.

Для получения стабильного процесса переноса расплавленного металла в сварочную ванну необходимо выбрать такие параметры колебательного процесса, чтобы при заданных режимах наплавки обеспечивался сброс капель электродного металла за каждый цикл колебания.

Тогда масса сбрасываемой капли будет определяться в зависимости от выбранной кинематической схемы возбуждения колебаний конца ленты (рис. 1), размерных конструктивных параметров устройства и скорости вращения возбудителя колебаний: $m_k = m_e / n_c$ (n_c – скорость вращения кулачкового механизма, об/с; m_e – масса расплавленного металла, г).

Очевидно, что при анализе эффективности тех или иных параметров управления процессом массопереноса электродного материала, рассматриваемого здесь устройства, наибольший интерес вызывает получение максимального ускорения движения торца электрода и, следовательно, максимальной силы отрыва капли.

Таким образом, предлагаемое устройство позволяет: обеспечить принудительный перенос электродного металла с регулируемой частотой колебаний торца ленточного электрода и использовать способ принудительного механического переноса электродного металла при наплавке под флюсом ленточным электродом; изменять угол изгиба ленточного электрода, что позволяет регулировать амплитуду колебаний торца ленточного электрода. В результате чего обеспечивается равномерность наплавки по всей ширине ленточного электрода, что позволяет повысить качество наплавленных деталей и снизить вероятность появления дефектов.

Выводы. Разработано устройство, позволяющее: обеспечить принудительный перенос электродного металла с регулируемой частотой колебаний торца ленточного электрода и использовать способ принудительного механического сброса капель; изменять угол изгиба ленточного электрода, что позволяет регулировать амплитуду колебаний торца ленточного электрода. Предложена методика расчета кинематических параметров механического управляемого переноса при наплавке ленточным электродом под слоем флюса.

Список использованных источников

1. *Патон Б. Е.* Анализ технических и технологических возможностей импульсной подачи электродной проволоки в процессах дуговой сварки и наплавки / Б. Е. Патон, В. А. Лебедев // Сварочное производство. – 2002. – № 2. – С. 24–31.

2. *Лебедев В. А.* Механизмы импульсной подачи электродной проволоки с регулированием параметров импульсов / В. А. Лебедев, В. Г. Пичак // Автоматическая сварка. – 2001. – № 5. – С. 31–37.

3. *Патент* 44885 Україна. МПК B23K 9/12 Спосіб широкошарового наплавлення під флюсом стрічковим електродом / О. Лаврова, Б. Носовський. – № u 2008 10823 ; заявл. 01.09.2008 ; опубл. 26.10.2009, Бюл. № 20.

4. *Носовский Б. И.* Разработка методики выбора параметров наплавки ленточным электродом с принудительным механическим переносом жидкого металла / Б. И. Носовский, Е. В. Лаврова // Автоматическая сварка. – 2011. – № 3. – С. 30–33.

УДК 621.791:658.588

А.С. Миленин, канд. техн. наук
Е.А. Великоиваненко, канд. физ.-мат. наук
Г.Ф. Розынка, науч. сотр.
Н.И. Пивторак, науч. сотр.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина

АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ СВАРОЧНОЙ НАПЛАВКЕ ДЕФЕКТА УТОНЧЕНИЯ

О.С. Міленін, канд. техн. наук
О.А. Великоіваненко, канд. фіз.-мат. наук
Г.П. Розинка, наук. співроб.
Н.І. Півторак, наук. співроб.
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

АНАЛІЗ ГРАНИЧНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВІДНОГО ЕЛЕМЕНТУ ПРИ ЗВАРЮВАЛЬНОМУ НАПЛАВЛЕННІ ДЕФЕКТУ СТОНШЕННЯ

Aleksey Milenin, PhD in Technical Sciences
YelenaVelikoivanenko, PhD in Physical and Mathematical Sciences
Galina Rozynka, researcher
Nina Pivtorak, researcher
Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF PIPELINE ELEMENT LIMIT STATE AT WELDING SURFACING OF LOCAL THINNING DEFECT

На основе современных представлений о зарождении и развитии разрушения материалов при сварке разработан комплекс математических моделей сварочной наплавки дефектов локальной потери металла в рамках ремонтно-восстановительных работ на магистральных трубопроводах под давлением. На примере наплавки типичного дефекта утончения стенки трубопровода продемонстрировано влияние основных параметров ремонта на технологическую прочность конструкционного элемента и эффективность восстановления его несущей способности.

Ключевые слова: *магистральный трубопровод, ремонт без вывода из эксплуатации, наплавка дефекта утончения, оптимизация, математическое моделирование.*

На основі сучасних уявлень про зародження та розвиток руйнування матеріалів під час зварювання розроблено комплекс математичних моделей зварювального наплавлення дефектів локальної втрати металу в межах ремонтно-відновлювальних робіт на магістральних трубопроводах під тиском. На прикладі наплавлення типового дефекту стоншення стінки трубопроводу продемонстровано вплив основних параметрів ремонту на технологічну міцність конструкційного елемента та ефективність відновлення його несучої здатності.

Ключові слова: *магістральний трубопровід, ремонт без виведення з експлуатації, наплавлення дефекту стоншення, оптимізація, математичне моделювання.*

On the basis of up-to-date conceptions of nucleation and development of material fracture at welding the complex of mathematical models of deposit welding of local metal loss within the limits of repair operations on pressurized main pipelines, has been developed. Exemplified with deposit welding of typical pipeline wall thinning defect, the influence of main repair parameters on the construction unit technological strength and effectiveness of its bearing capacity renewal, has been shown.

Key words: *main pipeline, in-service repair, deposit welding of local metal loss, optimization, mathematical modeling.*

Введение. Обеспечение бесперебойной работы магистральных трубопроводов (МТ) сопряжено с необходимостью регулярного проведения процедур технической диагностики фактического состояния конструкций и соответствующих ремонтно-восстановительных работ. В частности, одним из самых распространённых эксплутационных повреждений МТ являются дефекты локальной потери металла, которые при существенном развитии коррозионных процессов могут вызвать значительное снижение несущей способности конструкции. Использование для устранения такого рода дефектов сварочной наплавки позволяет производить ремонт МТ без вывода его из эксплуатации, что, наряду с экономическими и экологическими преимуществами, имеет характерные сложности. К последним следует отнести необходимость гарантирования высокого уровня безопасности проведения сварочных работ, что препятствует широкому внедрению такого рода технологических подходов в комплексе процедур поддержания работоспособности МТ.

Среди существующих критериев оптимизации сварочных процессов при наплавке дефектов МТ под давлением можно выделить два основных подхода: обеспечение прогревания внутренней поверхности трубы не выше критической температуры $T_к$=720–980 °С и гарантирование отсутствия существенного избыточного выпучивания стенки в процессе локального нагрева $dr_к$<1 мм [1]. Оба эти подхода являются достаточно консервативными, но не учитывают ряд важных параметров ремонта, требующих оптимизации и позволяющих максимально эффективно использовать преимущества ремонта МТ без вывода из эксплуатации. В рамках настоящей работы на основе современных методов математического моделирования реализованы подходы численного анализа предельного состояния трубопроводного элемента под внутренним давлением в процессе многопроходной наплавки трёхмерного поверхностного дефекта, а также предложены критерии для оптимизации параметров этого технологического процесса.

Математическая модель процесса сварочной наплавки поверхностного дефекта утончения стенки трубопровода. Для учёта специфики процессов, определяющих безопасность проведения сварочных работ при наплавке дефекта утончения на поверхности трубопровода, находящегося под внутренним давлением, необходима реализация комплекса математических моделей, позволяющих описать кинетику температурного, напряжённо-деформированного и повреждённого состояния металла конструкции. Ключевым аспектом такого численного исследования является анализ формирования предельного состояния материала конструкции согласно обоснованным критериям для оптимизации технологических параметров ремонтных работ.

Моделирование сварочной наплавки производилось путём совместного решения пространственной задачи теплопроводности и краевой задачи нестационарной термопластичности, которое позволяет прослеживать кинетику температурного поля при сварочном нагреве и развитие упруго-пластических деформаций с момента начала наплавки вплоть до остаточного состояния после полного остывания конструкции [2]. При высоких температурах и в отсутствие острых геометрических концентраторов основным механизмом зарождения несплошности материала конструкции является вязкое разрушение, которое заключается в зарождении и развитии микропор материала при интенсивном пластическом течении и последующем формировании макродефектов. Изменение несущего нетто-сечения металла при внешних нагрузках, близких к предельным, необходимо дополнительно учитывать при формулировке задачи нестационарной термопластичности, что в настоящей работе было реализовано посредством использования критерия текучести согласно модели Гурсона-Твергаарда-Нидлмана [3] и дополнительным компонентом в суммарных расчётных деформациях [4]:

$$\begin{cases} \Psi = \dfrac{1}{2\cdot G}, \text{ если } \sigma_i < \sigma_s = \sigma_T \cdot \sqrt{1 + q_3 \cdot f^{*\,2} - 2\cdot q_1 \cdot f^* \cdot \cosh\left(q_2 \cdot \dfrac{3\cdot\sigma_m}{2\cdot\sigma_T} \right)}, \\ \Psi > \dfrac{1}{2\cdot G}, \text{ если } \sigma_i = \sigma_s \end{cases}$$

где Ψ – функция состояния материала, определяемая итерированием для удовлетворения условия пластического течения; G – модуль сдвига; σ_i – интенсивность напряжений; σ_m – мембранные напряжения; f^* – эквивалентная объёмная концентрация пор вязкого разрушения с учётом их взаимодействия [3].

Условие зарождения пор вязкого разрушения объёмной концентрации f в неизотермическом случае с учётом химической неоднородности конструкционного материала может быть сформулировано, исходя из формулы Франклина и критического значения параметра Одквиста κ, следующим образом [4]:

$$f = \begin{cases} 0 \text{ при } \chi_\kappa = \int \dfrac{\mathrm{d}\kappa}{\kappa_c \ T} < \alpha_{AK}, \\ 0{,}054 \cdot \left(\text{S } \% - \dfrac{0{,}001}{\text{Mn } \%} \right) \text{при } \chi_\kappa \geq \alpha_{AK}, \end{cases}$$

где $\kappa_c \ T \ \rightarrow \kappa_{c0} \cdot \exp\left\{ \left[\dfrac{\sigma_T - \sigma_T \ T}{B} \right]^\beta \right\}$ – критическое значение параметра Одквиста; σ_T – предел текучести металла; [S]%, [Mn]% – процентное содержание серы и марганца в стали, соответственно; α_K=0,0÷1,0 – коэффициент, характеризующий относительное снижение прочности металла в области поверхности контакта неметаллических включений с металлической матрицей; T – температура в рассматриваемой области конструкции; κ_{c0}, B, β – константы.

Рост пор вязкого разрушения при пластическом деформировании металла количественно описывается законом Райса-Трейси [5]:

$$\mathrm{d}f = f \cdot K_1 \cdot \exp\left(K_2 \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_i} \right) \mathrm{d}\varepsilon_i^p,$$

где ε_i^p – интенсивность пластических деформаций; K_1, K_2 – константы.

Таким образом, условие нарушения целостности стенки МТ при сварочной наплавке по механизму пластической неустойчивости несплошного материала может быть математически выражено следующим образом [4]:

$$\left(\Psi - \frac{1}{2G} \right)_{KP} \geq \frac{\varepsilon_f - \kappa^*}{1{,}5 \cdot \sigma_i} \approx \frac{\varepsilon_f - \kappa^*}{1{,}5 \cdot \sigma_s \ \ \kappa, T}, \qquad (1)$$

где κ^* – параметр Одквиста на предыдущем шаге прослеживания деформаций; ε_f – предельная деформация металла [3].

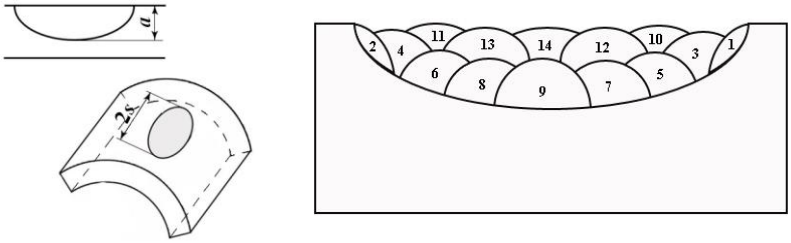
Кроме того, значительное развитие пористости материала по вязкому механизму вызывает существенное увеличение истинных напряжений в металле конструкции и, как результат, её разрушение; поэтому с целью формулировки удобного для численного анализа критерия может быть добавлено дополнительное к (1) следующее условие недопустимого состояния металла:

$$1 + \ q_3 \cdot f^{*\ 2} - 2 \cdot q_1 \cdot f^* \cdot \cosh\left(q_2 \cdot \frac{3 \cdot \sigma_m}{2 \cdot \sigma_T} \right) \rightarrow 0. \qquad (2)$$

Использование численного критерия (1)–(2) в рамках конечно-элементного решения совместной задачи неизотермической термопластичности и развития вязкого разрушения позволяет прогнозировать появление участков конструкции с недопустимой склонностью к пластической неустойчивости. Кроме того, дополнительно необходимо учитывать тот факт, что в области дефекта утончения после его устранения посредством сварочной наплавки при режимах с существенным тепловложением, в результате избыточного радиального деформирования трубы $\mathrm{d}r_{max}$ может сформироваться дефект формы, снижающий прочность трубопровода.

Результаты и обсуждение. Использование данного подхода позволяет оценить влияние на технологическую прочность МТ при наплавке дефекта таких параметров, как мощность сварочного источника, внутреннее давление при ремонте P_r, минимальная температура остывания металла после наложения валиков T_{min}. В качестве примера был рассмотрен типичный дефект коррозионного утончения $2s \cdot a$=70·10 мм на внешней

поверхности трубопровода $D{\cdot}t$=1420·20 мм (рис. 1, *а*) из стали 17Г1С с максимальным эксплуатационным давлением P=7 МПа. Температура предварительного подогрева места наплавки для предотвращения появления холодных трещин $T_{пр}$=100 °С. Порядок наложения валиков приведен на рис. 1, *б*.



а б

Рис. 1. Схема дефекта утончения стенки трубопровода (а) и порядок наложения валиков при сварочной наплавке (б)

Расчёт кинетики напряжённо-деформированного состояния конструкции в процессе сварочной многопроходной наплавки позволил проследить состояние конструкции вплоть до остаточного состояния. Распределение напряжений после ремонта в области наплавленного дефекта отличается существенной неоднородностью (рис. 2), что обусловлено, прежде всего, поэтапным ассиметричным изменением профиля конструкции при наложении каждого из валиков.

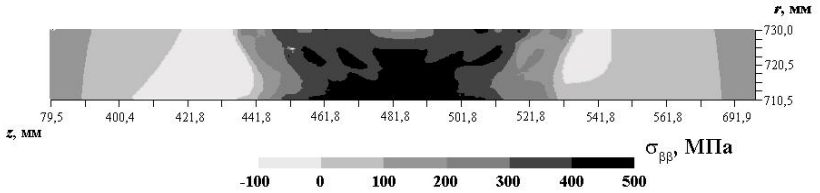
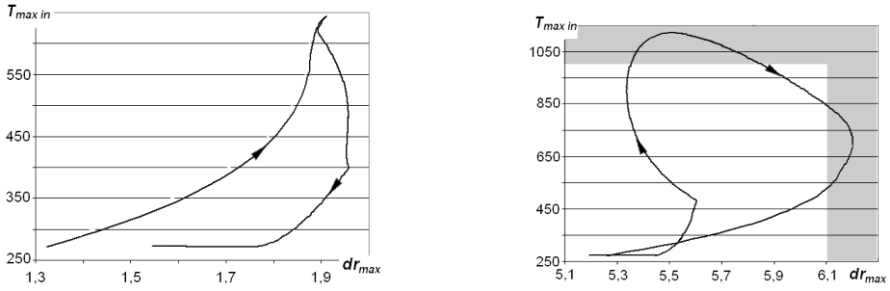


Рис. 2. Распределение остаточных тангенциальных напряжений $\sigma_{\beta\beta}$ в области дефекта утончения стенки магистрального трубопровода после сварочной наплавки

Оценка предельного состояния МТ при наплавке согласно разработанной методике показала меньшую консервативность в сравнении с существующими подходами. Так, соотношение между максимальным выпучиванием стенки dr_{max} и максимальной температурой внутренней поверхности $T_{max\,in}$ при наложении центрального валика (рис. 3, *а*) для допустимых согласно рекомендованным режимам сварочных токов I и внутренних давлений P_r удовлетворяет все критерии допустимости. Большая мощность сварочного нагрева и внутреннее давление вызывают недопустимый перегрев внутренней поверхности и избыточную деформацию стенки МТ (рис. 3, *б*), но при этом условие пластической неустойчивости (1)–(2) не выполняется. Это объясняется тем, что P_r не является параметром оптимизации согласно критерию оценки $T_к$, поэтому диапазон давлений выбран максимально консервативно.



а *б*

Рис. 3. Зависимости избыточного радиального перемещения стенки МТ dr_{max} от максимальной температуры внутренней поверхности $T_{max\,in}$ при наплавке валика на дефект утончения: (а) – I=100 А, P_r=4 МПа; (б) – I=150 А, P_r=7 МПа

Выполнение критерия (1)–(2) возможно при избыточном перегреве в области сварки, т. е. при чрезмерно высокой температуре T_{min}. Если петля деформаций в температурном цикле при наложении валиков недостаточна для значительного снижения деформаций выпучивания, это может вызвать либо снижение коэффициента запаса n прочности трубопровода в результате неблагоприятного остаточного деформированного состояния в области наплавки (дефекта формы), либо пластическую неустойчивость и разрушение стенки трубопровода в процессе ремонта (табл.).

Таблица

Влияние некоторых технологических параметров наплавки на предельное и остаточное состояния трубопровода

№ режима	P_r, МПа	I, А	Минимальная температура остывания T_{min}, °С	Снижение n в результате образования дефекта формы
1	4	100	300	1–2,227/2,254=0,012
2	4	100	500	1–2,213/2,254=0,018
3	7	100	300	1–2,137/2,254=0,052
4	7	150	300	1–2,077/2,254=0,079
5	7	150	500	разрушение

На рис. 4 приведена двупараметрическая *I-P*-диаграмма предельного состояния участка МТ с рассматриваемым дефектом в зависимости от внутреннего давления в трубопроводе при ремонте и сварочного тока при наплавке рассматриваемого дефекта. Из этой диаграммы видно, что использование критерия (1)–(2) с учётом возможной недопустимости остаточного деформирования стенки трубы в области наплавки с позиции снижения её несущей способности является наиболее рациональным: при относительно небольшом тепловложении и значительном внутреннем давлении избыточное радиальное деформирование оказывает большее влияние на остаточное состояние конструкции в сравнении с процессами вязкого разрушения, тогда как при увеличении мощности источника нагрева пластическая неустойчивость металла конструкции является наиболее важным фактором, определяющим предельное состояние конструкции.

Рис. 4. I-P-диаграмма предельного состояния участка МТ при наплавке дефекта: 1 – по условию пластической неустойчивости; 2 – по остаточному состоянию

Выводы

1. Построены математические модели и комплекс средств компьютерного моделирования кинетики полей температур, деформаций, напряжений при многопроходной сварочной наплавке дефекта локального утончения стенки МТ при ремонте под давлением. Предложены критерии предельного состояния трубопровода при наплавке, основанные на условиях пластической неустойчивости металла и избыточном деформировании стенки трубы в условиях совместного температурно-силового воздействия на область дефекта.

2. Показано, что существующие критерии оптимизации ремонта МТ сварочной наплавкой объективно более консервативны в сравнении с предложенным подходом, т. к.

не рассматривают ряд важных технологических параметров, таких как внутреннее давление в трубопроводе при ремонте, степень остывания области дефекта в процессе многопроходной наплавки, параметры предельного состояния материала конструкции.

3. На примере типичного дефекта утончения стенки трубопровода продемонстрированы характерные особенности предельного состояния конструкции и технологические параметры, допустимые с точки зрения безопасности и качества ремонта наплавкой на МТ под давлением. Показано, что варьирование сварочного тока и внутреннего давления при наплавке изменяет характер предельного состояния, что является эффективным инструментом оптимизации ремонтно-восстановительных работ как с позиции безопасности сварки на действующем МТ, так и с точки зрения гарантирования необходимого остаточного ресурса трубопровода после ремонта.

Список использованных источников

1. *Kiefner J. F.* Pipeline repair manual / J. F. Kiefner, W. A. Bruce, D. R. Stephens. – Houston : Technical Toolboxes, Inc., 1994. – 167 p.

2. *Махненко В. И.* Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – К. : Наукова думка, 2006. – 618 с.

3. *Tvergaard V.* Material failure by void growth to coalescence / V. Tvergaard // Advances in Applied Mechanics. – 1990. – № 27. – P. 83–151.

4. *Моделирование* процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях / Е. А. Великоиваненко, Г. Ф. Розынка, А. С. Миленин, Н. И. Пивторак // Автоматическая сварка. – 2013. – № 9. – С. 26–31.

5. *Карзов Г. П.* Физико-механическое моделирование процессов разрушения / Г. П. Карзов, Б. З. Марголин, В. А. Швецова. – СПб. : Политехника, 1993. – 391 с.

РОЗДІЛ V. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 167.23:612.821(045)

В.Д. Кузовик, д-р техн. наук
А.Д. Гордєєв, магістр
Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

МЕТОДИКА ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ГОЛОВНОГО МОЗКУ

В.Д. Кузовик, д-р техн. наук
А.Д. Гордеев, магистр
Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Viacheslav Kuzovyk, Doctor of Technical Sciences
Artem Hordieiev, master
National Aviation University, Kyiv, Ukraine

PLANNING METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL RESEARCHERS OF PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE OF THE BRAIN

Запропоновано методику реалізації експериментальних електроенцефалографічних досліджень головного мозку, яка дозволяє отримати результати вимірювань, що можуть бути використані для підвищення достовірності оцінювання психофізіологічного стану відділів головного мозку. Розроблену методику експериментально реалізовано на базі кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини.

***Ключові слова**: електроенцефалографія, психофізіологія, ЕЕГ, методика.*

Предложено методику реализации электроэнцефалографических исследований головного мозга, которая позволяет получить результаты измерений, что могут быть использованы для повышения достоверности оценивания психофизиологического состояния отделов головного мозга. Данную методику экспериментально реализовано на базе кафедры биокибернетики и аэрокосмической медицины.

***Ключевые слова**: электроэнцефалография, психофизиология, ЭЭГ, методика.*

Proposed methodology of electroencephalography cortex research, allows get measurements results that could be useful for increase evaluation quality of psychophysiology neurohumoral and cortex condition. This methodology experimentally conducted in the Biocybernetic and aerospace medicine department.

***Key words**: electroencephalography, psychophysiology, EEG, method.*

Постановка проблеми. Сучасна медицина орієнтована на впровадження неінвазивних засобів діагностики захворювання органів людини. Електроенцефалограф – один із засобів неінвазивних досліджень відділів кори головного мозку (КГМ) людини. Результати експлуатації доводять, що електроенцефалографи в основному забезпечують отримання якісних характеристик психофізіологічного стану відділів КГМ. Це спричинено певними обмеженнями на характеристики біосигналу, а саме: мізерні значення амплітуди (U), частоти (f) та латентності сигналу (τ). Крім того, динаміка біосигналів електроенцефалографа характеризується як стохастичний процес.

Визначення об'єктивних кількісних характеристик біосигналу надає можливість діагностувати та прогнозувати психофізіологічний стан (ПФС) організму людини. Для отримання об'єктивних кількісних характеристик біосигналу КГМ сплановано та реалізовано методику дослідження психофізіологічного стану кори головного мозку людини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективність використання кількісних характеристик біосигналу для діагностики кори головного мозку показують дослідження таких авторів. А. Г. Поворинський [1] зазначає, що зміна параметрів електроенцефалограми характеризує поточний стан здоров'я внутрішніх органів організму людини, а також кори головного мозку. Д. Сівер [2] зазначає, що при стимуляції людини світлом у першій фазі отриманих сигналів перехідних процесів може відбуватися пониження ам-

плітуди виміряного біосигналу КГМ, що відображає погіршення стану роботи органів зору. Інший учений Н. Н. Яхно [3] зазначає, що перші фази отриманих сигналів перехідних процесів відображають стан роботи зорового апарату, а подальші фази – стан роботи лімбічної системи і структур мозку, через які проходить сигнал зорового стимулу. Останні дослідження [4; 5; 6; 7] також показують можливість діагностики психофізіологічного стану КГМ на основі виміряних біопотенціалів мозку.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Завдяки розвитку інформаційно-діагностичної галузі науки методики реалізації діагностування кори головного мозку людини за допомогою кількісних параметрів біосигналів, виміряних на корі головного мозку людини, потребують більш детальної алгоритмізації та структуризації.

Мета статті. Головною метою статті є реалізація інженерного аналізу щодо сучасних електроенцефалографічних досліджень та висвітлення запропонованої методики реалізації експериментальних досліджень з метою збору, зберігання та оброблення кількісних значень біосигналів, виміряних на корі головного мозку людини.

Виклад основного матеріалу. Загальний алгоритм методики реалізації експериментальних досліджень структурно представлений на рис. 1. До цього алгоритму входять такі етапи:

– заповнення спеціальної карточки оператора;
– класифікація оператора за категорією темпераменту;
– визначення умов реалізації експериментальних досліджень;
– реалізація електроенцефалографічного дослідження у двох режимах:
  а) фоновий запис біосигналів;
  б) запис біосигналу в динаміці;
– формування бази даних (БД).

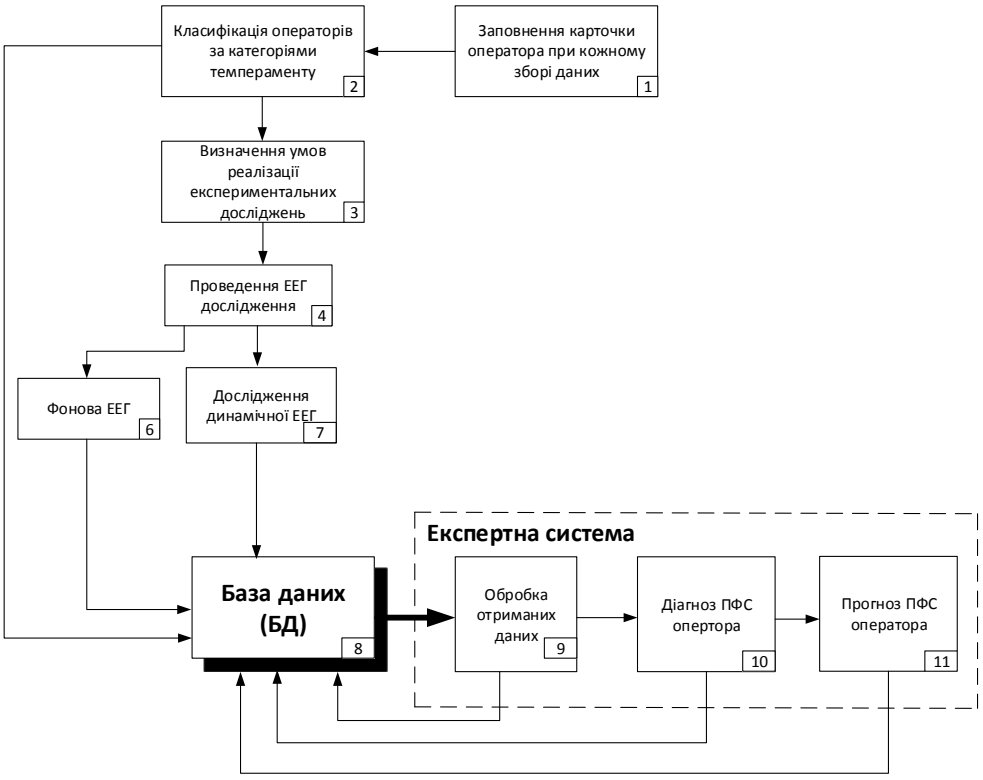


Рис. 1. Алгоритм проводження експерименту в електроенцефалографії

Отримані результати експериментальних досліджень є основою для побудови експертних систем оцінювання стану здоров’я оператора.

Формування біосигналів КГМ, які вимірюються за допомогою електроенцефалографа, мають певні особливості, які необхідно враховувати під час реалізації експериментального дослідження. Мозок є складною 6-шаровою структурою, яка управляє органами людини за допомогою інформативно насичених біосигналів. Внутрішні прошарки мозку, а саме лімбічна система, за допомогою інтероцептивних шляхів інтегрують у собі інформацію про роботу організму на рівні фізіології і психіки оператора та відображають цю інформацію в біосигналах КГМ оператора. Тому оброблення біосигналів КГМ дає можливість виділити діагностичну інформативну складову ПФС оператора.

Відділи КГМ характеризуються певними сигналами біоритмів, які умовно позначаються, як α; β; γ; δ; κ; μ; σ; θ. Для сигналів біоритмів притаманні такі характеристики [8]:

– середня амплітуда, $U_{\text{ритм}}$=(0 ÷ 500)мкВ;
– ефективна частота, $f_{\text{ритм}}$=(0 ÷ 100)Гц;
– частотний спектр ритму (наприклад, для α-ритму f_{α}=(8 ÷ 13)Гц);
– фаза ритму $\varphi_{\text{фон}}$=(0 ÷ 360)°;
– латентність ритму $\tau_{\text{фон}}$=(0 ÷ 200)мс;
– зональна активність (наприклад, α-активність зосереджена в потиличній частині КГМ);
– ступінь модуляції (повторюваність ритму в одному каналі електроенцефалограми);
– амплітудна і частотна асиметрія (порівняння $U_{\text{ритм}}$ та $f_{\text{ритм}}$ з різними відділами КГМ).

Для реалізації клінічних досліджень [1] необхідно приділити особливу увагу підготовці оператора до експерименту.

Перед початком реалізації експериментальних досліджень формується картка оператора, яка розділена на дві підгрупи:

– дані, що збираються одноразово (містять у собі: соціальні та антропометричні дані, поточні захворювання, тип темпераменту оператора);

– дані, що збираються перед кожним дослідженням (розділені на три пункти: дані експерименту, поточний стан оператора, поточні фактори зовнішнього середовища).

Наступний етап методики полягає у психологічному досліджені, яке проводиться за тестами [9; 10]:

– тест Айзенка – дослідження психотипу оператора;
– тест Томського опитувальника ригідності (ТОР) – дослідження параметрів ригідності;
– тест «Самопочуття, активність, настрій» (САН) – дослідження поточного психофізіологічного стану оператора.

Кількісні параметри психологічних тестів після обрахунків дозволяють отримати інтегральний показник рівня психологічної профпридатності Q_{pr}.

При експериментальних дослідженнях необхідно враховувати добову активність організму оператора. Провівши інженерний аналіз, виявлено, що оптимальним періодом для реалізації експериментів є 12-13 година дня (дві години після сніданку та година до обіду).

Відповідно до алгоритму, на третьому етапі необхідно визначити необхідні і достатні умови реалізації експериментальних досліджень. Приміщення для реалізації дослідження має бути в належному технічному стані [1; 11]. Перед реалізацією дослідження оператору пояснюють суть експерименту, вказують на його нешкідливість та безболісність, викладають загальний порядок процедури і вказують її приблизну тривалість [10]. Напередодні дослідження припиняють давати медичні препарати, які б могли викликати зміни у психологічному стані оператора.

Положення оператора під час експерименту повинно буди напівлежачи в зручному кріслі, м’язи розслаблені, голова спочиває на спеціальному підголівнику. Необхідність розслаблення, крім забезпечення максимального спокою оператора, визначається тим, що напруга м’язів, особливо голови і шиї, супроводжується появою артефактів електроміографії в записі електроенцефалограми.

У процесі запису ЕЕГ необхідно враховувати артефакти. Під артефактами розуміється вплив внутрішніх і зовнішніх чинників, які внаслідок своєї дії створюють зміну ЕЕГ сигналу, перетворюючи сигнал у недіагностичний. Дія артефактів пов'язана з фізіологічними та фізичними причинами, наприклад: рух оператора та датчиків на ньому, порушення процедури реалізації експерименту (наприклад, недостатнє обезжирення шкіри голови оператора), сигнали промислової частоти $f_{пр}$=50 Гц, синфазні сигнали в провідниках.

Під час реєстрації ЕЕГ слід приділити особливу увагу установці та якості з'єднання електродів. При розташуванні електродів на голові у схемі повинні бути представлені всі основні відділи конвексиальної поверхні мозку: лобові, центральні, тім'яні, потиличні, передні, задні, скроневі. Електроди повинні розташовуватися симетрично щодо серединної сагітальної лінії голови.

Кількість електродів, яка рекомендована для дослідження ЕЕГ, становить не менше дванадцяти [1]. Запис вимірювання потенціалів з кожного електрода здійснюється відповідно до нульового потенціалу референта, який знаходиться на мочці вуха, або на кінчику носа. Під час всього експерименту потрібно контролювати рухи оператора, імпеданс датчиків, заземлення приладу, підтримувати належне розташування датчиків на голові та забезпечувати умову ізоляції оператора від зовнішніх стимулів.

На четвертому етапі реалізується реєстрація сигналів біопотенціалів у двох режимах: фоновому та динамічному.

Фоновий запис розрахований на вимірювання ЕЕГ у спокійному стані оператора. Під час такого запису мають домінувати альфа- і бета-ритм. У здорового оператора не повинно виникати значних сплесків на вимірюваній ЕЕГ та патернів. Під патернами розуміються сигнали патологічної активності, які характеризують явні порушення процесів функціонування КГМ. Наведемо класифікацію таких сигналів, які зазвичай проявляються в результаті дії тестових стимулів [8; 12]:

– спайк (сп) – сигнал, що має гостру форму та латентний період $\tau_{сп}=(15\div 70)$мс. Може досягати амплітуди $U_{пр}$=1000 мкВ;

– гостра хвиля (гх) – сигнал, який має латентний період більше $\tau_{гх}$=70мкс. Такий сигнал схожий на сигнал спайку, але відрізняється більш пологим спадом після виникнення;

– спайк-хвиля (спх) – сигнал, який виникає через комплексну дію повільної хвилі та спайка і характеризується високою амплітудою та стереотипністю. Частота сигналу $f_{спх}=(2{,}5\div 6)$Гц, латентний період $\tau_{спх}=(200\div 500)$ мс;

– гостра хвиля-повільна хвиля (гх-пх). Цей сигнал подібний до сигналу спайк-хвилі, проте має підвищену латентність та частоту сигналу $f_{гх\text{-}пх}=(0{,}7\div 7)$ Гц;

– періодограми (пер) – часові відрізки сигналів різної латентності (більше $\tau_{пер}$=100мс) зі стаціонарною активністю. Наприклад, низькоамплітудна активність на фоні регулярного альфа-ритму;

– розряд – сигнал, який виникає при епілептичних припадках. Прикладом є різкий одиночний спайк з переходом його в тета-хвилю;

– періодичні комплекси. Високоамплітудні спалахи активності, що відрізняються за морфологією у різних операторів, проте характеризуються постійністю форм.

Крім експериментальних досліджень фонового запису ЕЕГ, застосовуються методи, які ґрунтуються на тому, що організм людини піддають певному збудженню, в результаті чого отримуються перехідні процеси сигналів біоритмів КГМ.

Динаміка перехідних процесів в електроенцефалографії характеризується біоелектричними коливаннями системного нормованого характеру у вигляді хвилі або сукупності хвиль, що виникають як відповідь у нервових структурах на подразники, які умовно можна класифікувати таким способом:

– сенсорні стимули;

– електричне подразнення аферентних шляхів (сигнали від органів, що надходять постійно);

– імпульси, що надходять по асоціативним волокнам (сигнали надходять вибірково, або від волі людини);

– чітко фіксовані події.

Залежно від модальності пропонованих стимулів в експериментальних дослідженнях використовуються такі види впливу на КГМ [13]: зорові, слухові, сомато-сенсорні, тактильні, нюхові, смакові, вестибулярні, кінестетичні. Аналіз тестових збуджень показує, що ефективними стимулами для експерименту є зорові та слухові [2; 13], які були використані в експерименті, а також вплив на нервові ганглії.

Для реалізації одиночних фотостимулів пропонується використовувати лампу розжарювання потужністю P=200 Вт, яка знаходиться під матовим склом на відстані l=25-30 см від оператора (очі якого закриті) та має спектр світла близький до білого. Інтенсивність спалаху світла має бути потужністю $P_{сп}=(0{,}1 \div 0{,}6)$ Дж, латентність τ=150 мкс.

Для реалізації дослідження з багаторазовою фотостимуляцією пропонується використовувати лампу для одиночних низьколатентних спалахів, що має такі характеристики: потужність спалаху $P_{сп}=(0{,}24 \div 0{,}35)$ Дж, латентність $\tau_{сп}$=50 мс і частоту $f_{сп}=(9 \div 12)$ Гц з інтервалами серії $T_{сп}=(5 \div 7)$ с. Для виявлення патології можна проводити зміну частоти в діапазоні $f=(2 \div 30)$ Гц поступово, змінюючи її з нижньої границі до верхньої і навпаки.

Необхідно враховувати, що кожна людина має власну природну частоту альфаритму, біоритм якої може варіюватись у діапазоні $f_{\alpha}=5 \div 15$ Гц. Тому за допомогою результатів попереднього аналізу фонового запису ЕЕГ можна виділити власну частоту оператора і застосувати її для тестового впливу. Необхідно зазначити, що мозок, як динамічна система, завжди «підстроюється» під зовнішні стимули організму (*реакції настройки коркової частоти* [1]), тому треба враховувати, що тривалість стимулу має мати межу і повторюваність.

Для прикладу на рис. 2 показаний графік перехідних процесів при одноразовій фотостимуляції. На графіку по осі абсцис відкладений час протікання процесу, а по осі ординат – амплітуда біосигналу, де «+» – це позитивне відхилення біопотенціалу відносно давача.

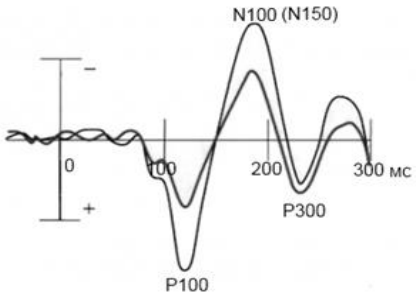


Рис. 2. Викликані потенціали при одиничній фотостимуляції

Традиційно компоненти викликаного потенціалу позначаються знаком або полярністю відхилення (*P*-позитивний, *N*-негативний компонент) та часом появи (наприклад, *P*100 – позитивний компонент з піком t=100 мс після початку події), або порядковим номером у цілій хвилі (*P*1). Відповідно до рис. 2:

*P*100 – позитивний компонент з піком через $t=(70 \div 100)$ мс після появи стимулу. Цей компонент співвідноситься з сенсорним кодуванням стимулу і супроводжується подальшим негативним компонентом *N*100 (*N150*) приблизно через t=150 мс після появи стимулу. Ці компоненти пов’язані з ранньою просторовою організацією сенсорного оброблення інформації без відношення до її змісту.

*P*300 – компонент характеризується тим, що його параметри залежать від завдання, яке стоїть перед оператором. Припускають, що компонент *P*300 відображає процес аналізу стимулу, який пов'язаний з тимчасовим зберіганням необхідної інформації в робочій пам'яті оператора, а саме: доступ до неї, оновлення її змісту та впізнання об'єкта.

Отримані дані експериментальних досліджень надходять в базу даних (БД), в якій забезпечуються всі сучасні функції захисту інформації (блок схеми – 8). Інформація обробляється програмою (блок схеми – 9), яка одночасно аналізує отримані біосигналами і результати психологічних тестів. Блок 9 створює інформаційний ресурс, який надходить назад до БД.

Для прикладу практичної реалізації алгоритму методики представлені результати експериментальних досліджень, реалізованих з представниками однієї з груп професій екстремального виду діяльності – полярниками. Психотип та параметри ригідності операторів визначені за допомогою психологічних тестів.

Результати експерименту фонового та динамічного режиму в області потилиці (давач О1) для одного оператора представлено як приклад на рис. 3, 4, 5, 6. Дані виміряно до відправлення представленого оператора на антарктичну станцію ім. «Академіка Вернадського» та під час повернення додому.

На рис. 3 представлено фоновий запис електроенцефалограми оператора без патологій.

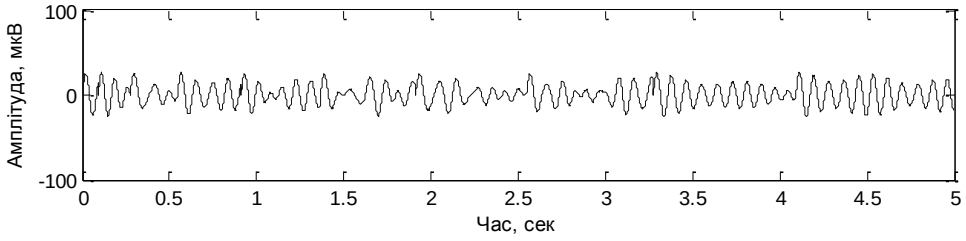


Рис. 3. Приклад фонового запису ЕЕГ здорового оператора

На рис. 4 представлено динамічний запис електроенцефалограми оператора без патологій.

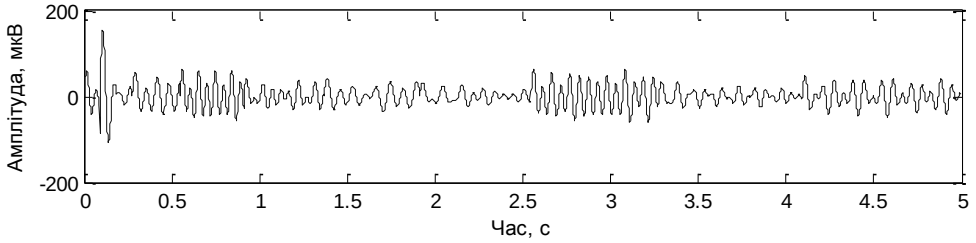


Рис. 4. Приклад запису динамічного ЕЕГ здорового оператора

На рис. 5 представлено фоновий запис електроенцефалограми оператора з психічною дизфункцією – депресивний стан.

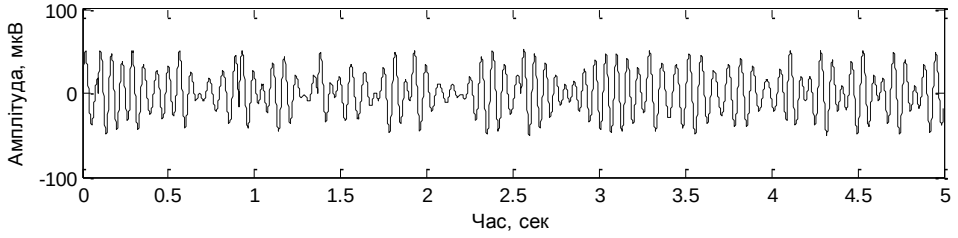


Рис. 5. Приклад запису фонового ЕЕГ оператора з дизфункцією – депресивний стан

На рис. 6 представлено динамічний запис електроенцефалограми оператора з психологічною дизфункцією – депресивний стан.

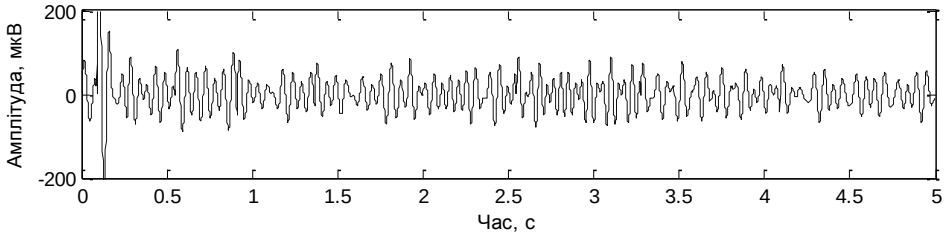


Рис. 6. Приклад запису динамічного ЕЕГ оператора з дизфункцією – депресивний стан

Як показують дослідження, мозок є інтегратором інформації щодо психофізіологічного стану органів нейрогуморальної системи, а також відділів мозку. За допомогою оброблення біоритмів мозку можна з певною достовірністю реалізовувати діагностику психофізіологічного стану як нейрогуморальної системи, так і мозку оператора в цілому. Інформація, як результат експериментальних досліджень, є основою для розроблення експертної системи. На рис. 1 блоки 9, 10, 11 визначають структуру експертної системи прийняття рішень. Система прийняття рішень (СПР) (англ. Decision Support System, DSS) – це комп'ютерна автоматизована система, метою якої є допомога фахівцям-медикам, які приймають рішення у складних умовах медичної практики для повного та об'єктивного оцінювання психофізіологічного стану здоров'я людини.

Висновки:

– розроблено методику реалізації експериментальних досліджень КГМ, яка має на меті визначати об'єктивні кількісні характеристики біосигналу;

– розглянуто необхідність класифікації оператора за категорією темпераменту та врахування умов проведення експериментального дослідження;

– проаналізовано особливості реалізації експериментального дослідження у двох режимах запису біосигналів: фоновому та динамічному;

– у майбутньому запропонована методика експериментальних досліджень КГМ дозволить створити потужну і комп'ютеризовану інформаційну систему для формування інформаційного та інтелектуального ресурсу для оцінювання психофізіологічного стану організму оператора.

Список використаних джерел

1. *Поворинский А. Г.* Пособие по клинической электроэнцефалографии : учебное пособие / А. Г. Поворинский, В. А. Заболотных ; АН СССР. – Л. : Наука, 1987. – 64 с.

2. *Сивер Д.* Майнд машины. Открываем заново технологию аудиовизуальной стимуляции [Электронный ресурс] / Д. Сивер. – Режим доступа : http://www.koob.ru/siever_dave/rediscovery.

3. *Яхно Н. Н.* Болезни нервной системы : руководство для врачей : в 2 т. / под ред. Н. Н. Яхно, Д. Р. Штульмана. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Медицина, 2001. – 744 с.

4. *Булигіна О. В.* Концептуальна модель оцінювання психофізіологічного стану операторів екстремальних видів діяльності / О. В. Булигіна, В. Г. Гамов // Вісник центрального наукового центру транспортної академії України «Автошляховик України». – 2010. – № 13. – С. 165–168.

5. *Кузовик В. Д.* Особливості оцінювання психофізіологічного стану учасників полярних експедицій / В. Д. Кузовик, А. Д. Гордєєв // Інтернаціоналізація досліджень в Антарктиці – шлях до духовної єдності людства : тези VI Міжнародної антарктичної конференції (15–17 травня 2013 р., м. Київ). – 2013. – С. 404–405.

6. *Кузовик В. Д.* Аспекты планирования и реализации экспериментальных исследований психофизиологического состояния операторов экстремальных видов деятельности / В. Д. Кузовик, А. Д. Гордєєв, О. В. Булигіна // КрымИКо2013: СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : 23-я Международная конференция. – Севастополь, 2013. – С. 1081–1082.

7. *Кузовик В. Д.* Діагностика і прогнозування психофізіологічного стану операторів екстремальних видів діяльності / В. Д. Кузовик, А. Д. Гордєєв // Інформаційні технології невралгії, психіатрії, епілептології і медичної статистики : науково-практична конференція. – К., 2013. – С. 18–19.

8. *Гусельников В. И.* Электрофизиология головного мозга : учебное пособие / В. И. Гусельников. – М. : Высшая школа, 1976. – 423 с.

9. *Кузовик В. Д.* Новітні засоби оцінки операторів екстремальних видів діяльності / В. Д. Кузовик // Вісник ІАСУ НАУ. – 2005. – № 5. – С. 52–58.

10. *Кузовик В. Д.* Некоторые методологические аспекты оценки эффективности медицинского вмешательства / В. Д. Кузовик // Електроніка і системи управління. – 2009. – № 2 (20). – С. 18–37.

11. *Кратин Ю. Г.* Техника и методика электроэнцефалографии / Ю. Г. Кратин, В. И. Гусельников. – 2 изд. – Л. : Наука, 1971. – 318 с.

12. *Зенков Л. Р.* Клиническая электроэнцефалография (с элементами эпилептологии) : руководство для врачей / Л. Р. Зенков. – 3-е изд. – М. : МЕДпрессинформ, 2004. – 368 с.

13. *Гнездицкий В. В.* Вызванные потенциалы мозга в клинической практике / В. В. Гнездицкий. – Таганрог : ТРТУ, 1997. – 252 с.

УДК 537.311

М.В. Мошель, д-р техн. наук
О.В. Рогоза, канд. фіз.-мат. наук
А.О. Ковтун, канд. фіз.-мат. наук
Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ТЕРМОДІЕЛЕКТРИЧНИЙ ЕФЕКТ У РІДКИХ КРИСТАЛАХ

Н.В. Мошель, д-р техн. наук
А.В. Рогоза, канд. физ.-мат. наук
А.А. Ковтун, канд. физ.-мат. наук
Черниговский национальный технологический университет, г.Чернигов, Украина

ТЕРМОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Mykola Moshel, Doctor of Technical Sciences
Oleksandr Rohoza, PhD in Physical and Mathematical Sciences
Anatolii Kovtun, PhD in Physical and Mathematical Sciences
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

TERMODIELEKTRYK EFFECT IN LIQUID CRYSTALS

Виконано дослідження температурних залежностей термодіелектричних струмів в області фазового переходу рідкий кристал-твердий кристал на прикладі двох типів рідких кристалів: холестеричного- холестерилпеларгоната та нематичного- 4-н-гептилокси-4^1-ціанобіфеніла. Встановлено, що термодіелектричний струм через зразок рідкого кристалу починає різко зростати під час кристалізації. Запропоновано механізм виникнення термодіелектричного струму. Аналіз температурних залежностей термодіелектричних струмів дозволяє зробити висновок, що різкі зміни електропровідності в області фазового переходу рідкий кристал-твердий кристал пов'язані з термодіелектричними струмами.

Ключові слова: *холестеричний, нематичний рідкі кристали, термодіелектричні струми.*

Исследованы температурные зависимости термодиэлектрических токов в области фазового перехода жидкий кристалл-твердый кристалл на примере двух типов жидких кристаллов: холестерического- холекстерилпеларгоната и нематического- 4-н-гептилокси-4^1-цианобифенила. Установлено, что термодиэлектрический ток через образец жидкого кристалла начинает резко возрастать при кристаллизации. Предложен механизм возникновения термодиэлектрического тока. Анализ температурных зависимостей термодиэлектрических токов позволяет сделать вывод, что резкие изменения электропроводности в области фазового перехода жидкий кристалл-твердый кристалл связаны с термодиэлектрическими токами.

Ключевые слова*: холестерический, нематический жидкие кристаллы, термодиэлектрические токи.*

The investigation of the temperature dependence termodielektryk currents in the phase transition liquid crystal- solid crystal by the two types of liquid crystals: cholesteric - holesterylpelarhonata and nematic 4- n- heptyloksi -41- cyanobiphenyl. Established, that termodielektryc current begins to increase sharply during crystallization. Proposed explanation of the mechanism of termodielektrychnoho current. Analysis of temperature dependences termodielektrik currents suggests that abrupt changes in electrical conductivity in the phase transition liquid crystal-solid crystals associated with termodielektrik currents.

Key words: *cholesteric, nematic liquid crystals, termodiyelektryk currents, termodielektricheskimi.*

Постановка проблеми. Термодіелектричний ефект безпосередньо пов'язаний з фазовими перетвореннями в речовині. Суть його полягає в тому, що під час утворення твер-

дого кристала із розчину, розплаву чи пари на границі розділу фаз виникає різниця потенціалів. Це явище одержало назву термодіелектричний ефект. Він з'являється як під час кристалізації, так і під час плавлення речовини і характерний для всіх діелектриків [1]. Ефект пов'язаний з тим, що при переході частини речовини у кристалічний стан носії заряду різних знаків попадають у тверду фазу не в однакових кількостях і залишаються нерухомими внаслідок низької електропровідності кристала. В результаті тверда фаза стає зарядженою. Заряди протилежного знаку відтісняються фронтом кристалізації. Розділення заряду чистими діелектриками не пов'язане з наявністю іонів у вихідній фазі і відбувається на поверхні розділу фаз. Причинами розділення іонів можуть бути різниця у коефіцієнтах дифузії іонів різних знаків, різні коефіцієнти захоплення іонів, переважна адсорбція одного іонів одного знаку. У реальних умовах можуть діяти всі ці механізми.

Відповідно до [1] розглянемо механізм розділення зарядів внаслідок відмінності коефіцієнтів захоплення іонів різних знаків. У початковий момент кристалізації іони одного знака захоплюються кристалом у більшій кількості до тих пір, поки не встановиться електричне поле, що зменшує їх рух до межі розділу і збільшує притягання іонів другого знаку, що накопичуються в розплаві біля межі розділу фаз. У результаті виникає подвійний електричний шар. У процесі кристалізації, з утворенням нової межі розділу фаз, контактна різниця потенціалів весь час порушується і знову поновлюється шляхом переважного захоплення іонів одного знаку. Носії заряду, що знаходились біля самої поверхні розділу фаз, виявляються віддаленими від неї в глибину кристалу на товщину нового шару, що утворюється внаслідок поширення фронту кристалізації. За допущенням, носії заряду, необхідні для відновлення контактної різниці потенціалів, виникають внаслідок іонізації молекул на поверхні розділу при співударі їх з молекулами розплаву, що мають більшу енергію. Кінетика процесів співудару та іонізації, її співвідношення зі швидкістю росту кристала визначають швидкість поновлення контактної різниці потенціалів і величину заряду, що захоплюється кристалом.

Аналіз досліджень і публікацій. Термодіелектричний ефект виявлений і в рідких кристалах [2]. У процесі кристалізації він проявляється більш чітко, тому що під час нагрівання на нього накладається піроелектричний ефект [3].

Дослідженню термодіелектричного ефекту в рідких кристалах присвячено порівняно небагато робіт [4-9]. В експериментах встановлено, що при фазових переходах різко змінюється напруга на зразку і струм через нього.

Слід зазначити, що у роботах [5;6] дослідження виконувались на порівняно тонких зразках, у яких важко одержати направлений фронт кристалізації і проконтролювати його поширення у зразку. Не вивченим є питання, як впливає термодіелектричний струм на зміни електропровідності при фазових переходах у рідких кристалах.

Мета статті. Дослідження температурних залежностей струмів, що виникають через зразок рідкого кристалу в області фазового переходу рідкокристалічний стан речовини (мезофаза)- твердий кристал на прикладі двох типів рідких кристалів: холестеричного- холестерилпеларгоната та нематичного- 4-н-гептилоксі-4^1-ціанобіфеніла. У цих речовин характер зміни питомої електричної провідності при плавленні і кристалізації різний: у холестерилпеларгонаті на кривих температурної залежності питомої електропровідності фазовий перехід твердий кристал-мезофаза проявляється у вигляді максимуму електропровідності, який в 4-н-гептилоксі-4^1-ціанобіфенілі відсутній. Кристалізація холестерилпеларгонату проявляється у вигляді глибокого мінімуму питомої провідності, характерного і для інших холестеричних рідких кристалів, у той час як у нематичному рідкому кристалі при цьому переході має місце пік електропровідності. У зв'язку з чим необхідно знати, який характер змін термодіелектричних струмів у цих речовинах і як вони впливають на зміну електропровідності при фазовому переході мезофаза-твердий кристал.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження термодіелектричного ефекту використовувалась комірка, що являла собою два скла із струмопровідним шаром SnO_2, площею 110 мм^2 і шару рідкого кристалу товщиною 4 мм. Для одержання направленого фронту кристалізації між верхнім і нижнім електродами підтримувалась різниця температур 2 К, що вимірювалась з точністю до 0,2 К. Верхній електрод мав нижчу температуру порівняно з нижнім. Швидкість охолодження становила 0,02 К/хв. Термодіелектричний струм, що виникав, вимірювався електрометричним підсилювачем, а зміна струму з часом фіксувалась двокоординатним потенціометром.

Як показали експерименти, температура, при якій починається різке зростання термодіелектричного струму, відповідає фазовому переходу твердий кристал-рідкий кристал (рис.1, 2).

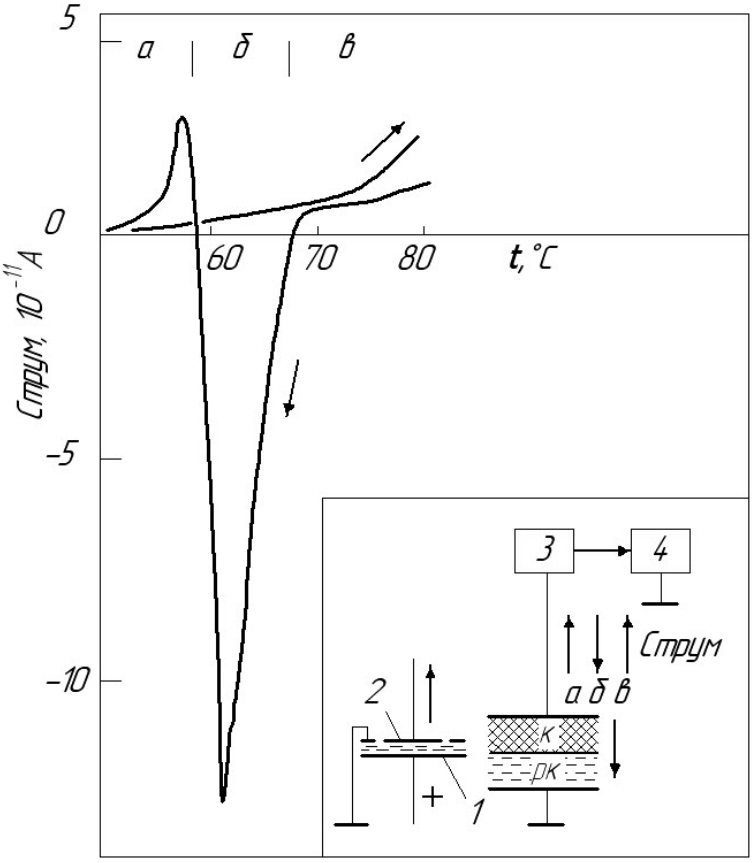


Рис .1. Залежність термодіелектричного струму від температури у холестерил-пеларгонаті. Схема вимірювальної установки: 1 – високовольтний електрод; 2 – вимірювальний електрод; 3 – підсилювач струму; 4 – потенціоментр двокоординатний

Примітка: напрям термодіелектричного струму у вимірювальному колі для температурних областей а, б, в і поширення фронту кристалізації вказано стрілками. На шкалі температур вказана температура верхнього електрода. К – твердий кристал, РК – рідкий кристал.

В областях фазових переходів ізотропна рідина-мезофаза і при поліморфних перетвореннях також спостерігається існування термодіелектричного струму та мають місце невеликі його стрибки. Процес кристалізації в холестерилпеларгонаті супроводжується зміною напряму протікання термодіелектричного струму у вимірювальному колі щодо струму провідності. У нематичному рідкому кристалі фазовий перехід мезофаза-твердий кристал супроводжується різким зростанням термодіелектричного струму. Дослідження показали, що він починає різко збільшуватись у момент початку кристалізації на верхньому електроді.

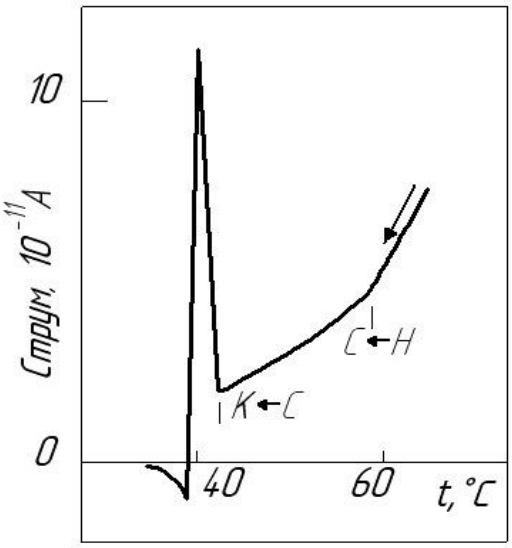


Рис. 2. Залежність термодіелектричного струму від температури в 4-н-гептилоксі-4[1]-ціанобіфенілі: І – ізотропна рідина; К – твердий кристал; Н, С – відповідно нематична і смектична мезофази

Особливості такої температурної зміни термодіелектричного струму у досліджених рідких кристалах можна пояснити, якщо виходити з того, що на межі розділу фаз є контактна різниця потенціалів і розділення зарядів відбувається за рахунок різниці коефіцієнтів захоплення іонів різних знаків за механізмом, розглянутим вище.

У момент зародження твердого кристалу біля верхнього електрода термодіелектричний струм змінює свій напрям щодо струму провідності, який протікає від електрода з додатнім потенціалом до електрода з від'ємним потенціалом (рис.1, обл. *б*). Вимірювальна установка дозволяла визначати знак різниці потенціалів на електродах вимірювальної комірки щодо полярності зовнішнього джерела для випадку вимірювання електропровідності. Логічно пояснити, що в момент утворення кристалу позитивні іони захоплюються ним у більшій кількості, ніж від'ємні іони, які відтісняються у розплав (рис. 3, *а*). Подвійне електричне поле, що виникає внаслідок цього, на межі розділу фаз буде обумовлювати рух негативних іонів до кристалу – виникає термодіелектричний струм, що зростає за рахунок збільшення площі фронту кристалізації.

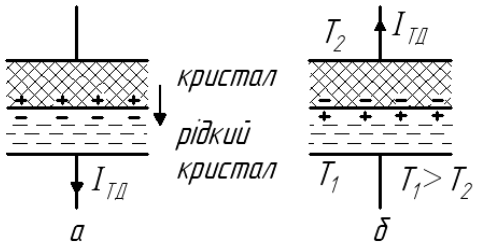


Рис. 3. Схематичне представлення утворення контактної різниці потенціалів на межі розділу фаз в: а – холестерилпеларгонаті; б – 4-н-гептилоксі-4[1]-ціанобіфенілі

Примітка: напрям протікання термодіелектричного струму $I_{ТД}$ вказаний стрілками.

Під час поширення фронту кристалізації відбувається неперервне розділення зарядів на межі фаз: біля межі розділу фаз зі сторони твердого кристалу переважають позитивно заряджені іони, які захоплюються твердим кристалом у більшій кількості, ніж негативно заряджені, що знаходяться біля межі розділу фаз у рідкому кристалі. Внаслідок цього напруженість електричного поля на межі розділу зростає, сповільнюється рух позитивно заряджених іонів до кристалу і збільшується притягання негативно заряджених. Відповідно, по мірі просування фронту кристалізації іони обох знаків будуть «вморожені» в твердий кристал у рівних кількостях.

Висновок про полярність контактної різниці потенціалів на межі розділу фаз підтверджується результатами, представленими на рис. 4.

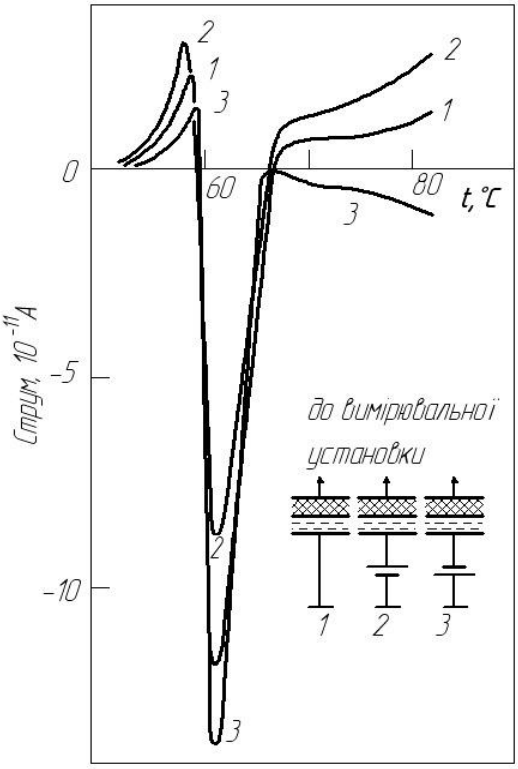


Рис. 4. Залежність величини термодіелектричного струму в холестерилпеларгонаті від зовнішньої напруги

У вимірювальне коло послідовно вмикалось джерело електрорушійної сили 7 В. При позитивному потенціалі на нижньому електроді зовнішнє електричне поле протидіє руху від'ємних іонів до кристалу, внаслідок чого максимальне значення термодіелектричного струму зменшується (рис. 4, крива 2). При від'ємному потенціалі на електроді процес змінюється на протилежний і максимальне значення термодіелектричного струму збільшується (рис. 4, крива 3).

Аналіз температурних змін термодіелектричного струму і його залежності від зовнішньої напруги у нематичному рідкому кристалі дозволяє стверджувати, що він збігається за напрямом із струмом провідності по тій причині, що полярність контактної різниці потенціалів збігається з полярністю зовнішнього джерела напруги. При цьому на межі розділу фаз зі сторони рідкого кристала переважають позитивні іони, що відтісняються фронтом кристалізації, а приконтактна область зі сторони твердого кристалу заряджена від'ємно (рис 3, *б*). Під час плавлення вказаної речовини має місце зворотна картина розподілу зарядів по обидві сторони від межі розділу фаз і термодіелектричний струм, що виникає, направлений протилежно струму провідності, зменшуючи останній.

Висновки і пропозиції. Аналіз температурних залежностей струмів провідності і термодіелектричного порівняння їх значень дозволяє вважати, що при фазовому переході мезофаза-твердий кристал різкі зміни стаціонарної електропровідності обумовлені термодіелектричним ефектом.

Список використаних джерел

1. *Мельникова А. Н.* Разделение зарядов при кристаллизации / А. Н. *Мельникова* // Кристаллография. – 1969. – Т. 14. – С. 548–563.

2. *Адамчик О.* Жидкие кристаллы : пер. с польского / О. Адамчик, З. Струкгальский ; под ред. И. Г. Чистякова. – М. : Сов. Радио, 1979. – 160 с.

3. *Лачинов А. Н.* Пироэффект в нематическом жидком кристалле / А. Н. Лачинов, А. Н. Чувыров, Н. Х. Гильманова // Журнал технической физики. – 1980. – Т. 50, вып.1. – С. 189–190.

4. *Капустин А. П.* Термодиэлектрический эффект при фазовом переходе жидкий кристалл-твердый кристалл / А. П. Капустин, З. Х. Куватов, А. И. Трофимов // Кристаллография. – 1973. – Т. 18, вып. 13. – С. 647–648.

5. *Cuculescu I.* Studu of the transition in some cholesteryl and B-nor cholesteryl derivatives / I. Cuculescu, S. Seliger, R. Schwarts // Rev. Roum. Phys. – 1983. – V. 28, № 4. – P. 375–379.

6. *Thermodielectric* effect in cholesteryl layrate / I. Cuculescu, V. Popescu, R. Bena, A. Enache, O. Savin // Revue Roumaine de Physique. – 1981. – V. 26, № 10. – P. 1109–1114.

7. *Термодиэлектрический* эффект при фазовом переходе в жидких кристаллах / И. Кукулеску, Р. Бена, И. Бачью, А. Энаке // Кристаллография. – 1983. – Т. 28, № 5. – С. 1042–1044.

8. *Стафеев В. И.* Термодиэлектрические и другие явления в структурах с неравновесными носителями заряда и наночастицами / В. И. Стафеев // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, вып. 9. – С. 1321–1328.

9. *Аномальный* термодиэлектрический эффект в γ-облученном жидком кристалле / Е. Г. Аксельрод, В. А. Добрин, И. О. Заплатина и др. // Письма в журнал технической физики. – 1994. – Т. 20, вып. 11. – С. 16–20.

УДК 005.65.012.2

Д.В. Маргасов, аспірант
Чернігівський державний інститут економіки і управління, м. Чернігів, Україна

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У МОНІТОРИНГУ ЕНЕРГООЩАДНОСТІ БЮДЖЕТНИХ БУДІВЕЛЬ м. ЧЕРНІГОВА

Д.В. Маргасов, аспирант
Черниговский государственный институт экономики и управления, г. Чернигов, Украина

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МОНИТОРИНГЕ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ БЮДЖЕТНЫХ ЗДАНИЙ г. ЧЕРНИГОВА

Dmytro Marhasov, PhD student
Chernihiv State Institute of Economics and Management, Chernihiv, Ukraine

THE INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE MONITORING OF ENERGY SAVING OF CHERNIHIV MUNICIPAL BUILDINGS

Запропоновано створити інформаційну систему моніторингу та управління енергозбереженням бюджетних будівель для аналізу прийняття рішень з використанням ІЧ-термограм, лазерного сканування, ГІС-технологій, мережі Інтернет.

Ключові слова: *інформаційні технології, ІЧ-термограми, бюджетні будівлі, ГІС-технологія, мережа Інтернет.*

Предложено создать информационную систему мониторинга и управления энергосбережением бюджетных зданий для анализа принятия решений с использованием ИК-термограмм, лазерного сканирования, ГИС-технологий, сети Интернет.

Ключевые слова: *информационные технологии, ИК-термограммы, бюджетные здания, ГИС-технология, сеть Интернет.*

It is proposed to set up an information system for monitoring and management for decision analysis using infrared thermograms, municipall buildings, GIS technology, Internet

Key words: *information technology, infrared thermograms, municipall buildings, GIS technology, Internet.*

Постановка проблеми. Актуальність проблеми енергоощадності для будівель бюджетних організацій, з одного боку, обумовлена соціальною значущістю цих об’єктів, з іншого боку, марнотратне споживання енергії та відсутність системного підходу до реалізації енергоощадних заходів є одними з основних причин дефіциту бюджетів усіх рівнів.

Зважаючи на те, що останнім часом нові об’єкти бюджетної сфери в експлуатацію майже не вводяться, основні резерви енергоощадності знаходяться у сфері вдосконалення енергоспоживання раніше побудованих будівель бюджетних установ. Так, у програмі енергоощадності в закладах охорони здоров’я м. Чернігова на 2013-2017 роки одним з основних напрямків вирішення завдань скорочення енергоспоживання закладами

охорони здоров'я міста є програмне планування та моніторинг заходів з енергозбереження за допомогою впровадження системи енергетичного моніторингу [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізуючи дослідження з інформаційних систем моніторингу енергоощадності бюджетних будівель, слід зазначити, що в Україні ці питання висвітлюються у працях А.В. Праховника, В.В. Прокопенко, О.І. Соловей [2], О.Г. Ратушняк [3] та інші. Питання інформаційних технологій в Україні висвітлюються у працях І.В. Сергієнко [4], В.В. Казимира [5] та інших. За кордоном питаннями моніторингу енергоощадності займаються В.П. Вавилов [6], Ю.А. Табунщиков [7] та інші.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Не вирішеною є проблема створення загальної он-лайн інформаційної системи моніторингу енергоощадності муніципальних бюджетних будівель у мережі Інтернет.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є опис інформаційних технологій та технічних засобів моніторингу енергоощадності бюджетних будівель м. Чернігова.

Виклад основного матеріалу. Ціннісний підхід є основою до ініціювання проектів [8]. Прийняття рішень до створення енергоощадних проектів можливо розглядати як процес від формування цінностей з енергоощадності, виникнення бажання до змін, вибору вигод, пошук можливостей та ресурсів, управління втіленням, досягнення економії та контроль за рахунок інформаційної системи моніторингу й управління (рис. 1).

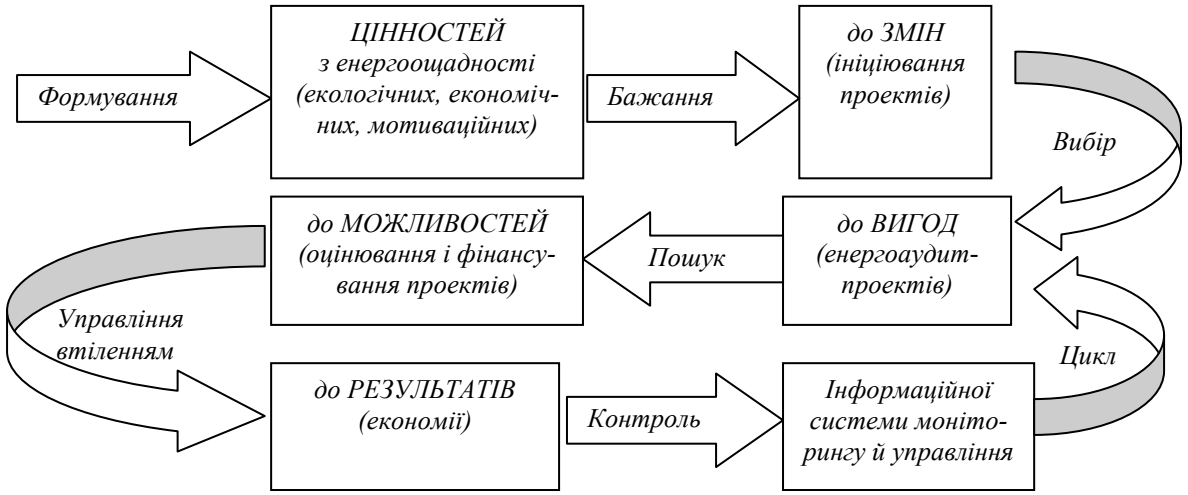
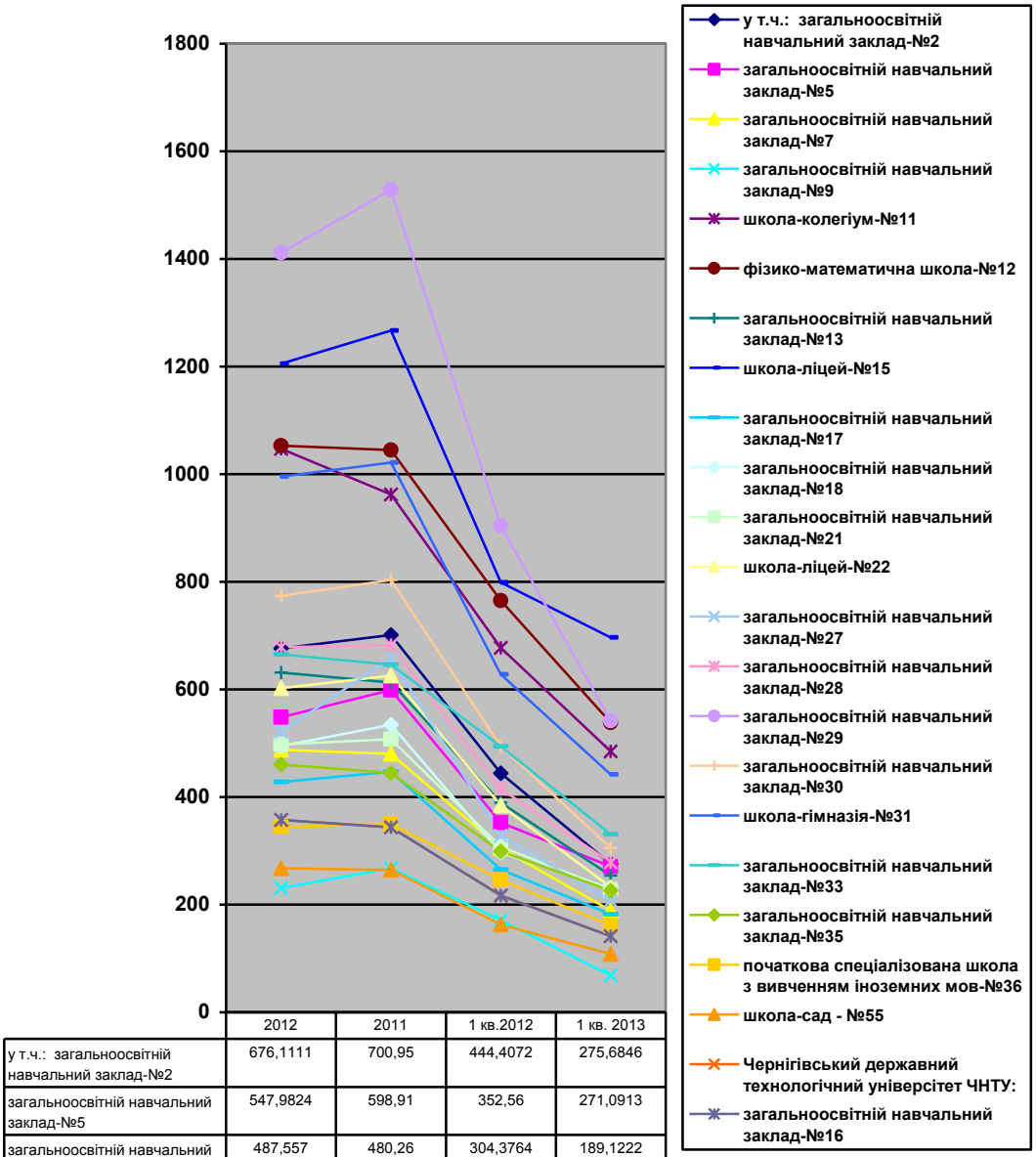


Рис. 1. Загальний погляд на процес прийняття рішень для енергоощадного проекту

Енергоощадні проекти, які пропонуються сьогодні, мають ознаки рекурсивності енергоощадних заходів, тому питання створення інформаційної системи моніторингу й управління є, насамперед, засобом проактивного управління [9] з енергоощадності.

Дані з енергоспоживання тепла бюджетних будівель м. Чернігова представлені на рис. 2. Ці дані свідчать про деяке зменшення витрат тепла у Гкал, але за який рахунок – це предмет аналізу.

Інформаційні технології моніторингу бюджетних будівель м. Чернігова пропонується представити, як сформований у мережі Інтернет он-лайн ресурс з інформаційною ГІС-системою, де є 3D карта об'єктів або дані з їх наземного лазерного сканування, є інтерфейс адміністратора для введення статистичних даних про об'єкт та його енергоспоживання. Користувач, який відкриває дані по кожному об'єкту при наведенні безпосередньо на нього, бачить фото- або відеовізуалізації тепловтрат та дефектів бюджетних будівель по м. Чернігову, згідно з тепловізійними зйомками (рис. 4) та експрес-звітами (табл. 1, 2) з рекомендаціями, зробленими, наприклад, у програмі SmartView, яка безкоштовно поставляється з кожним тепловізором FLUKE. Програму SmartView можна вільно завантажити з веб-сайту www.fluke.com.



	2012	2011	1 кв.2012	1 кв. 2013
у т.ч.: загальноосвітній навчальний заклад-№2	676,1111	700,95	444,4072	275,6846
загальноосвітній навчальний заклад-№5	547,9824	598,91	352,56	271,0913
загальноосвітній навчальний заклад-№7	487,557	480,26	304,3764	189,1222
загальноосвітній навчальний заклад-№9	230,9426	267,4359	170,784604	68,3386
школа-колегіум-№11	1046,8091	962,12	677,3576	484,6778
фізико-математична школа-№12	1053,0771	1044,95	764,8428	538,5692
загальноосвітній навчальний заклад-№13	631,2648	613,0167	389,4168	254,1047
школа-ліцей-№15	1204,9895	1267,085	799	696,3774
загальноосвітній навчальний заклад-№17	427,6281	447,33	265,07	181,9751
загальноосвітній навчальний заклад-№18	494,6665	534,06	296,31876	230,4397
загальноосвітній навчальний заклад-№21	497,6526	507,4728	307,5824	228,098
школа-ліцей-№22	602,5572	625,57	384,47832	232,4365
загальноосвітній навчальний заклад-№27	521,1144	658,63	327,90696	207,1048
загальноосвітній навчальний заклад-№28	678,431	682,3361	414,9944	278,5987
загальноосвітній навчальний заклад-№29	1411,3914	1528,7	903,8908	541,86
загальноосвітній навчальний	774,0386	803,55	494,26132	305,267

Рис. 2. Дані споживання тепла (Гкал) бюджетних будівель м.Чернігова

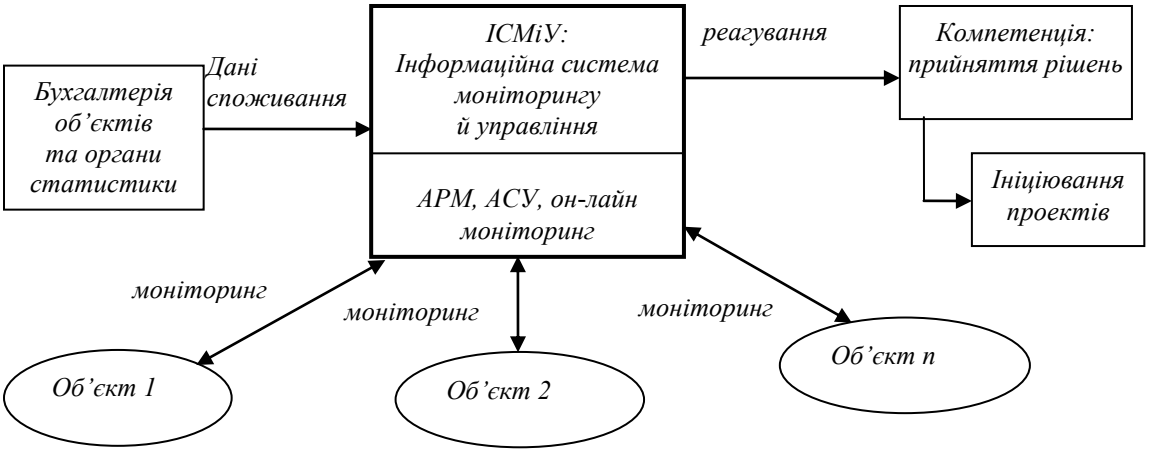


Рис. 3. Взаємозв'язок інформаційної системи моніторингу й управління

Однією з основних функцій тепловізора є візуалізація розподілу температури, здійснювана за допомогою термограм (теплових інфрачервоних зображень). Термограма являє собою зображення, кожен піксель якого забарвлюється певним кольором (залежно від обраної палітри і діапазону подання тепловізора або ПО для оброблення тепловізійних даних). Теплові зображення є псевдокольоровими, тобто зв'язок палітри кольорів з температурою задається оператором. Є безліч палітр, що входять до програмного забезпечення тепловізійних комплексів. На практиці частіше використовують палітри «Веселка» (Rainbow) і «Кольори розжареного заліза» (Iron). При правильному підборі палітри зони з близькими температурами можна представити за допомогою контрастних кольорів (рис. 4), проте не слід перебільшувати значення палітри для підвищення достовірності виявлення прихованих дефектів. Число кольорів для представлення температурної матриці змінюється від 1 до 256, що пов'язано з особливостями формування зображень в операційній системі. Іншими словами, кожен колір має свій індекс і, виходячи із пропорції, йому зіставляється певний інтервал температур в обраному динамічному діапазоні термограми.

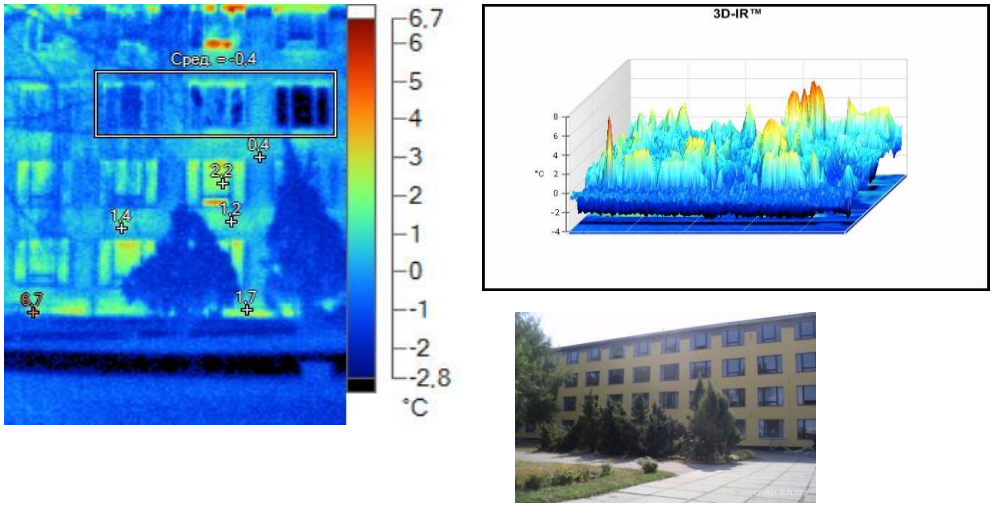


Рис. 4. Термографічна зйомка, 3D частотно-температурна гістограма Чернігівського національного технологічного університету у м.Чернігові, вул. Шевченко, 95, 20.02.2014, 9:28:34

Таблиця 1

Інформація про зображення

Температура фону	–1,8 °C
Коефіцієнт випромінювання	0,93
Середня температура	–0,4 °C

Межі зображення	–2,8 °C до 6,7 °C
Модель камери	Ti100
Розмір ІЧ-датчика	120 x 160
Серійний номер камери	Ti100-13120026
Виробник камери	Fluke Thermography
Час зображення	20.02.2014 9:28:34
Серйозність	Середнє

Таблиця 2

Маркери основного зображення

Ім’я	Температура, °C	Коефіцієнт випромінювання	Фон, °C
Гарячий	6,7	0,93	–1,8
P0	2,2	0,93	–1,8
P1	0,4	0,93	–1,8
P2	1,2	0,93	–1,8
P3	1,7	0,93	–1,8
P4	1,4	0,93	–1,8

У сучасних тепловізорах глибина оцифровки сигналу досягає 14 біт, що дозволяє з мінімальною похибкою дискретизації оцифровувати весь можливий діапазон змін температур (задається оператором під час роботи з тепловізором). Отримана температурна матриця найчастіше містить зони аномально високих (викидів) або аномально низьких сигналів (фону), які не мають корисної інформації, тому для перегляду слабоконтрастних деталей температурної матриці вона може бути представлена оператору в певному діапазоні амплітуд (амплітудному вікні) [10].

Термографічна зйомка (рис. 4) проведена кваліфікованим енергоаудитором за допомогою тепловізора Fluke Ti100-13120026 (свідотство про державну метрологічну атестацію №05\0088 від 11.02.2014 р.) при температурі зовнішнього повітря –1,5 ºС та 22 ºС всередині приміщення при відносній вологості ззовні 66 %. Температура фону визначена за допомогою «теплового дзеркала». Коефіцієнт випромінювання взятий з нормативів по фарбі. Розподіл температур фасаду з термозображення ЧНТУ фасад.IS2 від 0,4 до 6,7 ºС. Слід зауважити, що тепловізійна зйомка, хоча і дуже інформативна, але може мати немалу похибку, зумовлену неточно визначеним коефіцієнтом випромінювання матеріалу стіни, відбитим сонячним випромінюванням, температурною передісторією та іншими факторами. На термограмі зображено жовтим кольором тепловтрати та точки з температурою поверхні фасаду. Ми бачимо прямокутну область із середньою температурою –0,4 ºС, де були замінені вікна, тепловтрат там майже немає. Для більшої енергоефективності потрібно замінити всі вікна, встановити ролети на вікна та тепловідбивні екрани за радіатори опалення. Також слід зробити утеплення фундаменту. Утеплення (термомодернізація) фасаду більш затратний метод та актуальний лише при одночасній заміні вентиляції на рекуперативну.

Згідно із зарубіжним досвідом, найважливішим, якщо не основним, інструментальним методом енергетичних обстежень у будівництві є інфрачервона (ІЧ) тепловізійна діагностика, доповнена виміром потужності теплового потоку, напрямку і швидкості руху повітря, а також певними іншими параметрами. Обстеження будівель зводиться до визначення дефектів будівництва за аномаліями теплових полів.

Невирішеними проблемами тепловізійної діагностики є багато питань, зокрема:

– необхідність ефективного комбінування результатів ІЧ-зйомки та точкового вимірювання щільності потужності теплового потоку крізь огороджувальні конструкції (необхідно вирішити суперечності між більш швидким тепловізійним вимірюванням та більш довгим вимірюванням теплових потоків) [11].

Розглянемо стаціонарну теплопередачу через плоску стінку, оскільки відповідні завдання виникають під час тепловізійної діагностики огороджувальних конструкцій бу-

дівель і споруд, а також димових труб. Особливо це відноситься до визначення термічного опору стінки. Розглянемо плоску стінку, що розділяє два середовища з різною температурою T_{in}^{a} і T_{out}^{a}. Теплообмін на поверхнях пластини характеризується коефіцієнтами α_{in} і α_{out}. Одношарова пластина має термічну опору $R_t = L/\lambda$ багатошарова – $R_t = \sum_{i=1}^{N} L_i / \lambda_i$. Тепловий потік крізь стінку дорівнює:

$$Q = \frac{T_{in}^{w} - T_{out}^{w}}{R_t}, \text{ або } Q = \frac{T_{in}^{a} - T_{out}^{a}}{R}, \quad (1)$$

де $R = 1/\alpha_{in} + R_t + 1/\alpha_{out}$ – повний тепловий опір стінки з урахуванням опорів прикордонних шарів, що залежать від відповідних коефіцієнтів теплообміну. Це відповідає тепловізійній діагностиці якості теплоізоляції димових труб або огороджувальних конструкцій будівельних споруд. При цьому за допомогою тепловізора вимірюють температурне поле на зовнішній поверхні ствола труби (стіни будівлі) T_{out}^{w} і за його амплітудою або текстурі судять про наявність прихованих дефектів і оцінюють їх параметри.

Визначення термічного опору стінки являє собою типову зворотну задачу технічної діагностики. Гіпотетично можливо розглянути два підходи щодо її вирішення: 1) вимірювання температури на обох поверхнях об'єкта, наприклад, за допомогою тепловізора з одночасним виміром теплового потоку через стінку за допомогою датчика теплового потоку; 2) вимірювання температури тільки на одній поверхні з одночасним вимірюванням температури навколишнього середовища. Перший підхід передбачений у будівельній практиці згідно з вимогами ГОСТ 26254–84. Зважаючи на наявність природної нестаціонарності температурного поля захисної конструкції, вимірювання проводять протягом тривалого часу (до декількох діб), після чого вибирають квазістаціонарний період і розраховують термічний опір стінки [10].

Ключова роль тепловізійного контролю у процедурі вимірювання – визначення температурного розподілення T_w^{out} по всій поверхні огороджувальної конструкції. При цьому теплопередача крізь стіну є стаціонарною. Стаціонарність є обов'язковою умовою, якщо використовуються формули, рекомендовані зарубіжними стандартами, тоді щільність теплового потоку крізь огороджувальні конструкції становить:

$$Q_{cur_av} = Q_{cur_ref} \frac{T_{outav}^{w} - T_{out}^{air}}{T_{outref}^{w} - T_{out}^{air}}, \quad (2)$$

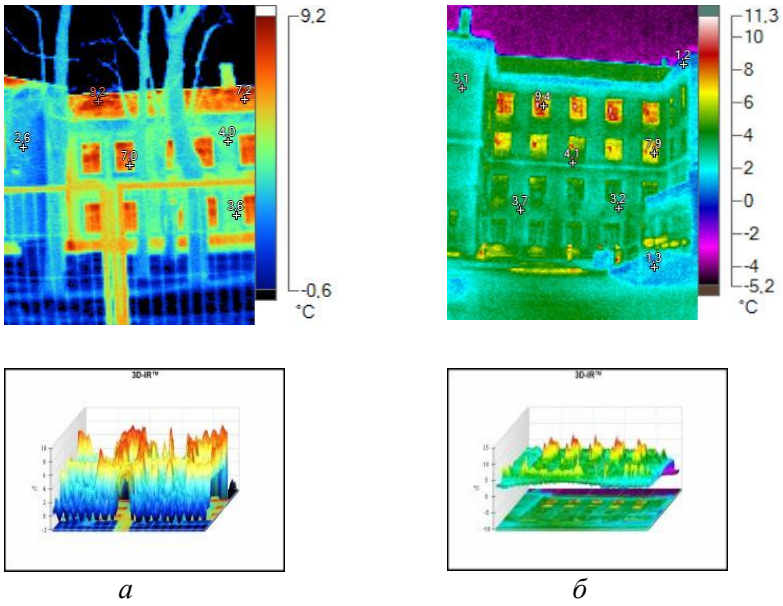
де Q_{cur_ref} – це наявне значення щільності теплового потоку у вибраній еталонній точці на внутрішній поверхні стіни; $T_{outref}^{w} - T_{out}^{air}$ – різниця температур зовнішньої поверхні стін у еталонній точці та зовнішнього повітря; T_{outav}^{w} – середня температура зовнішньої стіни, розрахована за допомогою усереднення результатів тепловізійної зйомки. Приймається, що за рахунок лінійного характеру теплопередачі щільність потужності теплового потоку у різних точках пропорційна різниці температур зовнішньої стіни та зовнішнього повітря. При цих розрахунках ми не розглядаємо тепловтрати за рахунок вентиляції.

Рівняння (2) дозволяє перетворити звичайну термограму зовнішньої стіни у зображення з калібруванням потужності теплового потоку. Тоді загальні тепловтрати можливо оцінити за формулою:

$$W = Q_{cur_ref} \tau S \frac{T_{outav}^{w} - T_{out}^{air}}{T_{outref}^{w} - T_{out}^{air}} \frac{T_{air}^{in} - T_{air}^{out}}{T_{airnorm}^{in} - T_{airnorm}^{out}}, \quad (3)$$

де S – область, в якій здійснено усереднення результатів тепловізійних замірів. Величина Q_{cur_ref} залежить від опору теплопередачі стіни, а інші параметри коректують тепловтрати по всій поверхні огороджувальної конструкції згідно з нормативами [11].

Так, проведена експериментальна тепловізійна зйомка деяких бюджетних будівель м. Чернігова (рис. 5, 6) доказує не найкращий стан енергоефективності таких будівель при одночасному зменшенні споживання будівлями тепла за статистичними даними (рис. 2), що потребує більшого моніторингу, аналізу, а також енергоощадних заходів для економії коштів під час ініціювання проектів.



а *б*

Рис. 5. Термографічна зйомка та 3D частотно-температурна гістограма: а – дитсадок № 7 і б – школа № 3 з боку двору

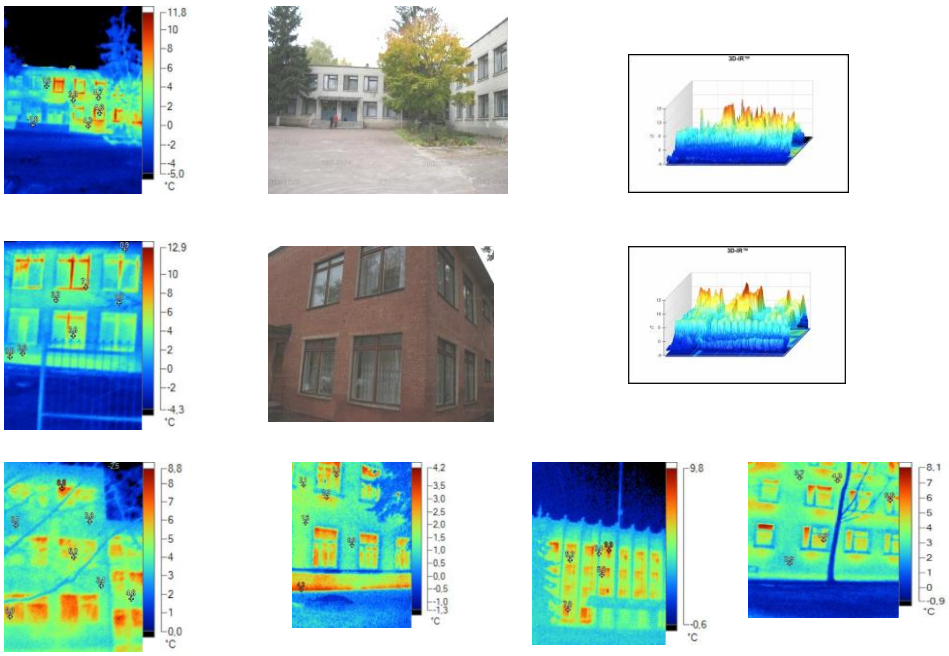


Рис. 6. Інфрачервоні термограми поверхні фасадів бюджетних будівель м. Чернігова

Висновки. Використовуючи ціннісний підхід у плануванні проектів, створено опис інформаційних технологій та технічних засобів у моніторингу енергоощадності бюджетних будівель м. Чернігова. Запропоновано у подальшому створити загальну он-лайн

інформаційну систему моніторингу енергоощадності муніципальних бюджетних будівель у мережі Інтернет. Недостатньо вивчено час реагування на ухвалення рішень та ініціювання проектів згідно з он-лайн моніторингом.

Список використаних джерел

1. *Програма* енергозбереження в закладах охорони здоров'я м.Чернігова на 2013–2017 роки. Рішення міської ради 27 квітня 2012 року (20 сесія 6 скликання).

2. *Енергетичний* менеджмент / А. В. Праховник, О. І. Соловей, В. В. Прокопенко та ін. ; К. : ІЕЕ НТУУ «КПІ», 2001. – 472 с.

3. *Ратушняк Г. С.* Управління проектами енергозбереження шляхом термореновації будівель : навчальний посібник / Г. С. Ратушняк, О. Г. Ратушняк. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 106 с.

4. *Сергієнко І. В.* Наукові ідеї В. М. Глушкова та розвиток актуальних напрямів інформатики / І. В. Сергієнко. – К. : Наукова думка, 2013. – 288 с.

5. *Казимир В. В.* Модельно-орієнтоване управління інтелектуальними виробничими системами : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.13.06 / В. В. Казимир ; НАН України, Інститут проблем математичних машин і систем. – К., 2006.

6. *Вавилов В. П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. – М. : Спектр, 2009. – 544 с.

7. *Табунщиков Ю. А.* Энергоэффективные здания / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач, Н. В. Шилкин. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200 с.

8. *Бушуев С. Д.* Ценностный подход в управлении развитием сложных систем / С. Д. Бушуев, Д. А. Харитонов // Управління розвитком складних систем. – К. : КНУАіБ. – 2010. – № 1. – С. 10–15.

9. *Бушуева Н. С.* Модели и методы проактивного управления программами организационного развития / Н. С. Бушуева. – К. : Наук. світ, 2007. – 270 с.

10. *Нестерук Д. А.* Тепловой контроль и диагностика : учебное пособие / Д. А. Нестерук, В. П. Вавилов. – Томск, 2007. – 104 с.

11. *Вавилов В. П.* Пессимистический аспект тепловизионного энергоаудита строительных сооружений / В. П. Вавилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 12. – С. 49–54.

УДК 004.622

Е.А. Новохатская, аспирант
А.Б. Кунгурцев, канд. техн. наук
Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина

ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕКСЕМ ПРИ ГРУППИРОВКЕ ЗАПРОСОВ В МЕТОДЕ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ОБНОВЛЕНИЯ МП

К.А. Новохатська, аспірант
О.Б. Кунгурцев, канд. техн. наук
Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, Україна

ФОРМУВАННЯ ЛЕКСЕМ ПРИ ГРУПУВАННІ ЗАПИТІВ У МЕТОДІ ІНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ОНОВЛЕННЯ МП

Yekaterina Novokhatska, PhD student
Aleksey Kungurtsev, PhD inTechnical Sciences
Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

FORMATION OF TOKENS IN QUERY GROUPING IN THE METHOD OF INCREMENTAL MAINTENANCE OF MATERIALIZED VIEWS

Рассмотрены проблемы группировки запросов в методе инкрементального обновления материализованных представлений. Предложен алгоритм формирования лексем, учитывающий синтаксические особенности языка SQL. Снижена ресурсоемкость методики группировки запросов путем перехода от текстовых алгоритмов сравнения запросов к числовым.

***Ключевые слова**: группировка запросов, формирование лексем, инкрементальное обновление, материализованное представление.*

Розглянуто проблеми групування запитів у методі інкрементального оновлення матеріалізованих представлень. Запропоновано алгоритм формування лексем, що враховує синтаксичні особливості мови SQL. Знижено ресурсоємність методики групування запитів завдяки переходу від текстових алгоритмів порівняння запитів до числових.

Ключові слова: *групування запитів, формування лексем, інкрементальне оновлення, матеріалізоване представлення.*

The paper presents questions of query grouping in the method of incremental update of materialized views. The algorithm of token formation that takes into account syntactic features of SQL is offered. Resource consumption of query grouping technique is lowered by transition from text comparison algorithms to numeric.

Key words*: query grouping, tokens formation, incremental update, materialized view.*

Постановка проблемы. С ростом объемов данных, содержащихся в современных СУБД, понадобились новые подходы к предоставлению эффективного доступа к информации. Одним из способов повышения производительности запросов стало использование материализованных представлений (МП), которые представляют собой физические объекты базы данных, содержащие предварительно вычисленные результаты выполнения запроса.

Для достижения большей эффективности МП их стали использовать не только для оптимизации одиночных ресурсоемких запросов, но и для целых групп запросов, схожих по синтаксису и обрабатываемым данным. Так появился вопрос о создании автоматизированных инструментов, которые бы позволили проанализировать журнал транзакций СУБД и определить схожие группы запросов-кандидатов на материализацию.

Анализ последних исследований и публикаций. Одной из подзадач при группировке запросов является их представление к виду, удобному для сравнения и дальнейшей обработки. В работе [1] было предложено разбивать запрос на следующие множества:

1) набор полей фразы FROM;
2) набор полей фразы SELECT и WHERE;
3) условия выборки полей фразы WHERE, приведенные к дизъюнктивной либо конъюнктивной форме.

Разбиение запроса осуществлялось посредством использования регулярных выражений. Полученные множества сравнивались и по результатам сравнения формировались группы.

Преимуществом данной методики является ее простота. Однако в ней не принимаются во внимание многие конструкции современного языка SQL, что делает группировку неточной. Алгоритм не учитывает иерархические, коррелированные запросы, подзапросы, фразы WITH и т. д., что существенно сокращает область его использования. При дальнейшей обработке необходимо оперировать строковыми данными, что неудобно и требует лишних ресурсов. Так как сравниваются только поля, таблицы и логическая структура запроса, группу могут формировать запросы, результат которых существенно различается.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Нами предлагается разбиение запроса на лексемы с учетом грамматики языка SQL и их представление в виде числовых векторов, что при дальнейшей группировке позволит повысить качество сформированных групп и снизить ресурсоемкость методики путем оперирования только числовыми данными.

Цель статьи. Главной целью данной работы является:

1. Снижение ресурсоемкости методики группировки запросов путем оперирования числовыми данными.
2. Повышение качества формирования лексем с учетом синтаксиса языка SQL.
3. Повышение качества группировки с помощью расширения критериев сравнения запросов.

Входные данные. Пусть в результате работы некоторой информационной системы за некоторый период времени τ был сформирован журнал транзакций, содержащий множество запросов $S = \bigcup_{k=1}^{K} s_k \langle query \rangle$, где K – число записей в журнале транзакций, *query* – текст запросов вида *SELECT*.

Обработка данных. Введем понятие атомарной лексемы. Под атомарной лексемой *l* будем понимать одно или более выражений языка SQL такие, как названия полей, имена и псевдонимы таблиц, константы, функции, операторы, являющиеся минимальными смысловыми единицами при формировании фраз *SELECT, FROM, WHERE*, условий сортировки, группировки и т. д.

Словарем лексем *V* будем называть множество уникальных лексем $L = \bigcup_{n=1}^{N} l_n$, где N – общее число найденных лексем при разборе множества запросов *S*. Каждая запись словаря *V* описывается двойкой вида $<l_n, n>$, $n=1..N$, где l_n – текущая лексема, n – ее идентификатор (порядковый номер) в словаре *V*.

Для каждого запроса s_k, $k=1..K$ составим вектор D_k, содержащий множество лексем из словаря *V*, найденных при разборе данного запроса. Для простоты обработки данных вместо лексем при составлении вектора D_k будем оперировать их порядковыми номерами из словаря *V*. Число вхождений лексемы *l* в вектор D_k может быть больше 1.

Опишем алгоритм разбора запроса s_k, $k=1..K$. Словарь лексем $V = \{\varnothing\}$, $N = 0$.

Шаг 0. Инициализация.

Инициализируем коллекцию запросов $T=\{s_k\}$. *J* – число элементов коллекции T – равно единице. $D_k = \{\varnothing\}$.

Шаг 1. Подготовка запросов к разбору.

Для каждого запроса t_j, $j=1..J$ из множества T выполним следующие действия:

1.1. Удаление комментариев.

1.2. Замена числовых констант на шаблон @NUMBER.

1.3. Замена строковых констант и дат на шаблон @LITERAL.

1.4. Замена переменных на шаблон @BINDING.

1.5. Исключение операторов DISTINCT.

1.6. Удаление фраз ORDER BY.

1.7. Удаление псевдонимов таблиц.

Данный шаг позволяет на первом же этапе идентифицировать одинаковые по синтаксической структуре запросы, отличающиеся лишь значениями констант и переменных.

Фразы ORDER BY исключаются из разбора, т. к. способ сортировки результирующих данных не интересен с точки зрения формирования МП.

Два одинаковых запроса, различающихся только наличием DISTINCT, можно считать условно равнозначными, т. к. МП для запроса без фильтрации уникальных значений полностью покроет запросы с фильтрацией. Таким образом, фраза DISTINCT также не принимается во внимание при группировке запросов.

Шаг 2. Поиск конструкций *WITH* и блоков, объединенных операциями над множествами.

Посредством регулярных выражений для каждого запроса t_j, $j=1,J$ выделим фразу *WITH*, воспользовавшись следующей грамматической конструкцией, записанной в РБНФ:

t_j := *WITH* <alias> *AS '('* <sq_1> *')' [{,* <alias> *AS '('* <sq_i> *')'*$\}_{i=2}^{H}$*] SELECT…,*

где sq_i, $i=1..H$ – текущий подзапрос, *alias* – имя подзапроса, *H* – число подзапросов в фразе *WITH*.

Исключим конструкцию *WITH* из исходного запроса t_j. Найденные подзапросы sq_i, $i=1..H$ добавим в коллекцию *T*:

$T = T \bigcup sq_i \mid i = \overline{1,H}$, $J = J+H$.

Аналогичным образом выделим независимые блоки запросов, объединенные операциями над множествами:

t_j := <sq_1> *{(UNION ALL|UNION|INTERSECT|MINUS)* <sq_i>$\}_{i=2}^{W}$,

где *W* – число запросов, участвующих в объединении.

Каждый запрос sq_i, $i=1..W$ также в дальнейшем будем интерпретировать как самостоятельные запросы, добавив их в коллекцию T. Сам запрос t_j, который был разбит на несколько запросов sq_i, $i=1..W$, должен быть исключен из множества T:

$T = T \bigcup \{sq_i \mid i = \overline{1,W}\}$, $T = T \setminus \{t_j\}$, $J = J+W-1$.

Шаг 3. Поиск коррелированных запросов во фразе SELECT.

Нередко в запросах используются коррелированные подзапросы следующего вида:

SELECT s.object_id AS tree_id,

(SELECT root FROM trees WHERE tree_id = s.obj_id AND rownum = 1) AS root_id

FROM objects s.

В общем виде:

$t_j := SELECT\ ...\ [\{'('\ <sq_i>\ ')'\}_{i=1}^{X}]\ ...\ FROM...$

Добавим найденное множество подзапросов sq_i, $i=1..X$ во множество T. Сами подзапросы в запросе t_j заменим шаблоном "@SUBQUERY".

Шаг 4. Разбор фразы FROM.

Для каждого запроса t_j, $j=1..J$, принадлежащего множеству J, выделим фразу FROM:

$t_j := ...FROM\ <from_clause>\ '('SELECT|WHERE|GROUP\ BY|ORDER\ BY|;')'...;$

$<from_clause> := <l_1>[\{,<l_i>\}_{i=2}^{Y}]$.

Проверяем наличие найденных лексем l_i, $i = 1..Y$ в словаре данных V. Если лексемы не были найдены, добавляем их в виде двойки $<l_i, N+i>$. Полученные идентификаторы $N+i$ добавляем в вектор D_k.

Шаг 5. Разбиение фраз JOIN на лексемы.

При разборе FROM фраз воспользуемся следующими языковыми конструкциями для анализа JOIN выражений:

$t_j := ...< l_1>[INNER]\ JOIN < l_2>$

$(ON <l_3>[\{(AND|OR)\ <l_i>\}_{i=4}^{Z}]|USING <l_3>[\{,<l_i>\}_{i=4}^{Z}])...;$

$t_j := ...< l_1>(CROSS|NATURAL\ [INNER|OUTER])\ JOIN < l_2>...;$

$t_j := ...< l_1>(FULL|LEFT|RIGHT)\ [OUTER]\ JOIN < l_2>$

$(ON <l_3>[\{(AND|OR)<l_i>\}_{i=4}^{Z}] \mid USING <l_3>[\{,<l_i>\}_{i=4}^{Z}])....$

Аналогично предыдущему шагу анализируем найденные лексемы l_i, $i = 1..Z$, добавим их в словарь V и заполним вектор D_k.

Шаг 6. Анализ фраз WHERE.

Разобьем найденные фразы WHERE на множество простых условных предикатов и добавим их в словарь данных V. Сформируем вектор D_k:

$t_j := ...WHERE\ <w_clause>\ ('('SELECT|ORDER\ BY|GROUP\ BY|WITH|;')'\ AS|START\ WITH)...$

$<w_clause> := <l_1>[\{(AND|OR)<l_i>\}_{i=2}^{U}]$.

Шаг 7. Разбиение иерархической функции на атомарные составляющие.

Выделим лексемы из иерархических запросов, используя данное выражение:

$t_j := ...START\ WITH <l_1>[\{(AND|OR)<l_i>\}_{i=2}^{A}]\ CONNECT\ BY\ [NOCYCLE]\ [PRIOR]$

$<l_{A+1}>[\{(AND|OR)<l_j>\}_{j=A+2}^{A+B}]\ \}\ (;|')'|WHERE|ORDER\ BY)...$

Аналогичным образом обработаем найденные лексемы l_n, $n = 1..A+B$.

Шаг 8. Выделение лексем из фраз GROUP BY и HAVING.

$t_j := ...GROUP\ BY <l_1>[\{,<l_i>\}_{i=2}^{E}][HAVING <l_{E+1}>[\{(AND|OR)<l_j>\}_{j=E+2}^{E+F}]]$.

В случае отсутствия найденных лексем l_i, $i = 1..E+F$ в словаре данных V добавляем их в виде двойки $<l_i, N+i>$. Полученные идентификаторы $N+i$ добавляем в вектор D_k.

Шаг 9. Разбиение фраз SELECT на лексемы.

Чтобы разбить фразу SELECT на множество названий полей, констант и функций воспользуемся данной языковой конструкцией:

t_j := *SELECT* $<l_1>[\{,<l_i>\}_{i=2}^{C}]$ *FROM…*

Пополняем словарь данных *V* и вектор D_k, добавив в них сформированные лексемы l_i, $i = 1..C$.

Таким образом, для запроса s_k, $k=1..K$ составлен вектор D_k. Инкрементируем значение *k* и возвращаемся к шагу 0.

Работу предложенного алгоритма рассмотрим на примере запроса S_1:

```
select    s1.rt object_id, s1.reference, np.object_id value
from      params np,
          (select connect_by_root nr.object_id rt, nr.reference
          from   references nr
          where  nr.attr_id = 1
          start with nr.object_id in (2, 3, 4) and nr.attr_id = 5
          connect by prior  nr.reference = nr.object_id and nr.attr_id = 6
          order by  LEVEL) s1
          where np.object_id = s1.reference and np.attr_id = 7 and rownum=8;
```

Словарь лексем *V*, сформированных для S_1, представлен в табл. 1. Для наглядности к каждой лексеме был добавлен префикс в виде названия фразы, в которой эта лексема была найдена (“select”, “from” и т. д.).

Таблица 1

Словарь лексем для запроса S_1

N	*l*
1	*select rt*
2	*select reference*
3	*select object_id*
4	*from params*
5	*select connect_by_root object_id*
6	*from references*
7	*where attr_id = @NUMBER*
8	*start with object_id in (@NUMBER, @NUMBER, @NUMBER)*
9	*start with attr_id = @NUMBER*
10	*connect by prior reference = object_id*
11	*connect by prior attr_id = @NUMBER*
12	*order by LEVEL*
13	*where object_id = reference*
14	*where attr_id = @NUMBER*
15	*where rownum=@NUMBER*

В результате анализа запроса получен следующий числовой вектор:

D_1 = *{1, 2 (2), 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15}.*

Как можно заметить, лексема L_2 <"*select reference*"> встречается в векторе D_1 дважды.

Аналогично для запроса S_2:

```
select    object_id
from      references
where     attr_id = 9
          and rownum = 10.
```

Используя уже существующий словарь *V*, получаем следующий вектор:

D_2 = *{3, 6, 14, 15}.*

Как видно из приведенного выше примера, словарь лексем минимизирует затраты ресурсов на хранение запросов, т. к. содержит только уникальные лексемы. Представ-

ление запросов в виде числовых векторов, упрощает операцию их сравнения, а также расширяет разнообразие алгоритмов, которые могут быть применены на следующем шаге для получения групп синтаксически близких запросов. Помимо текстовых алгоритмов поиска дубликатов в программном коде к ним, например, добавляются алгоритмы кластеризации категорийных данных, такие как CLOPE [2], Cobweb [3] и т. д.

Сравнительный анализ алгоритмов. Для проведения сравнительного анализа предшествующего алгоритма [1] (далее «Алгоритм 1») и предложенного алгоритма (далее «Алгоритм 2») было сгенерировано множество запросов по классификации, описанной в работе [4]:

– простые запросы на выборку;

– простые запросы с группировкой;

– простые многотабличные запросы;

– запросы, использующие подзапросы и коррелированные запросы (в том числе блоки WITH);

– запросы с простым объединением по равенству;

– многотабличные запросы с объединениями и агрегациями;

– иерархические запросы;

– запросы с аналитическими функциями.

При генерации запросов использовалась грамматика языка Oracle SQL.

1. Ресурсоемкость алгоритмов. Анализ потребляемых ресурсов был проведен для журнала транзакций Oracle СУБД в 64-битной JVM. Для хранения данных использовались примитивные типы данных и массивы. Количество запросов в журнале транзакций – 1389 записей, из них – 524 уникальных запроса. Результаты анализа сведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ алгоритмов по ресурсоемкости

Параметр	Алгоритм 1, байт	Алгоритм 2, байт
Размер словаря лексем	–	42 230
Размер структуры	482 100	43 415
Общий размер потребляемой памяти	482 100	85 645

Таким образом, за счет использования Алгоритма 2 размер памяти, потребляемой для хранения результатов разбора запросов, сократился в 5,6 раз.

2. Покрытие синтаксиса языка SQL. В результате экспериментального анализа было установлено, что Алгоритм 1 не поддерживает разбор запросов, содержащих блоки WITH, иерархии и аналитические функции. Для сложных многотабличных запросов и подзапросов также были получены неудовлетворительные результаты – часть из них была обработана с ошибками, остальные попали в список исключений и не прошли разбор. Результат анализа сведен в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительный анализ алгоритмов по покрытию синтаксиса языка SQL

Вид запроса	Алгоритм 1	Алгоритм 2
Простые запросы на выборку	+	+
Простые запросы с группировкой	+	+
Простые многотабличные запросы	+	+
Запросы с подзапросами	частично	+
Запросы с блоками WITH	-	+
Запросы с простым объединением по равенству	+	+
Многотабличные запросы с объединениями и агрегациями	частично	+
Иерархические запросы	-	+
Запросы с аналитическими функциями	-	+

3. Качество сформированных групп определялось путем их сравнения с эталонами, сформированными вручную. При вычислении данной метрики использовались только те запросы, которые были покрыты обоими алгоритмами.

Поскольку на выходе анализируемых алгоритмов получены данные различной структуры, на шаге группировки запросов также применялись разные методики. Для Алгоритма 1 использовалось решение, предложенное в работе [1]. Запросы сопоставлялись путем сравнения их логической структуры, а именно дизъюнктивной либо конъюнктивной канонической формы.

Лексемы, полученные с помощью Алгоритма 2, обрабатывались с помощью алгоритма кластеризации CLOPE [5], основанного на использовании гистограмм.

Полученные с помощью двух методик группы запросов были сопоставлены с эталонными значениями. Процент ошибки был рассчитан как отношение числа запросов, попавших в эталонную группу, к общему числу запросов.

За счет учета синтаксических особенностей запросов помимо анализа их логической структуры нам удалось на 20 % улучшить качество сформированных групп по сравнению с предыдущей методикой. Однако данная метрика является не точной, т. к. не учитывает ошибку ручного формирования эталонных групп и влияние разных алгоритмов группировки.

Выводы. Предложенный алгоритм формирования лексем позволил существенно сократить ресурсоемкость методики группировки запросов путем оперирования числовыми данными. Размер памяти, потребляемой для хранения результатов разбора запросов, сократился в 5,6 раз.

Учет синтаксиса языка SQL при формировании лексем позволил применить методику группировки к запросам, содержащим блоки WITH, иерархии и аналитические функции. Также было достигнуто улучшение качества разбора запросов, содержащих подзапросы.

За счет учета синтаксических особенностей запросов помимо анализа их логической структуры удалось на 20 % улучшить качество сформированных групп.

Список использованных источников

1. *Нгуен Чан Куок Винь*. Повышение эффективности применения материализованных представлений в автоматизированных системах с реляционными базами данных : дис. канд. техн. наук / Нгуен Чан Куок Винь. – Одесса, 2005. – 192 с.

2. *Yang Y*. CLOPE: A Fast and Effective Clustering Algorithm for Transactional Data / Y. Yang, X. Guan, J. You // Knowledge Discovery and Data Mining. – 2002. – P. 682–687.

3. *Fisher D*. Knowledge Acquisition Via Incremental Conceptual Clustering / D. Fisher // Machine Learning 2. – 1987. – P. 139–172.

4. *Новохатская Е. А*. Методика генерации функций обновления в методе инкрементального обновления материализованных представлений / Е. А. Новохатская, Ю. Н. Возовиков // Вісник СумДУ. Серія «Технічні науки». – № 3. – 2011. – С. 82–96.

5. *Новохатська К. А*. Зниження обчислювальної складності задачі групування запитів у методі інкрементального оновлення МП із застосуванням алгоритму CLOPE / К. А. Новохатська, А. Б. Кіпер // Інтелектуальні технології в системному програмуванні : збірник наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів. – Хмельницький, 2013. – С. 120–121.

РОЗДІЛ VI. ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.3.011.74.005

В.І. Сенько, д-р техн. наук
В.В. Михайленко, канд. техн. наук
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛАХ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ТРИФАЗНОЇ НАПРУГИ У ПОСТІЙНУ З П'ЯТИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

В.И. Сенько, д-р техн. наук
В.В. Михайленко, канд. техн. наук
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ТРЕХФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ПОСТОЯННОЕ С ПЯТИЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЯМ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Vitalii Senko, Doctor of Technical Sciences
Vladyslav Myhailenko, PhD in Technical Sciences
National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute», Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN CIRCUITS WITH SEMICONDUCTOR CONVERTERS OF THE THREE-PHASE VOLTAGE IN CONSTANT WITH FIVE ZONED REGULATIONS OF THE OUTPUT VOLTAGE

Проведено аналіз електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами. Створено математичну модель для аналізу електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги. Наведено графіки, що відображають електромагнітні процеси в електричних колах.

Ключові слова: *електромагнітні процеси, вихідні напруга та струм.*

Проведено анализ электромагнитных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами. Создано математическую модель для анализа электромагнитных процессов в полупроводниковых преобразователях с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения. Приведено графики, которые отражают электромагнитные процессы в электрических цепях.

Ключевые слова: *электромагнитные процессы, выходные напряжение и ток.*

Analysis of the electromagnetic processes is organized beside this article in electric circuit with semiconductor commutator. Mathematical model is created for analysis electro-magnetic processes in semiconductor converter with width pulsed regulation of the output voltage. The broughted graphs, which reflect the electromagnetic processes in electric circuit.

Key words: *electromagnetic processes, output voltage and current.*

Сучасні тенденції якісного перетворення електричної енергії, а також успіхи у розвитку напівпровідникової техніки дозволяють використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою переключення вентилів значно більшої від частоти змінної напруги промислової мережі. У роботах [1-3] показана доцільність використання структур перетворювачів частоти (ПЧ) з однократною модуляцією під час побудови систем вторинного електропостачання для комплексів діагностики електромеханічних пристроїв із різноманітним видом вхідної енергії. У цій роботі проводиться аналіз аспекту використання тієї ж структури ПЧ як ланки високої частоти, що стосується побудови й аналізу перетворювачів для електромеханічних комплексів із широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) постійної напруги при п'ятизонному керуванні.

Метою роботи є використання методу багатопараметричних функцій з використанням пакета MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами.

Узагальнена структурна схема перетворювача показана на рис. 1. На структурній схемі позначені: СМ*A*, СМ*B*, СМ*C* – силові модулятори (СМ) фазних напруг *A*, *B* і *C* від-

повідно, ВВ – високочастотний випрямляч, Н – навантаження. Сукупність СМ, підключених до енергетичної мережі паралельно і з'єднаних по виходу послідовно, представляє собою ланку високої частоти перетворювача. Структура СМ представлена на рис. 2.

На структурній схемі, показаній на рис. 2, позначені: ІВН – інвертор випрямленої напруги, Т – узгоджувальний трансформатор, n – номер ІВН.

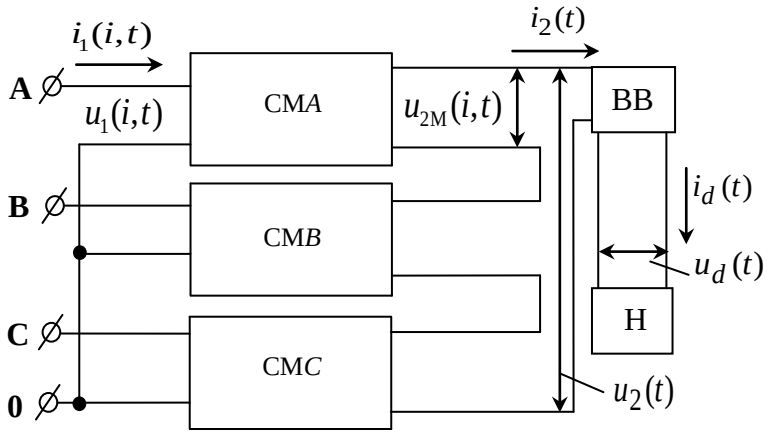


Рис. 1. Структурна схема перетворювача

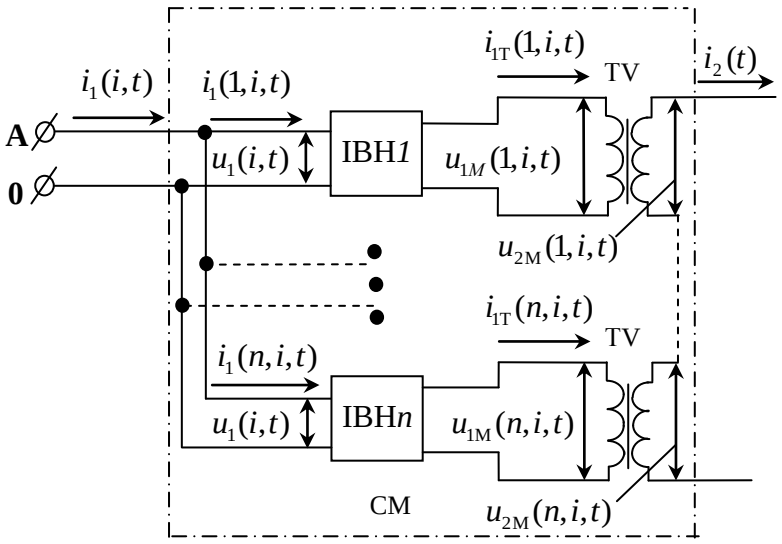


Рис. 2. Структурна схема силового модулятора

Таким чином, кожен СМ має у своєму складі N ІВН, де N – це кількість інверторів.

Створення математичної моделі перетворювача передбачає розроблення математичного забезпечення, спроможного провести аналіз його електромагнітних процесів відносно енергії, яка генерується, з урахуванням характеру навантаження, енергії, яка при цьому споживається, а також енергії, яка перетворюється в окремих ланках і елементах перетворювача.

Під час складання математичної моделі перетворювача із комп'ютерною орієнтацією її застосування використаємо метод багатопараметричних модулюючих функцій [4], який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача. При цьому приймемо такі припущення: вхідна енергетична мережа симетрична і її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди ІВН представляються ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори не мають втрат, а навантаження перетворювача має еквівалентний активно індуктивний характер.

Така структура дозволяє реалізувати багатоканальний спосіб перетворення параметрів електромагнітної енергії мережі, при якому в СМ здійснюється розгалужена моду-

ляція миттєвих значень попередньо випрямлених фазних напруг $u_1(t)$, частоти ω1, трифазної енергетичної мережі відповідними еквівалентними модулюючими впливами $\psi(\alpha_P, t)$, частоти ω2. В результаті такої операції на виході кожного з ІВН формується промодульована напруга

$$u_{2M}(p,i,t) = k_T \cdot u_1(i,t) \cdot \phi(i,t) \cdot \psi(\alpha_P, t), \quad (1)$$

де i = 1, 2, 3 – номери фаз енергетичної мережі; k_T – коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора; p = 1, 2, 3, …, n – номери зон регулювання вихідної напруги; $\phi(t)$ – функції прямокутного синуса, що збігаються за часом із положенням відповідних фазних напруг мережі; $u_1(i,t)$ – миттєві значення вхідної напруги мережі.

Функції прямокутного синуса подаються, як

$$\phi(i,t) = \operatorname{sign}\left\{\sin\left(\omega_1 t - \frac{(-1)2\pi}{3}\right)\right\}, \quad (2)$$

а миттєві значення вхідної напруги мережі представлені у вигляді

$$u_1(i,t) = U_{1m} \sin\left(\omega_1 t - \frac{(-1)2\pi}{3}\right), \quad (3)$$

U_{1m} – амплітудне значення фазної напруги.

Еквівалентні модулюючі впливи подаються виразом

$$\psi(\alpha_P, t) = \frac{1}{2}\sum_2 \operatorname{sign}\left[\sin(\omega_2 t \pm \alpha_P(t) - \varphi)\right], \quad (4)$$

де $\alpha_P(t)$ – кути управління, за рахунок зміни яких забезпечується ШІР вихідної напруги перетворювача; φ – початкова фаза еквівалентних модулюючих впливів.

У перетворювачі забезпечується почергова зміна кутів керування в діапазоні від 0^0 до 90^0. У формуванні напруги кожної зони керування задіяні три інвертора, які підключені до відповідних фаз мережі живлення. Умови зміни кутів керування в окремих зонах подаються у такому вигляді: $\alpha_P(t) = 0$, якщо $t < \frac{(p-1)T}{N=5}$; $\alpha_P(t) = \pi$, якщо $t > \frac{pT}{5}$, а інакше $\alpha_P(t) = f_X(p, N, t)$, де $f_X(p, N=5, t)$ – функція, яка задає закон зміни $\alpha_P(t)$, яка залежить від номера зони p і їх кількості N=5.

Вихідна напруга $u_2(t)$ ланки високої частоти перетворювача згідно з його структурною організацією та відповідно з виразом (1) представляється сумою

$$u_2(t) = \sum_{P=1}^{5}\sum_{i=1}^{3} k_T \cdot u_1(i,t) \cdot \phi(i,t) \cdot \psi(\alpha_P, t), \quad (5)$$

а вихідна напруга перетворювача $u_d(t)$, як випрямлена напруга (6), подається виразом

$$u_d(t) = \sum_{P=1}^{5}\sum_{i=1}^{3} k_T \cdot u_1(i,t) \cdot \phi(i,t) \cdot \psi(\alpha_P, t) \cdot v(t), \quad (6)$$

де $v(t)$ – функція прямокутного синуса, що збігається за часом із положенням вихідної напруги $u_2(t)$ ланки високої частоти перетворювача.

$$v(t) = \operatorname{sign}(u_2(t)). \quad (7)$$

Часові діаграми ланки високої частоти $u_2(t)$ і перетворювача $u_d(t)$ побудовані за (1)–(6) при зміні величини кута управління α_P за лінійним законом в координатах від часу *t*, подані на рис. 3.

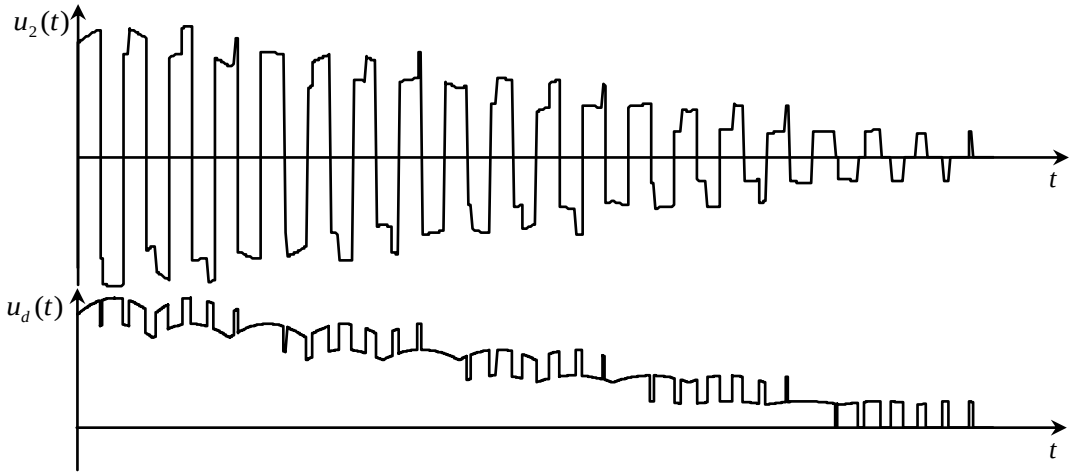


Рис. 3. Часові діаграми напруг $u_2(t)$ *і* $u_d(t)$

Для більш детального аналізу вихідної напруги перетворювача в (5) позначимо $u_1(t)\cdot\phi(\alpha_P,t)=|u_1(t)|$ і, враховуючи (3) і (4), а також те, що в (6) $\psi(\alpha_P,t)v(t)=|\psi(\alpha_P,t)|$, алгоритмічне рівняння перепишемо у вигляді

$$u_d(t)=\frac{1}{2k_{\text{T}}}\cdot\sum_{P=1}^{5}\left(\sum_{i=1}^{3}\left(\left|U_{1m}\sin\left(\omega_1 t-\frac{i-1}{3}2\pi\right)\right|\cdot\left|\sum_{2}\text{sign}\,\sin(\omega_2 t\pm(\alpha_P/2)-\varphi)\right|\right)\right). \quad (8)$$

Із наведених діаграм і (8) видно, що вихідна напруга перетворювача досягне максимальної величини за умови, що $\alpha_P(t)=0$. У цьому випадку частота пульсацій вихідної напруги $\omega_{\text{П}}=6\omega_1$, а (9) матиме вигляд

$$u_d(t)=\frac{1}{k_{\text{T}}}\sum_{P=1}^{5}\sum_{i=1}^{3}\left|U_{1m}\sin\left(\omega_1 t-\frac{i-1}{3}2\pi\right)\right|. \quad (9)$$

З останнього виразу легко знайти середнє значення вихідної напруги, яке подається, як

$$U_{d_0}=\frac{2{,}7}{k_{\text{T}}}\left(U_{11}+U_{12}+U_{13}+U_{14}+U_{15}\right)=2{,}7\left(U_{21}+U_{22}+U_{23}+U_{24}+U_{25}\right), \quad (10)$$

де U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{15} і U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}, U_{25} – відповідно діючі значення напруг первинної і вторинної обмоток узгоджувального трансформатора для першої, другої, третьої, четвертої та п'ятої зон регулювання $U_{2P}=\frac{1}{k_{\text{T}}}U_{1P}$.

Миттєві, а також середнє значення вихідної напруги $u_d(t)$ приймуть нульову величину при $\alpha_P(t)=\pi/2$. У повному діапазоні зміни $\alpha_P(t)$ регулювальна харектеристика перетворювача має вигляд

$$U_{d\alpha}=2{,}7\sum_{P=1}^{\text{N}}U_{2P}\cdot\gamma, \quad (11)$$

де $\gamma=t_i/T_2$ – коефіцієнт заповнення; t_i – ширина імпульсу вихідної напруги при ШІР; T_2 – період модулюючого впливу; $t_i=0\div T_2$; $T_2=2\pi/\omega_2$.

Струм навантаження знайдемо, як реакцію одноконтурного *RL*–ланцюга на дію напруги (7). Для цього диференціальне рівняння, складене для вихідного контуру перетворювача, представимо у вигляді

$$D(t, y) = \frac{u_d(t)}{L} - \frac{R}{L} y_0, \tag{12}$$

де y_0 – визначається з початкових умов; R і L – відповідно активний опір та індуктивність навантаження.

Рішення (12) відносно струму навантаження визначимо числовим методом у вигляді матриці

$$i_d(t) = \text{rkfixed}\ \ y, 0, k, s, D\ , \tag{13}$$

де y – вектор початкових умов; 0, k – часовий інтервал рішень; s – кількість точок на часовому інтервалі рішень; D – вектор функція диференційних рівнянь.

Еквівалентні моделюючі функції (4) і (7), які є безрозмірними і мають одиничну амплітуду, можна розглядати як функції перетворення, що визначають залежність вхідного струму від вихідного струму, який показаний у вигляді рішення (12) співвідношенням (13). Для визначення вхідного струму $i_2(t)$ високочастотного випрямляча необхідно (13) розділити на (7). Якщо в функції перетворення є нульовий рівень, операцію ділення на повному періоді існування (8) виконати неможливо. Це приводить до необхідності знаходження струму перед високочастотним випрямлячем на інтервалах ненульового значення з наступним припасовуванням результатів окремих підрахунків. Однак подання (7) функцією одиничної амплітуди дозволяє визначити струм $i_2(t)$ перемноженням (13) на (7) і тим самим спростити процес підрахунків, представляючи результати на повному інтервалі існування (7) і (13). Таким чином, вхідний струм високочастотного випрямляча має вигляд

$$i_2(t) = i_d(t) \cdot v(t). \tag{14}$$

Для визначення вхідних струмів інверторів *i*–х фаз для кожної р–ї зони регулювання врахуємо, що $i_2(t)$ протікає в загальному контурі всіх СМ, утвореному послідовно з'єднаними вторинними обмотками узгоджувальних трансформаторів і приймемо до уваги алгоритмічне рівняння (6) і те, що (2),(4) і (7) є функціями одиничної амплітуди.

При цьому в загальному вигляді

$$i_1(n, i, t) = \frac{i_2(t)\psi(\alpha_P, t)\phi(i, t)}{3k_T}. \tag{15}$$

Часові діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача і вхідних струмів інверторів в координатах фазних напруг енергетичної мережі, побудовані за (13) – (15) для п'ятизонного регулювання, представлені на рис. 4.

Вхідні струми інверторів $i_1(n, i, t)$ можуть бути визначені при відомому струму навантаження без попереднього розрахунку вихідного струму $i_2(t)$ ланки високої частоти за (14). Для цього треба прийняти до уваги алгоритмічне рівняння (6) і тоді, враховуючи (13), отримаємо

$$i_1(n, i, t) = \frac{i_d(t)\phi(i, t)\left|\psi(\alpha_P, t)\right|}{5k_T}. \tag{16}$$

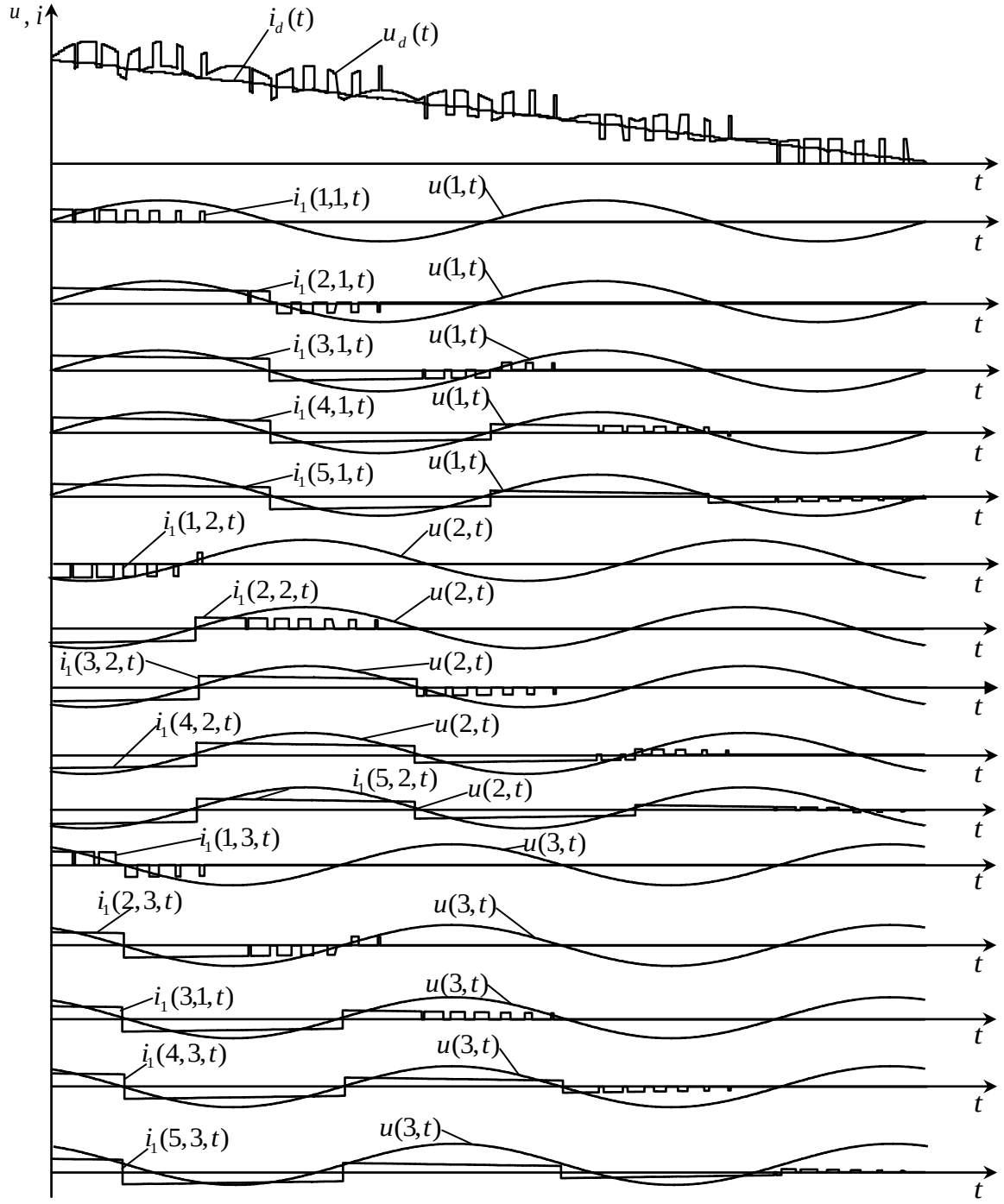


Рис. 4. Часові діаграми струму і напруги навантаження та вхідних струмів інверторів у координатах фазних напруг енергетичної мережі

Для визначення струмів *i*–х фаз енергетичної мережі у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги виконаємо сумування вхідних струмів інверторів усіх зон регулювання в кожній з *i*–й фазі. Враховуючи рівняння (16), загальний вираз для струмів *i*–х фаз енергетичної мережі подамо у вигляді

$$i_1(i,t) = i_1(1,i,t) + i_1(2,i,t) + i_1(3,i,t) + i_1(4,i,t) + i_1(5,i,t), \qquad (17)$$

де $i_1(1,i,t)$, $i_1(2,i,t)$, $i_1(3,i,t)$, $i_1(4,i,t)$, $i_1(5,i,t)$ – вхідні струми інверторів *i*–х фаз для першої, другої, третьої, четвертої та п'ятої зон регулювання.

Часові діаграми вхідних струмів *i*–х фаз енергетичної мережі в координатах фазних напруг, побудовані за (17) для трьохзонного регулювання, представлені на рис. 5.

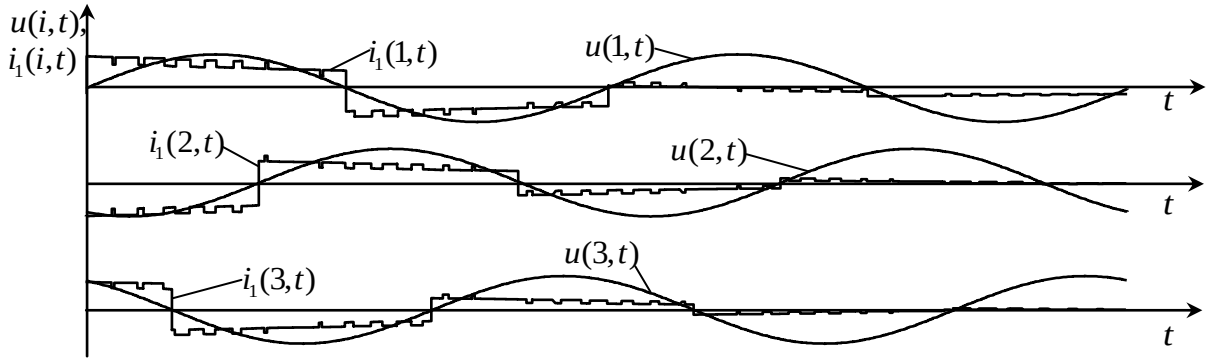


Рис. 5. Часові діаграми вхідних струмів і–х фаз енергетичної мережі в координатах фазних напруг

Для того, щоб знайти амплітудні значення струмів через силові транзистори ІВН, достатньо проаналізувати струми $i_{1\text{Т}}(n,i,t)$ первинних обмоток узгоджувальних трансформаторів, які знаходяться в колах протікання струмів через силові транзистори. Враховуючи (14) і кількість каналів перетворення енергії, отримаємо: $i_{1\text{Т}}(n,i,t)=\dfrac{i_2(t)}{5k_{\text{Т}}}$. За часом ці струми збігаються з вихідним струмом ланки високої частоти перетворювача.

Висновки і пропозиції. Підтверджено доцільність використання програмного пакета MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів та оптимізації параметрів напівпровідникових перетворювачів. Такий підхід дозволяє зменшити нестабільність режимів у технологічному навантаженні та режимів споживання електроенергії від мережі електроживлення.

Список використаних джерел

1. *Макаренко М. П.* Математична модель перетворювача трифазної напруги в постійну напругу / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко // Электроника и связь. – 2002. – № 14. – С. 73–75.

2. *Патент* 18750. України. МПК H02M 1/02. Інвертор напруги / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко, В. В. Пілінський ; заявник та власник патенту НТУУ «КПІ» ; заявл. 31.05.2006 ; опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11.

3. *Патент* 20985. України. МПК H02M 1/02. Модулятор випрямленої напруги / М. П. Макаренко, В. В. Михайленко ; заявник та власник патенту НТУУ «КПІ» ; заявл. 18.09.2006 ; опубл. 15.02.2007, Бюл. № 2.

УДК 621.039.58:349.7

М.В. Лапа, канд. техн. наук
Черниговский государственный институт экономики и управления, г. Чернигов, Украина
И.В. Моспан, заместитель командира
Воинская часть 3044, г. Южноукраинск, Украина
И.А.Терещенко, аспирант
Воинская часть 6916, г. Севастополь, Украина

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

М.В. Лапа, канд. техн. наук
Чернігівський державний інститут економіки і управління, м. Чернігів, Україна
І.В. Моспан, заступник командира
Військова частина 3044, м. Южноукраїнськ, Україна
І.А. Терещенко, аспірант
Військова частина 6916, м. Севастополь, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Maryna Lapa, PhD in Technical Sciences
Chernihiv State Institute of Economics and Management, Chernihiv, Ukraine
Ihor Mospan, deputy command officer
Military Unit 3044, Yuzhnoukrainsk, Ukraine
Ivan Tereshchenko, PhD student
Military Unit 6916, Sevastopol, Ukraine

PROGNOSTICATION OF THE RESIDUAL LIFE OF TECHNICAL MEANS OF PHYSICAL PROTECTION OF NUCLEAR POWER PLANTS

Рассмотрено оценивание показателей долговечности технических средств охраны АЭС с использованием корреляционно-регрессионного анализа.

***Ключевые слова**: остаточный ресурс, технические средства охраны, ядерный объект, корреляционно-регрессионный анализ.*

Розглянуто оцінювання показників довговічності технічних засобів охорони АЕС з використанням кореляційно-регресійного аналізу.

***Ключові слова**: залишковий ресурс, технічні засоби охорони, ядерний об'єкт, кореляційно-регресійний аналіз.*

The paper considers the evaluation of durability indexes of protection means of nuclear power plants using correlation and regression analysis.

***Key words**: residual life of equipment, technical means of protection, nuclear facility, correlation and regression analysis.*

Постановка проблемы. Одним из важнейших инструментов обеспечения международного режима нераспространения ядерного оружия, уменьшения угрозы ядерного терроризма является физическая защита ядерных установок, объектов, предназначенных для обращения с радиоактивными отходами [7; 20]. По результатам оценки уязвимости ядерной установки эксплуатирующая организация принимает решение о реконструкции или техническом переоснащении системы физической защиты. При проведении реконструкции или технического переоснащения системы физической защиты (СФЗ) необходимо обосновать замену или продление ресурса имеющихся технических средств охраны (ТСО).

Анализ последних исследований и публикаций. В [5] проведен анализ моделей долговечности и методов оценивания остаточного ресурса оборудования. Известен способ оценки остаточного ресурса для различных групп электротехнического оборудования АЭС по доминирующему параметру [18]. В [16] описан метод прямого прогнозирования остаточного ресурса на основе корреляционно-регрессионного анализа их ресурсных характеристик.

Выделение прежде не решенных частей общей проблемы. В нормативных документах МВД Украины [7; 4] отсутствует методика расчета остаточного ресурса для ТСО. Технические средства охраны находятся на балансе атомных электростанций (АЭС), по-

этому проведен анализ нормативной документации, используемой при учете данных о дефектах оборудования АЭС, оценке их показателей надежности [9; 1; 14; 15; 16; 12; 11; 13; 10; 8; 19; 3; 2]. В результате исследования структуры и порядка заполнения Украинской базы данных надежности (УБДН) АЭС выявлено, что в ней имеются данные о надежности оборудования подразделений АЭС, но отсутствует информация о дефектах и отказах, оценке показателей надежности технических средств охраны АЭС [3; 2]. Данные по T_n – гарантированному ресурсу, T_γ – γ-процентному ресурсу, T_r – техническому ресурсу для ТСО также отсутствуют в УБДН. Поэтому необходима апробация и усовершенствование существующих методов оценки остаточного ресурса (ОР), разработка методик оценивания ОР для ТСО СФЗ [4].

Цель статьи. Цель работы – оценивание ресурсных характеристик технических средств охраны ядерных объектов. Задачи исследования:

– провести анализ нормативной документации по оценке и учету показателей надежности технических средств охраны АЭС, моделей долговечности и методов оценивания остаточного ресурса оборудования;

– усовершенствовать процессы оценивания показателей долговечности ТСО СФЗ АЭС путем применения метода прямого прогнозирования остаточного ресурса сложных изделий на основе корреляционно-регрессионного анализа их ресурсных характеристик.

Изложение основного материала.

Анализ нормативной документации по оценке и учету показателей надежности технических средств охраны АЭС, моделей долговечности и методов оценивания остаточного ресурса оборудования

Недостатком существующего способа является то, что согласно [5; 18] функция изменения во времени доминирующего параметра является неизвестной, поэтому точное определение остаточного ресурса выполнить невозможно. Приблизительную оценку значения остаточного ресурса для продления срока эксплуатации оборудования проводят при следующих значительных допущениях, влияющих на точность и достоверность оценки:

– расчетный проектный срок службы при выполнении требуемых условий эксплуатации составляет 25 лет, при этом техническое состояние в конце этого срока эксплуатации приближается к предельному (коэффициент технического состояния K_i изменяется от 1 до 0);

– скорость изменения доминирующего параметра приблизительно равна средней скорости за последние 5 лет до момента испытаний;

– значение остаточного ресурса принимается с учетом ограничения: минимально допустимое значение коэффициента оценки технического состояния $K_{мин} = 0{,}2$.

Исследованы процессы оценки, анализа, учета показателей надежности, продления срока эксплуатации ТСО СФЗ АЭС. К ТСО относятся: системы передачи сигналов тревоги, системы теле-, видеонаблюдения, системы теле-, видеоконтроля, системы контроля и управления доступом, приборы приемно-контрольные, охранные и охранно-пожарные, сигнализационно-переговорные устройства, оповестители охранные, оповестители, источники бесперебойного питания и другие устройства питания, линейно-кабельные средства, измерительные приборы, оборудование и вспомогательное имущество. В таблице приведены результаты оценки состояния ТСО воинской части по охране АЭС на основании расчета коэффициента Кс (формула (1)) согласно руководящего документа МВД [7].

$$Кс = 1 - \frac{G_н}{G} = 1 - \frac{14{,}38}{268{,}25} = 0{,}95, \quad (1)$$

где $G_н$ – сумма произведений количества неисправных образцов технических средств на соответствующие им весовые коэффициенты;

G – сумма произведений количества проверенных образцов технических средств на соответствующие им весовые коэффициенты.

Расчет коэффициента K_c показал, что оценка состояния ТСО в/ч – «удовлетворительно».

Таблица

Оценка состояния ТСО воинской части по охране АЭС

Наименование технических средств	Количество (шт) (комплектов)	Значение весового коэффициента	Количество испорченных образцов ТСО	$G_н$ испорченных ТСО	G проверенных образцов
Ромб	1	0,4	-	-	0,4
Призма	4	0,4	-	-	1,6
Дон	6	0,3	-	-	1,8
Радиан	52	1,0	3	3	52
Инфракрасные средства обнаружения	20	0,5	3	1,5	10
Пион (Барьер)	40	1,0	2	2	40
Антенные системы на изоляторах больше чем 15 ниток	8	2,6	-	-	20,8
Антенные системы типа “кольцо”, “цилиндр”	13	0,15	4	0,6	1,95
Антенные системы козырькового типа	19	1,8	-	-	34,2
Средства видеонаблюдения: телекамеры поворотные устройства	 47 3	 0,5 0,2	 6 1	 3 0,2	 23,5 0,6
Распределительные шкафы	10	0,004	-	-	0,04
Выпрямитель	4	0,1	1	0,1	0,4
Аккумуляторы	40	0,02	40	0,8	0,8
Прожектора	70	0,3	8	2,4	21
Точки освещения	98	0,01	60	0,6	0,98
Электропривод	6	0,25	-	-	1,5
Электростанция с двигателем внутреннего сгорания	1	6,0	-	-	6,0
Кабина АК-3Б	16	2,5	-	-	40
АКПП типа “Сектор”	1	10,0	-	-	10,0
Датчик магнитоконтактный	68	0,01	18	0,18	0,68
Всего:				14,38	268,25

В результате проверки и изучения формуляров (паспортов) и других документов ТСО учитываются следующие технико-эксплуатационные показатели:

- год изготовления (дата);
- заводской номер;
- ввод в эксплуатацию (дата);
- находится в эксплуатации (лет, месяцев);
- наработка с начала эксплуатации (часов);
- установленные:
  - ресурс (часов);
  - срок эксплуатации (лет, месяцев);
  - гарантийная наработка (часов);
  - гарантийный срок (лет, месяцев);
- выполнено ремонтов (каких, дата);
- срок эксплуатации после последнего ремонта (лет, месяцев);
- наработка после последнего ремонта (часов);

– недоработка (переработка):
  - по назначенному ресурсу (часов);
  - по сроку эксплуатации (лет, месяцев);
  - по гарантийной наработке (часов);
  - по сроку пригодности (лет, месяцев).

В работах К.Н. Маловика [6] для исследования ОР сложных изделий предложено использовать ресурсные характеристики (РХ), которые как случайные величины характеризуются средними значениями и дисперсиями:

– $\overline{T_n}$ - назначенный ресурс и его допустимые отклонения ΔT_n;

– $\overline{T_\gamma}$ - γ-процентный ресурс и его допустимые отклонения;

– $\overline{T_r}$ - технический ресурс и его допустимые отклонения ΔT_r;

– $\overline{T_\ell}$ - время предельного состояния и его допустимые отклонения ΔT_ℓ.

В документации в/ч, перечисленной выше, отсутствуют данные о T_γ - γ-процентном ресурсе, T_r - техническом ресурсе, времени предельного состояния, остаточный ресурс не определяется.

В [6] описан метод прямого прогнозирования остаточного ресурса на основе корреляционно-регрессионного анализа их ресурсных характеристик T_γ, T_r, T_n. Предусмотрено четыре режима контроля или наблюдений (2):

$$T_0^{\text{I}} < T_n \;;\; T_{\text{п}} < T_0^{II} < T_\gamma;\; T_\gamma < T_0^{\text{III}} < T_r;\; T_{\text{г}} < T_0^{\text{IV}} < T_\ell, \tag{2}$$

в которых задаются оценки остаточного ресурса T_{0_i}, где $i = \overline{1,k}$ – индекс точки оценки. Способ оценки остаточного ресурса оборудования атомных станций [6], в котором по заданным значениям ресурсных характеристик T_n, T_γ, T_r в контрольных точках T_o определяется остаточный ресурс оборудования, заключается в том, что:

– применяется совокупность специализированных числовых матриц T^{I} - T^{IV}, столбцы и строки которых соответствуют оценкам определяющих ресурсных характеристик T_n, T_γ, T_r, которые отображают динамику взаимозависимости определяющих ресурсных характеристик при их ухудшении (улучшении);

– определяются частные коэффициенты корреляции первого и второго порядков с целью выбора из множества $\{T_n, T_\gamma, T_r\}$ ресурсной характеристики, имеющей наибольшую взаимосвязь с предварительно заданным временем предельного состояния T_ℓ;

– строится линейное регрессионное уравнение (3)

$$T_\ell = a_1 + a_2 \cdot T^* \tag{3}$$

для оценки остаточного ресурса оборудования в контрольных точках (4)

$$T_{OP} = T_\ell - T_0 \;. \tag{4}$$

Прогнозирование остаточного ресурса технических средств физической защиты АЭС на основе корреляционно-регрессионного анализа их ресурсных характеристик

Рассмотрим применение описанного метода на примере ТСО «Устройство-1», применяемых в в/ч по охране АЭС Украины. Сведения об отдельных показателях СФЗ или охраны объектов предприятий Минтопэнерго составляют гостайну, поэтому исследуемые ТСО условно обозначим как «Устройство-1». Оно предназначено для фиксации нарушения охраняемого рубежа и выдачи на включение средств звуковой и световой сигнализации. Аппаратура работает бесперебойно, стационарно, при температуре

окружающей среды от –50 до +50 ˚С и относительной влажности 98 % при температуре 30 ˚С. Аппаратура устанавливается на столбах (цементных, деревянных и т. п.) или при помощи кронштейнов прикрепляется на заборах и стенах домов.

Срок эксплуатации «Устройства-1» – 72 месяца, фактически они используются в в/ч, начиная с 1982 года, уже отработали по 2–4 срока эксплуатации. Но благодаря всем мероприятиям и правильному обслуживанию, их можно еще использовать несколько сроков, при этом не понижая коэффициента работоспособности и степени защищенности в целом и безопасности охраняемого объекта. При продлении срока эксплуатации экономятся большие финансовые средства.

Рассмотрим применение рассмотренного выше метода прогнозирования ОР и программного обеспечения на его основе для экземпляров устройств, эксплуатирующихся в/ч по охране АЭС. Для «Устройства-1» (40 шт, 38 исправных, таблица), $\overline{T_n}$ =53500 часов, режимы наблюдений $T_0^{\mathrm{I}} = T_n$, $T_0^{\mathrm{I}} < T_n$, $T_{\mathrm{r}} < T_0^{\mathrm{IV}} < T_\ell$.

На рис. 1 представлено определение наиболее значимой РХ для «Устройства-1» в T_o=63 условных единиц времени (18900 часов), режим наблюдений $T_0^{\mathrm{I}} < T_n$. Определена наиболее значимая РХ – T_n.

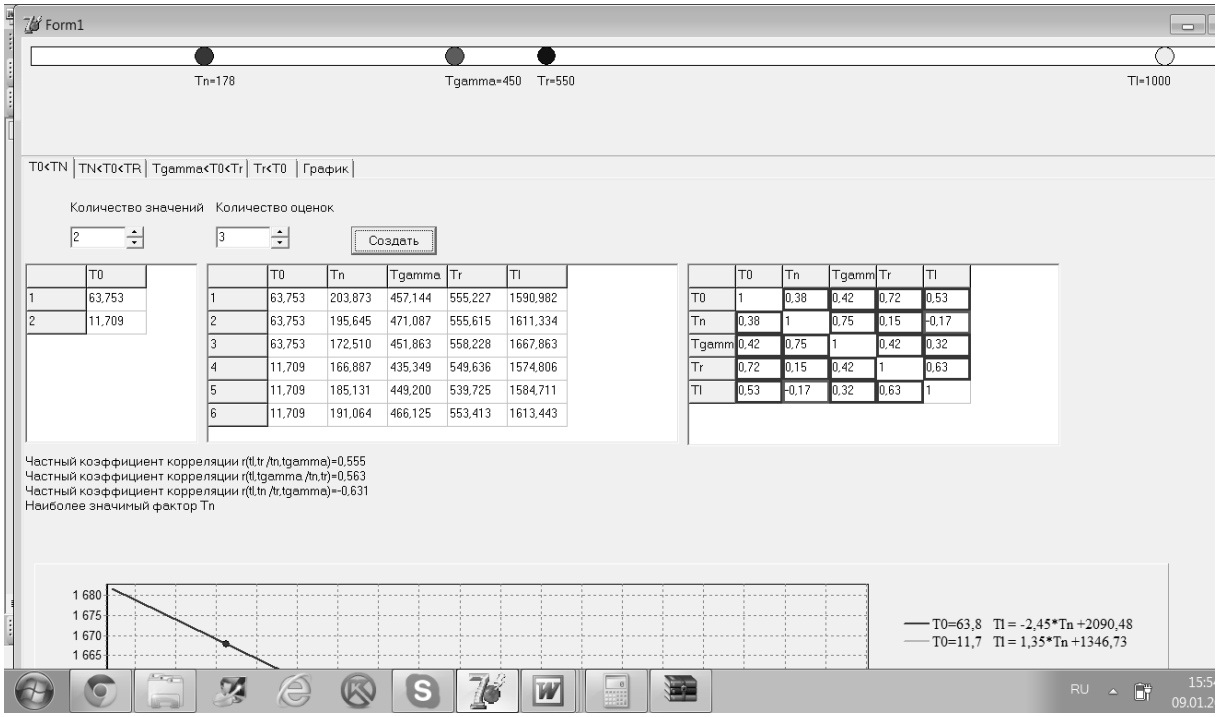


Рис. 1. Режим наблюдений I

На рис. 2 представлено определение наиболее значимой РХ для «Устройства-1» в T_o=207 условных единиц времени (62100 часов), режим наблюдений $T_{\mathrm{n}} < T_0^{II} \le T_\gamma$. Значение T_ℓ =300000 часов. Определена наиболее значимая РХ – T_n, построено регрессионное уравнение для T_ℓ, которое показано в нижней правой части экранной формы на рис. 2.

На рис. 3 показаны результаты анализа для T_o=538 условных единиц времени (161400 часов), режим наблюдений $T_{\mathrm{r}} < T_0^{\mathrm{IV}} < T_\ell$. Наиболее значимой оказалась РХ $\overline{T_r}$, построено регрессионное уравнение для T_ℓ, которое показано в нижней правой части экранной формы на рис. 3.

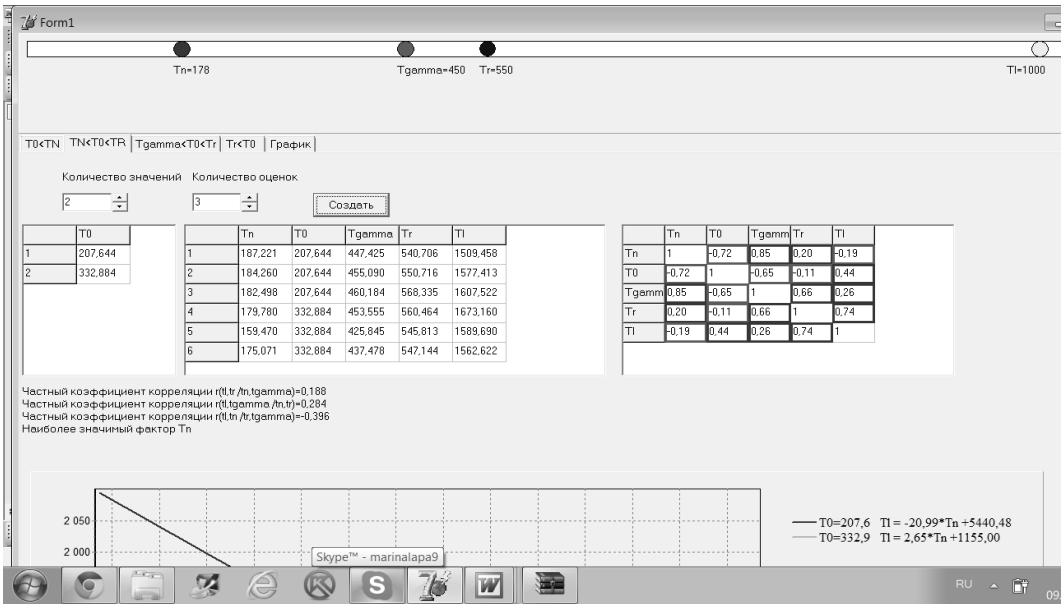


Рис. 2. Режим наблюдений II

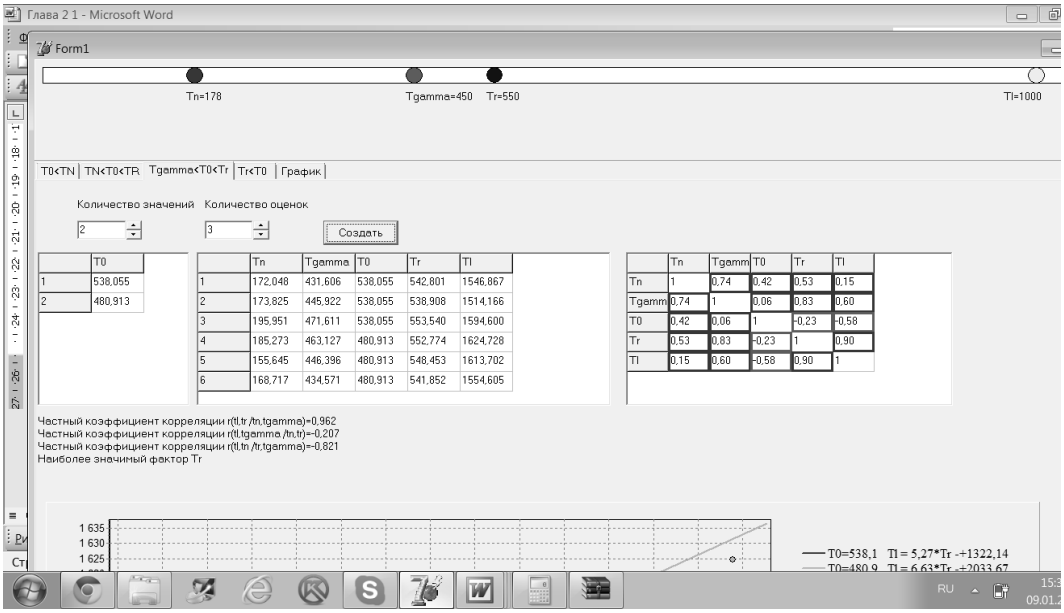


Рис. 3. Режим наблюдений III

В результате апробации рассмотренного метода и программного обеспечения (ПО) выявлены недостатки и разработаны следующие рекомендации.

1. В методе предусмотрено четыре режима контроля или наблюдений (5).

$$T_0^{\mathrm{I}} < T_n \ ; \ T_{\mathrm{n}} < T_0^{II} < T_\gamma ; \ T_\gamma < T_0^{\mathrm{III}} < T_r ; \ T_{\mathrm{r}} < T_0^{\mathrm{IV}} < T_\ell . \quad (5)$$

В процессе апробации необходимо было оценить остаточный ресурс экземпляра «Устройства-1» в момент истечения срока назначенной эксплуатации, т. е. $T_0^{\mathrm{I}} = T_n$. Также используются значения математического ожидания $\overline{T_n}$, $\overline{T_\gamma}$, $\overline{T_r}$. Необходимо скорректировать режимы контроля и наблюдений следующим образом (6).

$$T_0^{\mathrm{I}} \le \overline{T_n} \ ; \ \overline{T_{\mathrm{n}}} < T_0^{II} \le \overline{T_\gamma} ; \ \overline{T_\gamma} < T_0^{\mathrm{III}} \le \overline{T_r} ; \ \overline{T_{\mathrm{r}}} < T_0^{\mathrm{IV}} \le \overline{T_\ell} . \quad (6)$$

Соответственно необходимо внести изменения в форму программного комплекса.

2. ПО разработано на основе имитационного моделирования и не позволяет ввести точку оценки ОР реального прибора. Возможен только подбор значения из генерируемых

программой в процессе выбора наиболее значимого параметра. Необходимо предусмотреть работу программы в режиме ввода точки оценки реального прибора пользователем.

3. Шкала ПО для задания математических ожиданий факторных переменных $\overline{T_n}$, $\overline{T_\gamma}$, $\overline{T_r}$ (значения факторных переменных задаются перетаскиванием соответствующих маркеров с помощью мыши) имеет предел ≈1000 относительных единиц, что требует дополнительного пересчета реального времени в часах в условные единицы времени, что увеличивает погрешность. Так, $\overline{T_n}$ для «Устройства-1» составляет 53500 часов, и оценка ОР необходима как раз в точках, близких к этому значению, когда прибор выработал свой назначенный ресурс, но выполняет все свои функции. Необходимо использовать шкалу для задания исходных данных в реальных единицах времени.

4. В регрессионном уравнении $T_\ell = a_1 + a_2 \cdot T^*$ для вычисления T_ℓ используется математическое ожидание оценок $\overline{T_n}$, $\overline{T_\gamma}$, $\overline{T_r}$, поэтому необходимо внести изменения в уравнение регрессии (7).

$$T_\ell = a_1 + a_2 \cdot \overline{T^*}. \qquad (7)$$

Коэффициенты a_1, a_2 определяются с помощью метода наименьших квадратов, используя выборки значений T_ℓ и определенной наиболее значимой ресурсной характеристики T* из множества $\{T_n, T_\gamma, T_r\}$ из соответствующей матрицы наблюдений T^{I} - T^{IV}, как описано в разделе 4.3 монографии [6].

5. В процессе апробации необходимо было оценить остаточный ресурс экземпляра «Устройства-1» 1982 г. выпуска, у которого T_o =263000 часов, т. е. $T_0 > T_\ell$. Такой режим наблюдений не предусмотрен методом, кроме того, необходимо корректировать время предельного состояния.

6. Эксперты в/ч оценивают значения $\overline{T_n}$, $\overline{T_\gamma}$, $\overline{T_r}$ в целых часах, оценки этих РХ генерировались ПО с дробной частью.

По результатам апробации метода и программного модуля усовершенствован метод прямого прогнозирования остаточного ресурса сложных изделий на основе корреляционно-регрессионного анализа их РХ и доработано программное обеспечение. На рис. 4 показаны результаты работы усовершенствованного ПО.

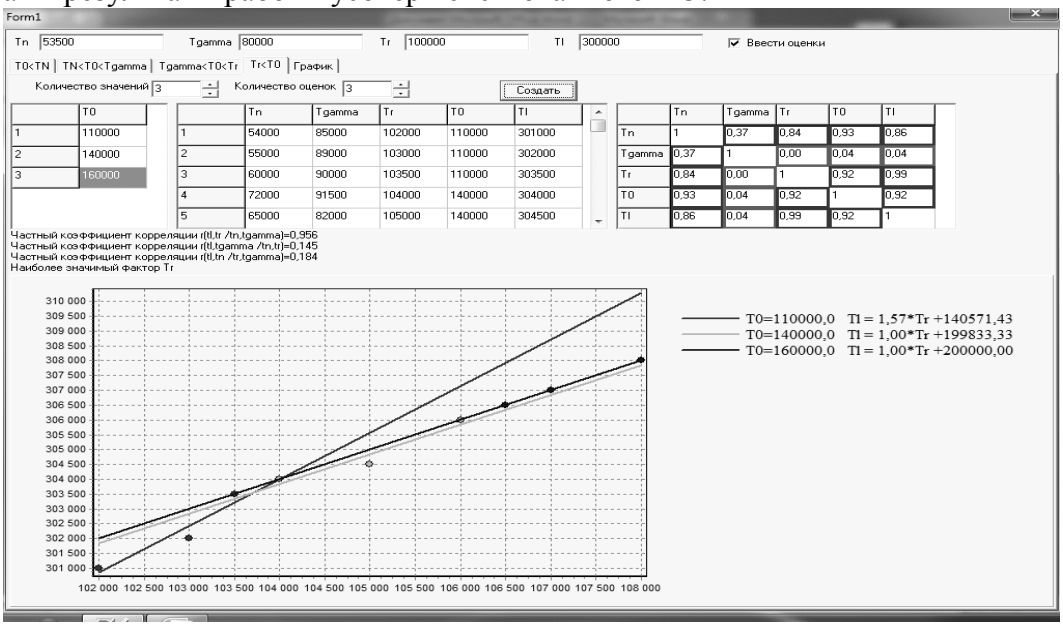


Рис. 4. Режим наблюдений IV

Остаточный ресурс, рассчитанный после доработки метода и ПО для рассматриваемого средства обнаружения в точке оценки T_o=110000 часов, равен:

T_ℓ =1,57·53500+140571,43=224566,43 (ч);

$T_{ор}=T_\ell - T_o$=114566,43 (ч).

Выводы и предложения. Показано применение корреляционно-регрессионного анализа для выбора значимых РХ ТСО и оценке остаточного ресурса ТСО с использованием метода прямого прогнозирования остаточного ресурса [6]. Данный метод может использоваться для ТСО АЭС. Обоснованное продление ресурса ТСО на основе прогнозных оценок позволит получить экономический эффект, либо обосновать необходимость замены ТСО для обеспечения безопасности объекта. Результаты исследований внедрены в служебно-боевую деятельность в/ч по охране Южно-Украинской АЭС, акт внедрения от 14.01.2014 г.

На основе апробации предложены рекомендации по усовершенствованию метода прямого прогнозирования остаточного ресурса с использованием корреляционно-регрессионного анализа РХ и программного модуля. В дальнейшем необходимо исследовать и усовершенствовать процессы учета показателей надежности технических средств физической защиты ядерных объектов.

Список использованных источников

1. *Вимоги* з ядерної та радіаційної безпеки до інформаційних та систем управління, важливих для безпеки атомних станцій : НП 306.5.02/3.035-2000. – К. : ДКЯРУ, 2000.

2. *Керівництво* адміністратора УБДН версії 2 (станційна частина) : АЮФА.06.02.00-01 41 02.

3. *Керівництво* користувача УБДН версії 2 (станційна частина) : АЮФА.06.01.00-01 41 02.

4. *Лапа М. В.* Аналіз нормативно-правового поля України у сфері експлуатації інженерно-технічних засобів систем фізичного захисту / М. В. Лапа, Л. Л. Волівач // Зб. наук. праць СНУЯЕтаП. – Севастополь. – 2010. – № 37. – С. 227–232.

5. *Лапа М. В.* Розвиток наукових основ підвищення якості експлуатації інженерно-технічних засобів систем фізичного захисту ядерних об’єктів : монографія / М. В. Лапа. – Севастополь : СНУЯЕтаП, 2013. – 353 с.

6. *Маловик К. Н.* Развитие научных основ повышения качества оценивания и прогнозирования ресурсных характеристик сложных объектов : монография / К. Н. Маловик. – Севастополь : СНУЯЭиП, 2013. – 332 с.

7. *Настанова* з організації експлуатації інженерно-технічних засобів охорони на важливих державних об’єктах, які охороняються внутрішніми військами МВС України. – К., 2012. – 83 с. – (Наказ МВС України від 05.12.2012 № 1121).

8. *Облік* і порядок розслідування, обміну інформацією про аномальні явища в роботі обладнання : СТП 3.3703.020-2005. – К., 2008. – 31 с.

9. *Общие* положения безопасности атомных станций: НП 306.2.141-2008 / Государственный комитет ядерного регулирования Украины. – К. : ГКЯРУ, 2008. – 58 с. – (Нормы и правила по ядерной и радиационной безопасности).

10. *Перелік* Класифікаторів Української бази даних надійності АЕС : ПР-Т.0.08.116-06. – К., 2006.

11. *Положення* про порядок збору, обліку, зберігання та обмін даними з надійності обладнання АЕС : ПЛ-Д.0.08.168-03. – К., 2003. – 50 с.

12. *Положення* про порядок продовження строку експлуатації обладнання, систем, важливих для безпеки : ПЛ-Д.0.03.126-10 (Зм. № 3). – К., 2010. – 32 с.

13. *Положення* про порядок розгляду та обліку порушень і відхилень в роботі АЕС ДП НАЕК «Енергоатом» : ПЛ-Д.0.03.010-08 (Зм. № 1). – К., 2008.

14. *Положення* про порядок розслідування та облік правопорушень в роботі атомних станцій : НП 306.2.100-2004 (Зм. № 5). – К. : ДКЯРУ, 2004. – 56 с.

15. *Правила* обладнання та безпеки експлуатації обладнання та трубопроводів атомних енергетичних установок : ПН АЕ Г-7-008-89. – К. : ДАЕН СРСР, 1989.

16. *Правила* організації технічного обслуговування та ремонту систем і обладнання атомних електростанцій. – Мінтопенерго України : СОУ-Н ЯЕК1.010:2008 (Зм. № 1). – К., 2008. – 38 с.

17. *Про затвердження* загальних вимог до системи фізичного захисту ядерних установок та ядерних матеріалів і загальних вимог до систем фізичного захисту ядерних матеріалів при їх перевезенні : Наказ Державного комітету ядерного регулювання від 28.08.2008 № 156.

18. *Типовая* методика оценки технического состояния, показателей надежности и остаточного ресурса для различных групп электротехнического оборудования АЭС : МТ-Т.0.03.195-09. – К., 2009. – 68 с. – (Нормативный документ ГП НАЭК «Энергоатом». Методика).

19. *Управління* виробництвом. Порядок продовження строку експлуатації обладнання за результатами оцінки технічного стану. Порядок заміни обладнання, яке відпрацювало регламентований строк експлуатації на однотипне : СТП 3.3812.057-2010. – К., 2010. – 49 с.

20. *Security* of Radioactive Sources [Implementing Guides]. – Vienna, 2009. – 66 p. – (IAEA Nuclear Security Series No 11).

УДК 621.3.07

Р.А. Косенко, викладач-стажист
Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ

Р.А. Косенко, преподаватель-стажер
Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Roman Kosenko, teacher-trainee
Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

MODELING OF INDUCTION MOTOR VECTOR CONTROL

Розроблено математичну модель електропривода з векторним керуванням. Виконано моделювання процесів, що протікають в електроприводі з системою векторного керування. За результатами моделювання проведений порівняльний аналіз векторного та скалярного електропривода.

***Ключові слова**: система керування, векторне керування, двигун змінного струму, асинхронний двигун, електропривід.*

Разработана математическая модель электропривода с векторным управлением. Выполнено моделирование процессов, протекающих в электроприводе с системой векторного управления. По результатам моделирования проведен сравнительный анализ векторного и скалярного электропривода.

***Ключевые слова**: система управления, векторное управление, двигатель переменного тока, асинхронный двигатель, электропривод.*

The mathematical model of the AC induction vector control drive is designed. Modeling of the processes occurring in the vector control drive is executed. Vector control drive compared to frequency control drive based on simulation results.

***Key words**: control system, vector control, AC motor, induction motor, electric drive.*

Постановка проблеми. Сучасний електропривід (ЕП) – це сукупність електромашин, апаратів і систем керування ними. Він є основним споживачем електричної енергії (до 65 % електроенергії, що виробляється у світі, споживається асинхронними двигунами (АД)) і головним джерелом механічної енергії у промисловості.

До основних вимог, що висуваються до електропривода, можна віднести:

- підтримка статичних і динамічних показників на високому рівні;
- широкий діапазон регулювання швидкостей;
- надійність;
- економічність.

Ці вимоги значною мірою визначають вибір структури систем керування електроприводами та її параметрів.

Останнім часом на перші місця виходять економічні вимоги, адже, переважно, в більшості технологічних систем енергетики, промисловості, сфери комунального господарства та інших галузей встановлені електродвигуни з розрахунку на максимальну продуктивність обладнання, тоді як час пікового навантаження, тобто час роботи

обладнання з максимальною продуктивністю, становить усього 10–15 % від загального часу роботи обладнання [6].

Найефективнішим способом економії енергії на всіх виробництвах, де необхідне регулювання продуктивності механізмів на базі електродвигунів змінного струму, є застосування керованого електропривода змінного струму. Впровадження такого електропривода на механізмах з навантаженням, що має квадратичний зв'язок між швидкістю та струмом споживання (насоси, вентилятори) дозволяє досягти економії електроенергії в 30–70 % [5].

Мета статті. У статті висвітлено роботу щодо дослідження системи векторного керування асинхронним двигуном.

Виклад основного матеріалу. Прийнято розрізняти два основних способи керування електроприводами змінного струму, що використовують як перетворювачів енергії напівпровідникові перетворювачі частоти: частотне і векторне [1].

При частотному керуванні в ЕП реалізується один із статичних законів частотного керування (наприклад, V/f=const – підтримки постійного співвідношення між напругою статора та частотою обертання, Ψs=const – підтримки постійної амплітуди потоку статора, Ψr=const – підтримки постійної амплітуди потоку ротора і т. ін.). Управління реалізується, здебільшого, за середнім значенням змінних.

Частотне керування як керовані параметри використовує величини, що одержуються за межами двигуна, а саме напругу і частоту.

Сформовані за співвідношенням V/f сигнали напруги і частоти подаються на модулятор, який формує сигнали керування інвертором відповідно до заданих величин напруги і частоти за законами ШІМ.

Важливо зазначити, що цей метод не використовують давачі зворотного зв'язку, які вимірюють швидкість або позицію ротора двигуна. Оскільки немає зворотного зв'язку, цей метод керування має низьку вартість і є простим рішенням для економічної системи керування двигуном змінного струму.

Під час використання цієї техніки, яку також називають скалярним керуванням, орієнтування поля статора не виконується (під час формування фазних напруг положення ротора не береться до уваги), замість цього основними керуючими величинами є частота й амплітуда напруги на фазах двигуна.

Оскільки немає ніякого зворотного зв'язку за швидкістю або положенням, то неможливо керувати крутним моментом з хоч якимось ступенем точності.

При векторному керуванні процес регулювання здійснюється за миттєвим значенням змінних. У цифрових векторних системах може виконуватись управління за еквівалентними (усередненим на інтервалі дискретності керування) змінними. У цьому випадку реалізується принцип орієнтації векторних змінних одна відносно одної. Зокрема, дуже поширена орієнтація струмів і напруг відносно вектора потокозчеплення ротора. Орієнтація забезпечує роздільне (незалежне) керування моментом і потокозчепленням у динамічних і статичних режимах роботи привода. При такому підході у системі керування наявний у явному або в неявному вигляді контур регулювання електромагнітного моменту двигуна. У першому випадку реалізується принцип прямого керування моментом. Відповідні системи векторного керування мають назву системи прямого керування моментом. У «традиційних» системах векторного керування з орієнтацією струму статора за вектором потокозчеплення ротора роль контуру моменту виконує замкнутий контур активної складової струму статора.

Векторне керування є одним з найбільш передових методів керування, що застосовуються в електроприводі змінного струму, оскільки воно має певні суттєві переваги перед іншими, до яких можна віднести:

– можливість отримання максимального крутного моменту при нульовій швидкості (як у двигуна постійного струму);

– можливість застосування системи векторного керування як із синхронними, так і з асинхронними двигунами без внесення змін до самої системи керування;

– під час використання системи з асинхронним двигуном ми отримуємо надійність (відсутність щіток та простота конструкції) асинхронного двигуна з динамічними характеристиками, близькими до двигуна постійного струму;

– можливість побудови без сенсорних систем, що дає можливість перевести більшість використовуваних електроприводів на векторне керування, не втручаючись до механічної частини устаткування [8].

Для досягнення високої швидкості відгуку системи на зміни моменту та високої точності встановлення швидкості обертання необхідна наявність давача швидкості або положення. Це підвищує вартість системи, а також додає складності до традиційно простих АД. Замість давача швидкості/положення можна використовувати непрямі методи визначення положення ротора (на основі виміряних величин фазних напруг і струмів в обмотках статора). Системи векторного керування, в яких немає давача швидкості/положення, називаються “безсенсорними”[8].

Короткий опис і основні перетворення векторного керування.

Високоефективне керування двигуном характеризується плавним обертанням по всьому діапазоні швидкостей двигуна, повним контролем крутного моменту при нульовій швидкості, швидким прискоренням і сповільненням. Для досягнення цього для трифазних двигунів змінного струму використовується метод векторного керування. Основна ідея алгоритму векторного керування – це розкладання струму статора на компоненти, що продукують крутний момент і потік. Цими компонентами після розкладання можна керувати окремо. Після цього структура системи керування двигуном стає такою ж простою, як для двигуна постійного струму з незалежним збудженням.

Для здійснення векторного керування необхідно виконати такі дії (рис. 1):

– виміряти електричні величини, прикладені до двигуна (фазні напруги і струми);

– за допомогою перетворення Кларк перевести їх у 2-фазну систему координат α-β;

– розрахувати амплітуду та кут просторового вектора потоку ротора;

– за допомогою перетворення Парка перевести струми статора в обертальну систему координат d-q;

– окремо регулювати компоненти струму статора, що продукують крутний момент (isq) і потік (isd);

– розрахувати вихідний просторовий вектор напруги статора;

– перевести просторовий вектор напруги статора з обертальної системи координат d-q назад у 2-фазну систему координат α-β, закріплену відносно статора, за допомогою зворотного перетворення Парка;

– згенерувати вихідні 3-фазні напруги, використовуючи просторово-векторну модуляцію.

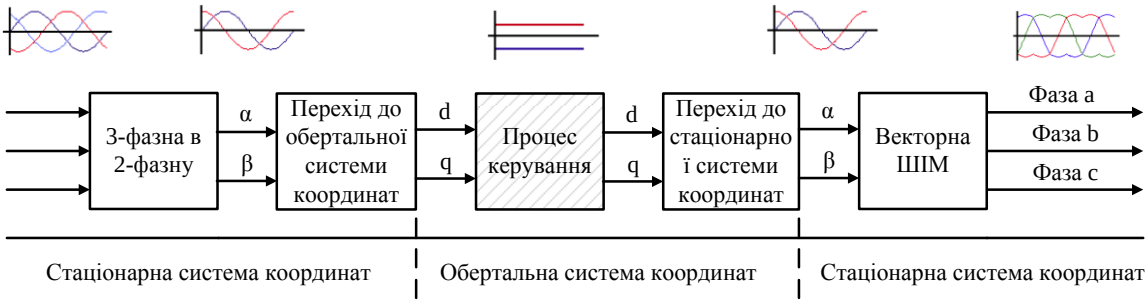


Рис. 1. Перетворення сигналів при векторному керуванні

Для того, щоб розкласти струми на компоненти, що продукують момент і потік (Isd,Isq), потрібно знати положення потоку намагнічування двигуна. Це потребує точної інформації про швидкість ротора, яку можна отримати з давача швидкості або положення, прикріпленого до ротора. Як давачі позиції для приводів векторного керування використовуються інкрементні датчики та енкодери. У критичних за вартістю випадках, наприклад у пральних машинах, широко використовуються тахогенератори. У деяких випадках використання давачів швидкості/положення не бажане, отже, потрібно не вимірювати швидкість/положення безпосередньо, а використовувати деякі непрямі методи для оцінювання положення ротора. Алгоритми, які не використовують давачів швидкості, називаються "безсенсорним керуванням" [7].

Одним з основних методів, які використовуються для аналізу поведінки систем електропривода, є математичне моделювання. Для проведення дослідження була розроблена математична модель електропривода.

На рис. 2 показана структурна схема електропривода з векторним керуванням, яка реалізує описані вище дії.

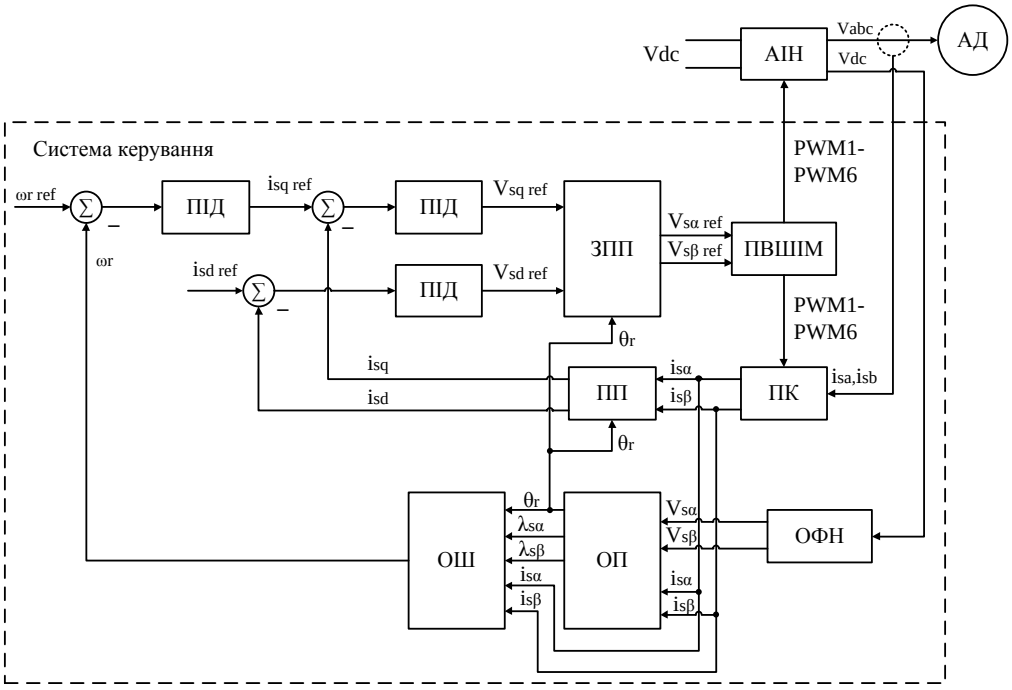


Рис. 2. Структурна схема електропривода з векторним керуванням

Блок-схема містить такі блоки:

– ПІД-регулятор (ПІД);
– перетворення Парка (ПП);
– перетворення Кларк (ПК);
– зворотне перетворення Парка (ЗПП);
– блок генерації векторної ШІМ (ПВШІМ);
– блок обчислення фазних напруг (ОФН);
– оцінювач потоку (ОП);
– оцінювач швидкості (ОШ).

ПІД-регулятор (ПІД) використовується для регулювання керуючих величин у контурах швидкості (ωr), потокозчеплення ротора (Isd) та крутного моменту ротора (Isq).

Перетворення Парка (ПП) перетворює вхідні вектори у 2-координатній ортогональній стаціонарній системі координат у вихідні вектори у 2-координатній ортогональній обертальній системі координат.

Математично блок ПП описується рівняннями:

$$\begin{cases} I_d = I_a \cdot \cos\theta + I_\beta \cdot \sin\theta \\ I_q = -I_a \cdot \sin\theta + I_\beta \cdot \cos\theta \end{cases}. \quad (1)$$

Перетворення Кларк (ПК) перетворює вхідні вектори у збалансованій 3-координатній системі координат у вихідні вектори в 2-координатній ортогональній стаціонарній системі координат.

Математично блок ПК описується рівняннями:

$$\begin{cases} I_a = I_a \\ I_\beta = \ 2I_b + I_a \ / \sqrt{3}. \end{cases} \quad (2)$$

Зворотне перетворення Парка (ЗПП) перетворює вхідні вектори у 2-координатній ортогональній обертальній системі координат у вихідні вектори у 2-координатній стаціонарній системі координат.

Математично блок ЗПП описується рівняннями:

$$\begin{cases} I_a = I_D \cdot \cos\theta - I_Q \cdot \sin\theta \\ I_\beta = I_D \cdot \sin\theta + I_Q \cdot \cos\theta. \end{cases} \quad (3)$$

Блок генерації векторної *ШІМ* (ПВШІМ) обчислює коефіцієнти заповнення, необхідні для генерації опорної напруги статора з використанням техніки просторово-векторної ШІМ.

Блок обчислення фазних напруг (ОФН) обчислює трифазні напруги, що подаються на електродвигун. Трифазні напруги можуть бути відновлені, використовуючи величину постійної напруги на вході інвертора і три функції перемикання верхніх ключів інвертора.

Оцінювач потоку (ОП) розраховує потік ротора для 3-фазного асинхронного двигуна. Для зменшення помилок, пов'язаних із точністю інтегратора і виміряними опорами статора, напруги компенсуються ПІ-регуляторами (рис. 3). Таким чином, цей оцінювач потоку може працювати в широкому діапазоні швидкостей навіть при дуже низьких швидкостях.

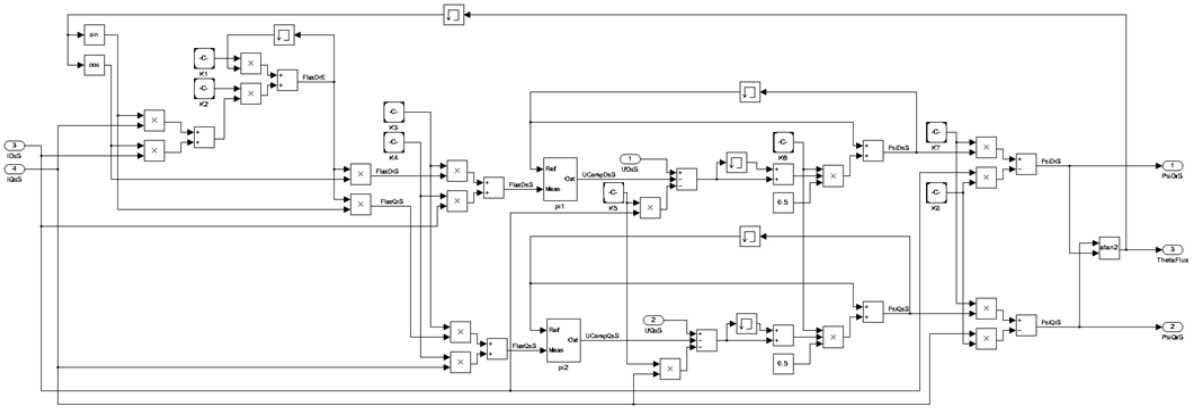


Рис. 3. Структурна схема моделі оцінювача потоку

Оцінювач швидкості (ОШ) розраховує швидкості двигуна на основі оціненого потоку ротора та виміряних струмів статора (рис. 4).

ОП і ОШ фактично представляють собою математичну модель двигуна і тому їх правильна робота значною мірою залежить від точності вимірів параметрів двигуна (опір статора (Rs), опір ротора (Rr), індуктивність розсіювання статора (Lsl), індуктивність розсіювання ротора (Lrl), індуктивність намагнічування (Lm), базовий струм (Ib), базова фазна напруга (Vb), число полюсів (p), номінальний струм (I_b), номінальна електрична кутова швидкість (ω_b)).

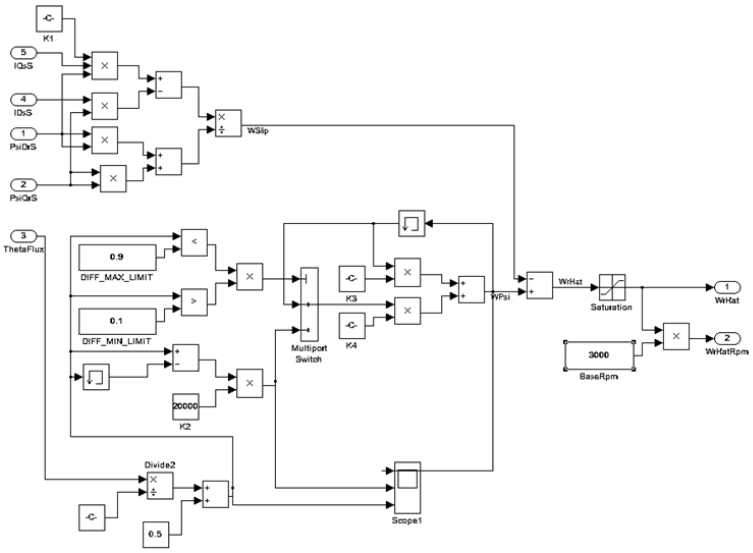


Рис. 4. Структурна схема моделі оцінювача швидкості

Під час моделювання електропривода використовується стандартна модель двигуна з бібліотеки SimPowerSystems пакета Matlab. Для моделювання був обраний двигун АИС80В2, відповідно до параметрів двигуна були розраховані параметри моделі. Зібрана модель установки наведена на рис. 5.

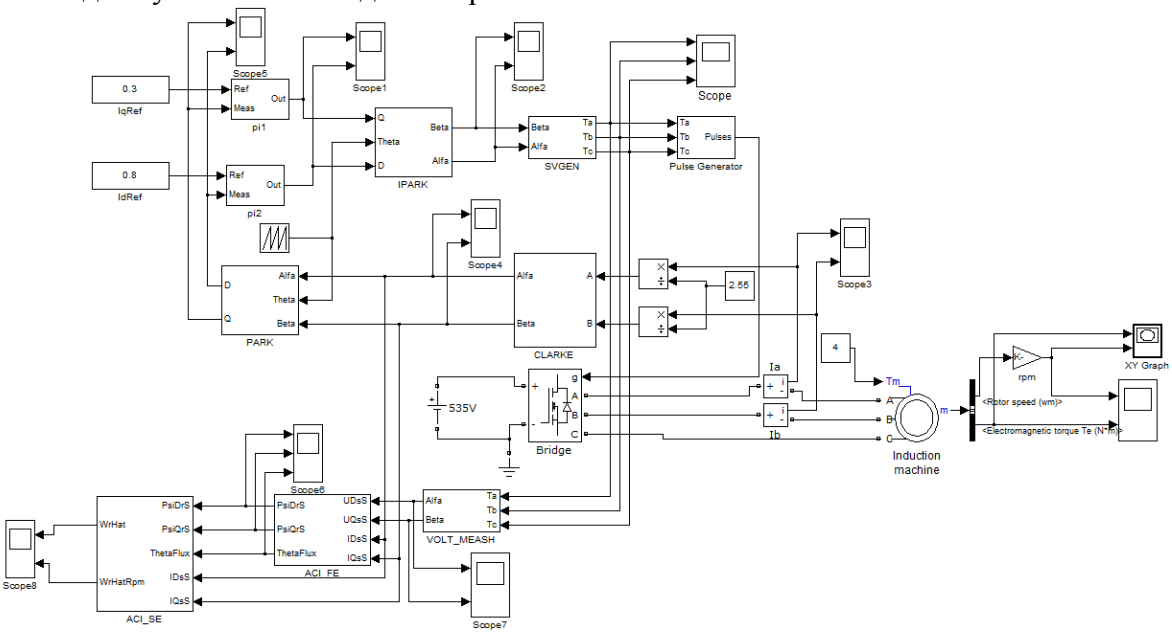


Рис. 5. Модель замкненої за струмом статора системи з оцінювачами потоку та швидкості

Модель складається з таких блоків:
– IPARK – блок зворотного перетворення Парка;
– SVGEN – блок генерації векторної ШІМ;
– Pulse Generator – блок генерації опорного сигналу;
– Bridge – трьохфазний інвертор;
– Induction machine – асинхронний двигун змінного струму;
– PARK – блок перетворення Парка;
– CLARKE – блок перетворення Кларк;
– pi1 – ПІ-регулятор складової Iq струму статора;
– pi2 – ПІ-регулятор складової Id струму статора;
– VOLT_MEASH – блок обчислення фазних напруг;

– ACI_FE – блок оцінювача потоку;

– ACI_SE – блок оцінювача швидкості.

У розімкнутій по положенню системі опорний сигнал кутового положення ротора двигуна отримуємо з генератора пилкоподібних імпульсів, частота цих імпульсів визначає частоту обертання двигуна:

$$n = \frac{60}{p \cdot T} = \frac{60}{1 \cdot 0,04} = 1500; \quad (4)$$

де p – кількість пар полюсів;

T – період «пилки».

На блок перетворення Кларк подаються нормовані за величиною номінального струму статора (2,55 А) струми статора. Під час моделювання на виході блоку перетворення Кларк були отримані два синусоїдальні сигнали, причому α-складова рівна струму в фазі статора А і випереджає β-складову на 90˚, частота вихідних сигналів рівна частоті опорної «пилки».

Далі Iα та Iβ подаються на блок перетворення Парка, на виході якого отримуємо складові струму статора в обертальній системі координат id та iq. Оскільки ці складові незалежні від часу, то їх можна подавати напряму на ПІ-регулятори та використовувати для керування струмом статора. На рис. 6 видно, що складові id та iq в усталеному режимі прямують до деяких сталих величин, тобто процес регулювання сходиться.

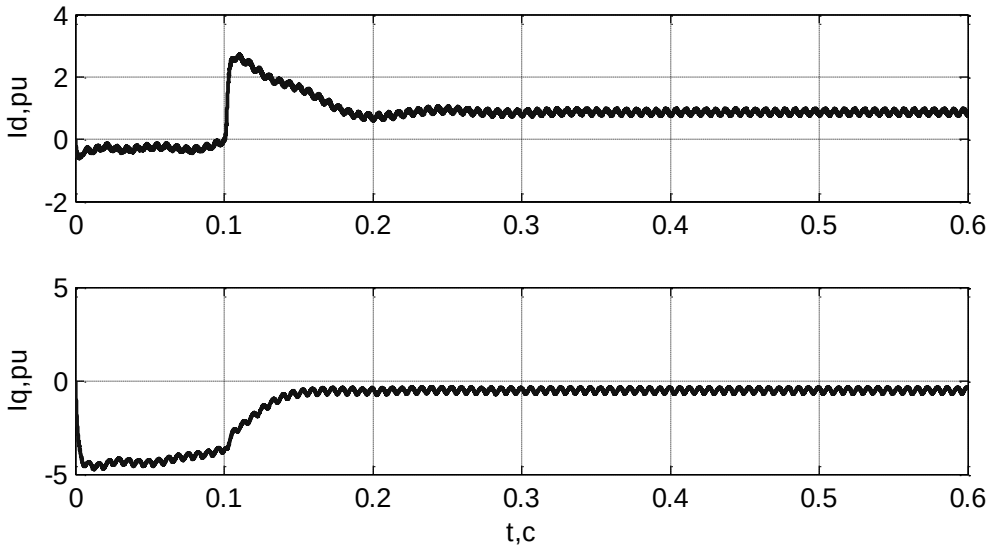


Рис. 6. Складові струму статора Id Iq в обертальній системі координат статора

Після регулювання струм статора переводиться назад в стаціонарну систему координат (блоком ЗПП) та формуються необхідні для його забезпечення коефіцієнти заповнення для стійок інвертора. Виміряний під час моделювання коефіцієнт заповнення для фази А інвертора наведений на рис. 7, на якому чітко видно специфічну для просторово-векторної модуляції форму фазних напруг (з підмішуванням 3-ї гармоніки), така форма забезпечує високий коефіцієнт використання постійної напруги на вході інвертора [1].

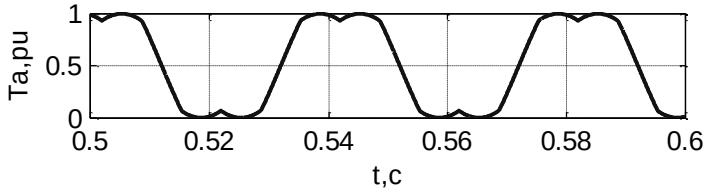


Рис. 7. Коефіцієнти заповнення для фаз А, В і С

На рис. 8 наведені оцінені складові потоку ротора та оцінене кутове положення ротора. За результатами моделювання оцінене положення ротора збіглося з опорним сигналом на виході блока Pulse Generator, що підтвердило правильність налаштування блока ОП. Складові потоку ротора в усталеному режимі представляють собою синусоїди з амплітудою 1 у відносних одиницях, зсунуті одна відносно одної на 90°.

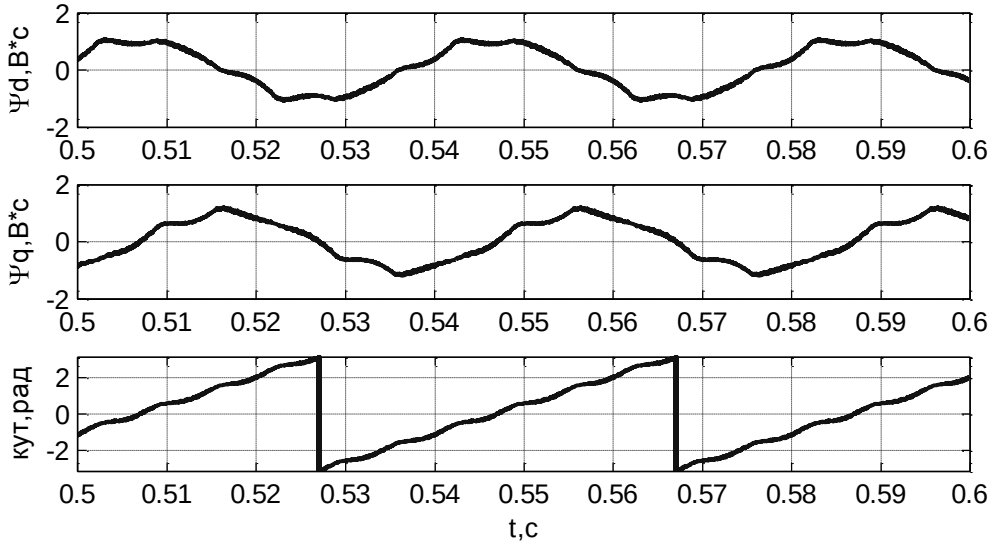


Рис. 8. Оцінені складові потоку в системі координат статора (Ψd, Ψq) та оцінене кутове положення ротора в усталеному режимі (збільшено)

На основі оціненого потоку та положення ротора оцінювач швидкості обчислює швидкість обертання ротора у відносних та абсолютних одиницях. Оскільки промодельована система розімкнена по положенню ротора, то частота «пилки» на виході оцінювача потоку визначається частотою опорної «пилки», тому оцінена швидкість не залежить від фактичної частоти обертання ротора і лише збігається з нею в усталених режимах (тобто після встановлення сталої швидкості обертання, визначеної частотою опорної «пилки»).

На рис. 9 наведені діаграми оціненої та виміряної на виході моделі двигуна швидкості ротора, характер оціненої кривої розгону на початковому етапі відрізняється від виміряного за зазначеними вище причинами і визначається наявним в оцінювачі потоку фільтром низької частоти (ФНЧ).

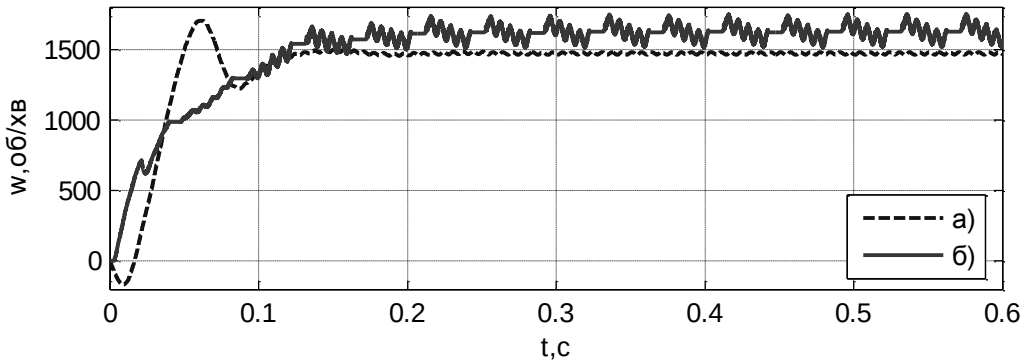


Рис. 9. Швидкість на виході моделі двигуна (а) та на виході оцінювача (б)

Після перевірки всіх блоків моделі системи керування було проведено порівняння якісних характеристик приводів з векторним та скалярним керуванням. З тим же двигуном був промодельований електропривід з частотним керуванням. Моделювання проводилося на частоті обертання, рівній половині від номінальної та з навантаженням 3Н·м для обох типів керування. Порівняльні діаграми розгону зображені на рис. 10.

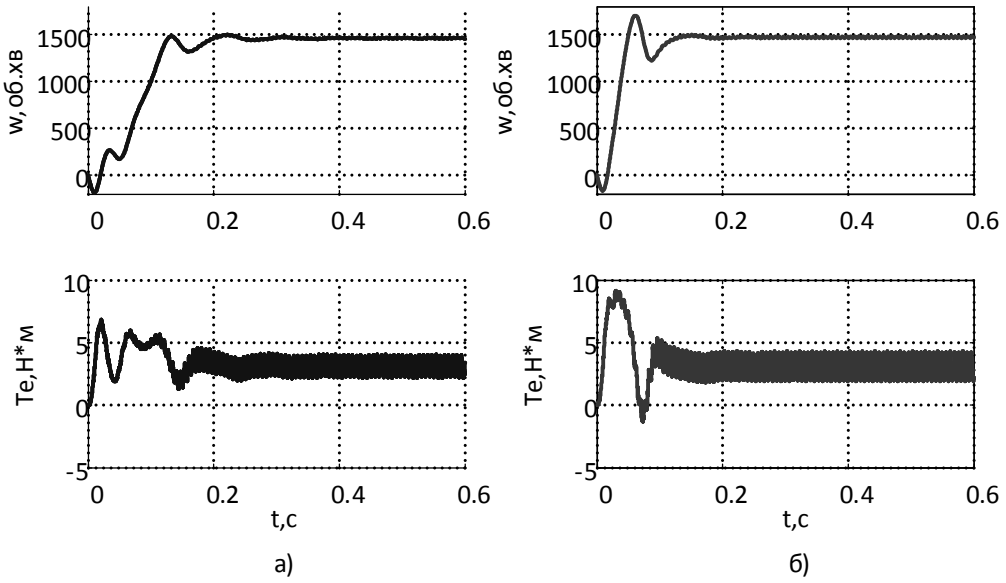


Рис. 10. Швидкість та електромагнітний момент при частотному керуванні (а) та при векторному керуванні (б)

Порівняємо якісно векторне і скалярне керування:

– максимальний стартовий момент при векторному керуванні вищий, ніж при скалярному;

– час першого встановлення перехідного процесу швидкості обертання при векторному керуванні в цьому випадку майже на 40 % нижчий, ніж при частотному;

– характер перехідного процесу в обох випадках коливальний.

Висновки і пропозиції. Розроблена математична модель електропривода з векторним керуванням, що дозволило порівняти його ефективність зі скалярним електроприводом. Порівняльний аналіз показав, що при векторному керуванні асинхронний двигун може продукувати вищий момент на низьких обертах, а, отже, і вищий стартовий момент, ніж при скалярному. Також було підтверджено, що векторний електропривід має вищі динамічні показники, ніж скалярний. Подальше дослідження слід проводити у системі, замкнутій за положенням ротора і швидкістю.

Список використаних джерел

1. *Виноградов А. Б.* Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – Иваново, 2008. – 298 с.

2. *Муравлев О. П.* Регулируемый электропривод – одно из основных направлений совершенствования жилищно-коммунального хозяйства / О. П. Муравлев. – Томск, 2004.

3. *Пересада С. М.* Векторное управление в асинхронном электроприводе: аналитический обзор / С. М. Пересада // Вестник Донецкого национального технического университета. – 1999. – № 4. – С. 1–23.

4. *Режим* доступу : http://www.vfd.com.ua/content/view/98/31/.

5. *Режим* доступу : http://www.elprom-rit.com/energy_saving/gkh/.

6. *Сахарнов Ю. В.* Регулируемый электропривод эффективное энергосберегающее оборудование / Ю. В. Сахарнов // Вопросы регулирования ТЭК. Регионы и Федерация. – 2001. – № 1.

7. *3-Phase* AC Induction Vector Control Drive – Freescale Semiconductor Inc., 2007.

8. *Direct* Torque Control - the world's most advanced AC drive technology. – Asea Brown Boveri Ltd. –2002.

9. *Motor* control with STM32 32-bit ARM-based MCU [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.st.com/web/en/resource/sales_and_marketing/promotional_material/brochure/brstm32mc.

10. *Sensorless* Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://e2e.ti.com/cfs-filesystemfile.ashx/__key/CommunityServer-Discussions-Components-Files/38/5611.Sensorless-FOC-of-PMSM.pdf.

РОЗДІЛ VII. ТЕХНОЛОГІЇ ХАРЧОПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 664.951.51:597.541

І.В. Дітріх, канд. хім. наук
Ю.І. Марченко, магістрант
Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Донецьк, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОЖИВЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НОВИХ РИБНИХ ПРЕСЕРВІВ В АПЕЛЬСИНОВОМУ СОУСІ «НЕПТУН»

И.В. Дитрих, канд. хим. наук
Ю.И. Марченко, магистрант
Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, г. Донецк, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ НОВЫХ РЫБНЫХ ПРЕСЕРВОВ В АПЕЛЬСИНОВОМ СОУСЕ «НЕПТУН»

Iryna Ditrikh, PhD in Chemical Sciences
Yuliia Marchenko, Master's Degree student
Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky, Donetsk, Ukraine

THE STUDY OF CONSUMER PROPERTIES OF NEW FISH PRESERVES IN ORANGE SAUCE «NEPTUN»

Розроблено рецептуру виготовлення нового виду рибних пресервів в апельсиновому соусі «Нептун» з риби зниженої товарної цінності та апельсинового соку як фруктової заливки. Встановлено оптимальну концентрацію сухих речовин соку у фруктово-ягідному соусі пресервів з оселедця, яка забезпечує продукту оригінальні органолептичні властивості. Виготовлено зразки нового продукту, визначено їх органолептичні та фізико-хімічні показники якості.

Ключові слова: *рибні пресерви, апельсиновий соус, оселедець тихоокеанський, апельсиновий сік, органолептичні властивості, оцінювання якості.*

Разработана рецептура изготовления нового вида рыбных пресервов в апельсиновом соусе «Нептун» из рыбы пониженной ценности и апельсинового сока в качестве фруктовой заливки. Установлена оптимальная концентрация сухих веществ сока во фруктово-ягодном соусе пресервов из сельди, которая обеспечивает продукту оригинальные органолептические свойства. Изготовлены образцы нового продукта, определены их органолептические и физико-химические показатели качества.

Ключевые слова: *рыбные пресервы, апельсиновый соус, сельдь тихоокеанская, апельсиновый сок, органолептические свойства, оценка качества.*

Developed the recipe for the manufacture of a new kind of fish preserves in orange sauce «Нептун» fish decreased values and orange juice as a fruit filling. An optimal concentration of dry substances juice in the fruit and berry sauce preserves of herring, which provides the product with original organoleptic properties. The produced samples of the new product, defined by their organoleptic and physico-chemical quality indicators.

Key words: *fish preserves, orange sauce, Pacific herring, orange juice, organoleptic properties, quality evaluation.*

Постановка проблеми. Риба відноситься до сировини з високим вмістом повноцінних білків, поліненасичених жирних кислот, мінеральних речовин, вітамінів. Однак у натуральному вигляді її неможливо назвати збалансованим продуктом харчування, який повністю задовольняє потребу людини в пластичних речовинах і енергії. У зв'язку з цим створення комбінованих продуктів на рибній основі з додаванням інгредієнтів, сумісних з рибною сировиною за органолептичними і технологічними властивостями, передусім, рослинного походження, дозволяє отримати збалансований за складом харчовий продукт з високою харчовою цінністю.

Останнім часом в Україні виробляється досить широкий асортимент рибних пресервів у різноманітних заливках і соусах, які характеризуються високою харчовою цінністю і гарними смаковими характеристиками. Однак традиційні способи виробництва рибних пресервів не враховують усі можливості використання у фруктово-ягідних соу-

сах соку різноманітних плодів для підвищення біологічної цінності і поліпшення органолептичних властивостей готової продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виробництво рибних пресервів є одним із перспективних напрямів використання сировини для випуску цінної продукції з оригінальними смакоароматичними властивостями. Вдосконаленню способів виробництва пресервів присвячені роботи В. І. Шендерюка, М. М. Паніної, О. Я. Мезенової, М. П. Андрєєва, О. В. Сидоренко та ін. [4; 9–11; 17–19]. В основному сучасний асортимент включає пресерви з риб родини оселедцевих спеціального і пряного засолу, у майонезних заливках і в олії, що пояснюється національними традиціями споживання, а також більш низьким ціновим рівнем у порівнянні з пресервами делікатесної групи [1–3; 8].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Останні публікації висвітлюють дослідження, пов'язані з удосконаленням технологій виробництва рибних пресервів та процесів, що відбуваються в них під час дозрівання та зберігання. Водночас не приділяється належної уваги питанню розроблення рецептур фруктово-ягідних заливок для рибних пресервів.

Мета статті. Ця робота присвячена модифікації рецептури рибних пресервів у фруктово-ягідному соусі за рахунок введення до його складу апельсинового соку, що дозволяє отримати продукт з оригінальними органолептичними характеристиками та підвищеною біологічною цінністю. Доцільність використання натурального апельсинового соку як сировини під час виробництва рибних пресервів «Нептун» обумовлена не тільки його органолептичними властивостями, але й можливістю збагачення нового продукту біологічно активними речовинами, зокрема вітамінами, макро- і мікроелементами.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження була риба зниженої товарної цінності – заморожений оселедець з механічними пошкодженнями; свіжовиготовлений апельсиновий сік; рибні пресерви в апельсиновому соусі. Масову частку сухих речовин в апельсиновому соку, %, масову частку кухонної солі у м'ясі риби, % , масову частку жиру у м'ясі риби, %, масову частку бензойнокислого натрію, % визначали за стандартними методиками [5–7; 14].

Для приготування рибних пресервів в апельсиновому соусі «Нептун» як рибної сировини використовується заморожений оселедець тихоокеанський. Рецептура соусу містить такі інгредієнти – цукор, бензойнокислий натрій, свіжовиготовлений апельсиновий сік. Сировина та допоміжні матеріали повинні відповідати вимогам діючої нормативно-технічної документації. Вибір рослинної сировини, сік якої використовується як один із інгредієнтів фруктово-ягідного соусу рибних пресервів, проводився на підставі вивчення поширеності і доступності для виробничих підприємств, а також для мережі торговельних організацій із власним виробництвом рибних продуктів, хімічного, амінокислотного та вітамінного складів за довідковими даними.

У результаті проведеного аналізу були обрані плоди апельсинового дерева, які, на наш погляд, є перспективною сировиною у виробництві рибних пресервів. По-перше, апельсини – яскраво забарвлені плоди, що дозволить надати продукту привабливого вигляду і колірного різноманіття. По-друге, сік апельсина є джерелом багатьох біологічно активних речовин, передусім бета-каротину (50 мкг/100 г) та вітаміну С (60 мг/100 г), і мінеральних речовин, що дозволяє розробити продукт, збагачений вітамінно-мінеральним комплексом [16]. По-третє, апельсини – не є дефіцитною сировиною для торговельних мереж, які реалізують рибну продукцію власного виробництва.

Рибні пресерви в апельсиновому соусі «Нептун» готують згідно з технологічною інструкцією [15]. Рибну сировину (очищені філе-шматочки оселедця тихоокеанського підготовлені за вимогами технологічної інструкції) заливають апельсиновим соусом. Для приготування соусу використовують свіжовиготовлений сік без м'якоті, який піді-

грівають до температури 40-50 °С, потім додають цукор і бензойнокислий натрій, всі компоненти ретельно перемішують та охолоджують [12].

Для встановлення гармонійності смаку готового продукту в рецептуру соусу добавляли апельсиновий сік з концентрацією сухих речовин у кількості від 12,0 до 24,5 %. Введення апельсинового соку з мінімальною концентрацією сухих речовин (12,0 %) привело до негармонійного і невираженого смаку готового продукту. Якщо вміст сухих речовин у соку підвищити до 24,5 %, то апельсиновий соус надає пресервам солодкого смаку з апельсиновим присмаком без відчуття смаку риби. Найвища гармонійність смаку визначена у зразках із вмістом 18,5 % сухих речовин у соку [12].

Органолептичне оцінювання якості зразків рибних пресервів в апельсиновому соусі «Нептун» здійснювали за розробленою нами 5-бальною шкалою. На підставі отриманих даних побудовано профілограму органолептичних властивостей зразків, яка свідчить, що найкращі показники якості має зразок рибних пресервів в апельсиновому соусі із вмістом 18,5 % сухих речовин апельсинового соку (рис.).

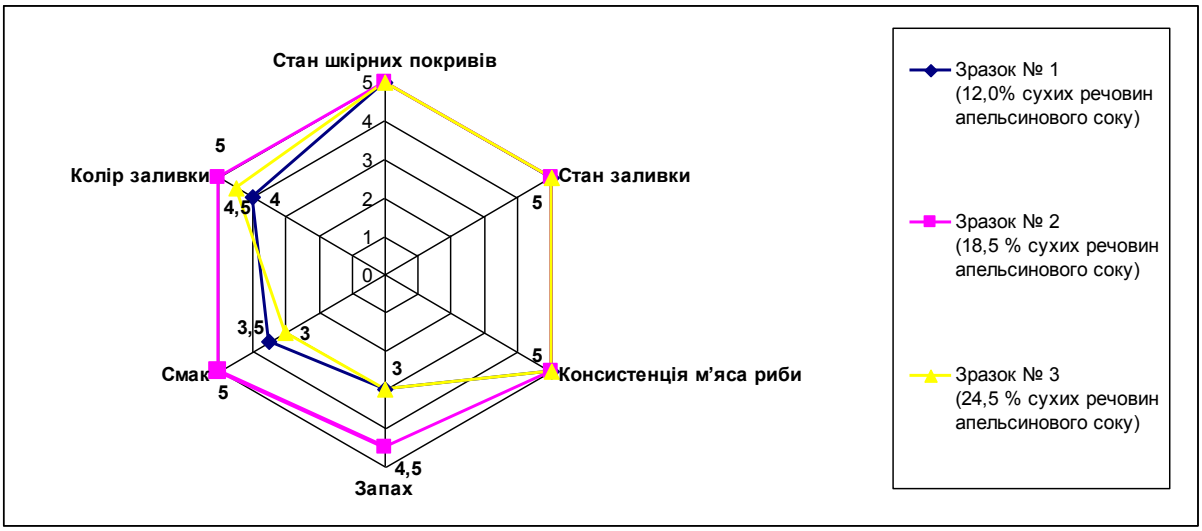


Рис. Профілограма органолептичних властивостей рибних пресервів в апельсиновому соусі «Нептун»

Отже, новий вид рибних пресервів «Нептун» має такий рецептурний склад, %: оселедець (філе-шматочки) – 80, апельсиновий сік – 10,26, цукор – 9,6, бензойнокислий натрій – 0,14.

Якість нових рибних пресервів оцінювали згідно з вимогами ГОСТ 7453-86 «Пресервы из разделанной рыбы. Технические условия» (табл.) [13].

Таблиця

Оцінювання якості рибних пресервів в апельсиновому соусі «Нептун»

Найменування показника	Вимоги ГОСТ 7453–86	Зразок рибних пресервів «Нептун»
1	2	3
Стан шкірних покривів	Цілі. Допускається незначне пошкодження шкіри у філе-шматочках	Філе-шматочки цілі з рівними зрізами. Без механічних пошкоджень
Стан заливки	Властивий цьому виду	Однорідна по всій масі, без пластівців
Консистенція м'яса риби	Ніжна, соковита	Ніжна, соковита
Запах	Приємний, властивий дозрілій рибі з ароматом заливки	Приємний, властивий дозрілій рибі, злегка апельсиновий
Смак	Приємний, властивий дозрілій рибі, заливці	Смак риби – приємний, гармонійний, характерний оселедцю, з апельсиновим присмаком. Смак соусу – приємний апельсиново-солодкий, виражений, без стороннього смаку

Закінчення табл.

1	2	3
Колір заливки	Не нормується	Злегка жовто-помаранчевий
Масова частка кухонної солі у м'ясі риби, %	5,0–8,0	5,5
Масова частка жиру у м'ясі риби, %, не менше	12,0	15,0
Масова частка бензойно-кислого натрію риби, %, не більше	0,15	0,14

Результати досліджень, які представлені у таблиці, показують, що характерною особливістю рибних пресервів «Нептун» є легкий присмак і аромат апельсинового соку, які добре гармонують із смаком та запахом оселедцю. Злегка жовто-помаранчевий колір соусу надає продукту привабливого зовнішнього вигляду. Таким чином, використання соку з плодів апельсина у виробництві рибних пресервів сприяє значному поліпшенню їх органолептичних властивостей і розширенню асортименту цього виду продукції.

Висновки і пропозиції. Встановлена можливість отримання якісних рибних пресервів в апельсиновому соусі «Нептун» із оселедцю зниженої товарної цінності. Визначена концентрація сухих речовин апельсинового соку, при якій рибні пресерви «Нептун» мають гармонійний смак і запах, привабливий зовнішній вигляд. Завдяки тому, що апельсиновий сік містить у своєму складі не тільки барвні пігменти, але й інші біологічно активні компоненти (вітаміни, мінеральні речовини, органічні кислоти, пахучі речовини), то використання цього соку у виробництві рибних пресервів у складі фруктово-ягідного соусу і насичує кольором готовий продукт, і підвищує його харчову цінність.

Аналіз показників якості зразків рибних пресервів в апельсиновому соусі «Нептун» показав, що ці пресерви мають високі споживчі властивості.

За результатами роботи отримано патент України на корисну модель "Рибні пресерви в апельсиновому соусі «Нептун»" [12].

Список використаних джерел

1. *Абрамова Л. С.* Перспективне технологии новых видов рыбной продукции / Л. С. Абрамова, Т. М. Недосекова // Рыбная промышленность. – 2004. – № 2. – С. 19–22.

2. *Бакай В.* Сельдь всегда в моде / В. Бакай // Мир продуктов. – 2009. – № 5 (54). – С. 34–36.

3. *Бут О.* Пресервы под прессом / О. Бут, А. Хмара // Мир продуктов. – 2009. – № 7 (56). – С. 41–42.

4. *Деклараційний* патент на корисну модель № 6366, А, Україна, А23В4/00. Спосіб виробництва рибних пресервів на основі прісноводної риби / Н. Я. Орлова, О. В. Сидоренко, О. В.Тимофєєва. – №20040605088 ; заявл. 29.06.2004 ; опубл. 16.05.2005, Бюл. № 5.

5. *Икра* и пресервы из рыбы и морепродуктов. Методы определения консервантов : ГОСТ 27001-86. – Взамен ГОСТ 5431–50, кроме разд. 2–4. – М. : Министерство рыбного хозяйства СССР, 1988. – С. 1–3.

6. *Консервы* и пресервы из рыбы и морепродуктов. Метод определения поваренной соли : ГОСТ 27207-87 . – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. – С. 2–6.

7. *Консервы* и пресервы из рыбы. Методы определения жира : ГОСТ 26829–86 (с изменением № 1). – М. : ИПК Издательство стандартов, 1987. – С. 1–4.

8. *Кравчук Д.* Рыбный прессинг / Д. Кравчук, Ю. Довгий // FOOD UA. Продукты Украины. – 2012. – № 3 (34). – С. 45–47.

9. *Мезенова О. Я.* Технология деликатесных рыбных пресервов с повышенными пищевыми достоинствами / О. Я. Мезенова, А. Н. Ключко, Н. Ю. Ключко // Рыбпром. – 2007. – № 2. – С. 25–26.

10. *Мезенова О. Я.* Совершенствование технологии пресервов из сельдевых рыб Балтийского моря / О. Я. Мезенова, Э. А. Лейумаа, В. И. Шендерюк // Рыбное хозяйство. – 2012. – № 2. – С. 109–112.

11. *Панина М. Н.* Исследование влияния вкусоароматических добавок на процесс созревания и формирования качества малосоленых пресервов / М. Н. Панина, В. И. Шендерюк // Про-

грессивные технологические процессы обработки рыбы и морепродуктов. – Калининград, 2002. – С. 26–35.

12. *Пат. 76930* Україна, МПК A23L1/325. Рибні пресерви в апельсиновому соусі «Нептун» / І. В. Дітріх, Ю. І. Марченко. – № u 2012 07203 ; заявл. 13. 06. 2012 ; опубл. 25. 01. 2013, Бюл. № 2.

13. *Пресервы* из разделанной рыбы. Технические условия : ГОСТ 7453-86. – М. : Стандартинформ, 1988. – С. 5–6.

14. *Продукты* переработки плодов и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ : ГОСТ 28562–90. – Взамен ГОСТ 8756.2–82 в части разд. 4. – М. : Стандартинформ, 1991. – С. 1–3.

15. *Сборник* технологических инструкций по производству рыбных консервов и пресервов. – Л., 1989. – Ч. III. – С. 48.

16. *Химический* состав пищевых продуктов : кн. 2 : справочные таблицы содержания аминокислот, жирных кислот, витаминов, макро- и микроэлементов, органических кислот и углеводов / И. М. Скурихин и др. – М. : Агропромиздат, 1987. – 360 с.

17. *Тимофєєва О. В.* Фактори формування споживних властивостей рибних пресервів на основі прісноводної риби / О. В. Тимофєєва // Вісник КНТЕУ. Спецвипуск наукових робіт молодих вчених. – 2005. – № 3. – С. 191–198.

18. *Шендерюк В. И.* Исследование процесса созревания пресервов из балтийской сельди с использованием ферментсодержащей вкусо-ароматической добавки / В. И. Шендерюк, О. В. Кабанова, М. Н. Панина // Производство рыбных продуктов: проблемы, новые технологии, качество : материалы IV Международной научно-практической конференции. – Калининград, 2003. – С. 229–231.

19. *Шендерюк В. И.* Малосоленые пресервы из балтийской сельди / В. И. Шендерюк, М. Н. Альшевская, Д. Л. Альшевский // Рыбпром. – 2007.– № 4. – С. 30–31.

УДК [633.86 : 635.076] : 637.52

Л.В. Молоканова, канд. техн. наук
А.А. Квасніков, канд. техн. наук
Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, м. Донецьк, Україна

ХАРАКТЕРИСТИКА НАТУРАЛЬНИХ БАРВНИКІВ З КИЗИЛУ І ТЕРНУ ДЛЯ КОВБАСНОГО ВИРОБНИЦТВА

Л.В. Молоканова, канд. техн. наук
А.А. Квасников, канд. техн. наук
Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, г. Донецк, Украина

ХАРАКТЕРИСТИКА НАТУРАЛЬНЫХ КРАСИТЕЛЕЙ ИЗ КИЗИЛА И ТЁРНА ДЛЯ КОЛБАСНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Liliia Molokanova, PhD in Technical Sciences
Andrii Kvasnikov, PhD in Technical Sciences
Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhayilo Tugan-Baranovsky, Donetsk, Ukraine

CHARACTERISTICS OF NATURAL DYES FROM DOGWOOD AND BLACKTHORN FOR SAUSAGE MANUFACTURING

Наведено результати досліджень щодо технологічних характеристик натуральних барвників з кизилу і терну як рецептурних і функціональних інгредієнтів, що формують типовий рожевий колір варених ковбас. Визначено вплив на колір барвників pH середовища та способу оброблення сировини (сушка, заморожування ягід). Встановлено фракційний склад екстрактів барвників з кизилу і терну та ступінь відновлюваності сухих барвників. Наведено рекомендації стосовно розчинників для вилучення барвних речовин з ягід та умов введення сухих барвників у ковбасний фарш.

Ключові слова: *барвник, кизил, терен, pH середовища, спектр, фракційний склад, відновлюваність.*

Приведены результаты исследований технологических характеристик натуральных красителей из кизила и тёрна как рецептурных и функциональных ингредиентов, формирующих типичный розовый цвет варёных колбас. Исследовано влияние на цвет красителей pH среды и способа обработки сырья (сушка, замораживание ягод).

Установлен фракционный состав экстрактов красителей из кизила и тёрна и степень восстанавливаемости сухих красителей. Даны рекомендации касательно растворителей для извлечения красящих веществ из ягод и условий введения сухих красителей в колбасный фарш.

Ключевые слова: *краситель, кизил, тёрн, pH среда, спектр, фракционный состав, восстанавливаемость.*

The results of studies of technological characteristics of natural dyes of dogwood and blackthorn as prescription and functional ingredients, forming the typical pink color of cooked sausages. The effect on the color of dyes by pH and a method for processing raw (drying, freezing berries). The fractional composition of the dye's extracts from dogwood and blackthorn and the degree of recoverability of dry dyes are installed. Recommendations concerning solvents for extraction of colorants from berries, the conditions of the introduction of dyes in sausage meat are submitted.

Key words: *dye, dogwood, blackthorn, pH environment spectrum, fractional composition, recoverability*.

Постановка проблеми. Формування кольору варених ковбас на сьогодні ще й досі вирішується використанням нітриту натрію, який разом із властивістю утворювати нітрозопігменти, що саме і формує типовий рожевий колір ковбас, є токсичною речовиною [1].

Вилучення з рецептури ковбасних виробів нітриту натрію приводить до необхідності застосування барвників червоної і червоно-фіолетової гами. На практиці ця проблема і вирішується таким способом, але застосовувані барвники є синтетичними і згідно з нормативними документами не можуть використовуватися у ковбасному виробництві [2]. У зв'язку з цим постає необхідність застосування натуральних барвників, які повністю виключають токсикологічне навантаження на готовий продукт і при цьому характеризуються певними технологічними властивостями стосовно ковбасного виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш розповсюдженими в Україні натуральними барвниками є аннато (Е 160 в), куркумін (туркмерік) (Е 100), екстракт паприки (Е 160с), кармін (Е 120), бетанін (Е 162), карамельний колір (Е 150), ферментований рис. Ферментований рис на сьогодні є єдиним, дозволеним для використання у ковбасному виробництві. Він позитивно впливає на формування та стабілізацію кольору ковбас, стійкий до високих температур, окислення, pH [3; 4].

Останнім часом з'явилось багато досліджень щодо можливості використання нетрадиційної сировини для створення натуральних барвників для м'ясної промисловості. Відомо використання Sandalwood (екстракт сандалового дерева), Malt (барвник з ячмінного солоду), бузини, шовковиці, штокрози, горобини, трави комбуча, фруктів ацероли тощо [5–7].

Інтенсивні дослідження проводяться і у напрямку виробництва антоціанового барвника з гречки, який, за даними дослідників, має значну стійкість до впливу високих температур та тривалий термін зберігання. Досліджена можливість виробництва і використання барвника з аронії чорноплідної, що є досить дешевою і врожайною антоціанвмісною культурою на північному заході Росії. Російськими вченими для м'ясної промисловості отримано барвник з лаконоса американського, який адаптований до вирощування на Кавказі [8–9].

Нині розроблено новітні методи отримання натуральних барвників із відходів переробки буряка, чорноплідної горобини, цитрусових і кропиви [10].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Перевагами натуральних барвників є не лише їх здібність формувати типовий рожевий колір ковбас, а й харчова безпечність, позитивний вплив на смак і аромат продукту, біологічна активність, привабливість для споживача. Проблематичним, з технологічного погляду, є їх чутливість до дії кислот, лугів (проблема вибору розчинника для вилучення з антоціанової сировини), температури (можливість виготовлення у сухому вигляді), зміни pH середовища (можуть змінювати колір у готовому продукті).

Мета статті. Головною метою цієї роботи є дослідження властивостей натуральних барвників, отриманих з кизилу і терну дикорослих, а саме їх фракційного складу, реагування їх кольору на зміну pH середовища, вплив способу температурного оброблення ягід на колір барвників, розчинність сухих (порошкоподібних) барвників.

Виклад основного матеріалу. У межах дослідження отримано натуральні барвники для ковбасного виробництва з калини, кизилу та терну дикорослого, чорного винограду, перцю ратунда. Екстракти із зазначеної сировини характеризувалися таким кольором: калина – рожево-жовтий, кизил – інтенсивний червоний, терен – інтенсивний червоно-фіолетовий, чорний виноград – темно-рожевий з фіолетовим відтінком, перець ратунда – темно-жовтий.

Розкладання кольору екстрактів та математичне оброблення колірної гами у цифровому просторі моделей RGB та HSV показали, що переважаючим в усіх барвниках є значення параметра R (червоний). Але визначення щодо здатності отриманих барвників червоно-фіолетової гами формувати колір, типовий для варених ковбас, та його стійкість на денатурованому яєчному білку й шпику дозволили відібрати для подальших досліджень лише барвники з кизилу і терну.

Барвники з антоціанової сировини реагують на зміну pH середовища зміною кольору. Навіть аналіз специфікацій промислово вироблених імпортованих барвників показує, що їхня «сила» оцінюється при pH = 4,5, тобто у слабокислому середовищі. Це є важливим також для вибору розчинника, яким здійснюється екстракція барвних речовин (антоціанів) з сировини, в нашому випадку – ягід кизилу і терну.

Реагування екстрактів барвників з кизилу і терну на зміну pH середовища визначали методом спектрометричного аналізу на спектрофотометрі «SCINCO-SUV 2120» за адаптованою нами методикою його здійснення у кварцових кюветах із товщиною робочого шару 10 мм в інтервалі довжини хвилі 200–700 нм (УФ і видимий діапазон). Кінцеві результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика оптичних показників барвників із терну і кизилу

Барвник	Довжина хвилі, ι, нм	Оптична густина, од	Коефіцієнт екстинції, ε	Поглинання
Кисле середовище (0,1 М соляної кислоти відносно 0, 1М соляної кислоти)				
Терен	515	1,155	0,069	Максимум на 14–516 нм
Кизил		3,000	0,170	Широка смуга у діапазоні 469–534 нм
Нейтральне середовище (деонізована вода)				
Терен	505	0,711	незначний	Слабовиражений максимум
Кизил		1,067	0,064	Не реєструється
Лужне середовище (0,1 М гідроокису натрію відносно 0,1 М гідроокису натрію із двократним розведенням)				
Терен	590	0,542	незначний	Слабовиражений максимум
Кизил		2,084	0,063	Не реєструється

У нейтральному середовищі колір екстракту барвника з кизилу – насичений червоний, з терну – насичений червоний з фіолетовим відтінком (рис. 1, *а*).

У слабокислому середовищі зміни кольору незначні – в екстракті барвника з терну дещо слабшає фіолетовий відтінок, тобто його колір стає інтенсивно червоним, а барвник з кизилу, навпаки, набуває темно-помаранчевого відтінку (рис. 1, *б*).

У лужному середовищі (рис. 1, *в*) екстракт терну стає темно-коричневим, а екстракт кизилу – інтенсивно фіолетовим, тобто спостерігається суттєва зміна кольору.

У результаті проведених досліджень встановлено, що колір екстрактів терену і кизилу змінюється із зміною розчинника (вода, кислота, луг) і pH середовища (нейтральне, кисле, лужне), що здатне привести до втрати готовими барвниками тих властивостей, які необхідні під час їх застосування у виробництві варених ковбас, а саме червоний і червоно-фіолетовий колір. Тому виділення барвних речовин з кизилу і терну необхідно здійснювати нейтральними розчинниками, а застосування готових барвників

у виробництві варених ковбас потребує дотримання умов нейтрального чи слабокислого pH середовища ковбасних фаршів.

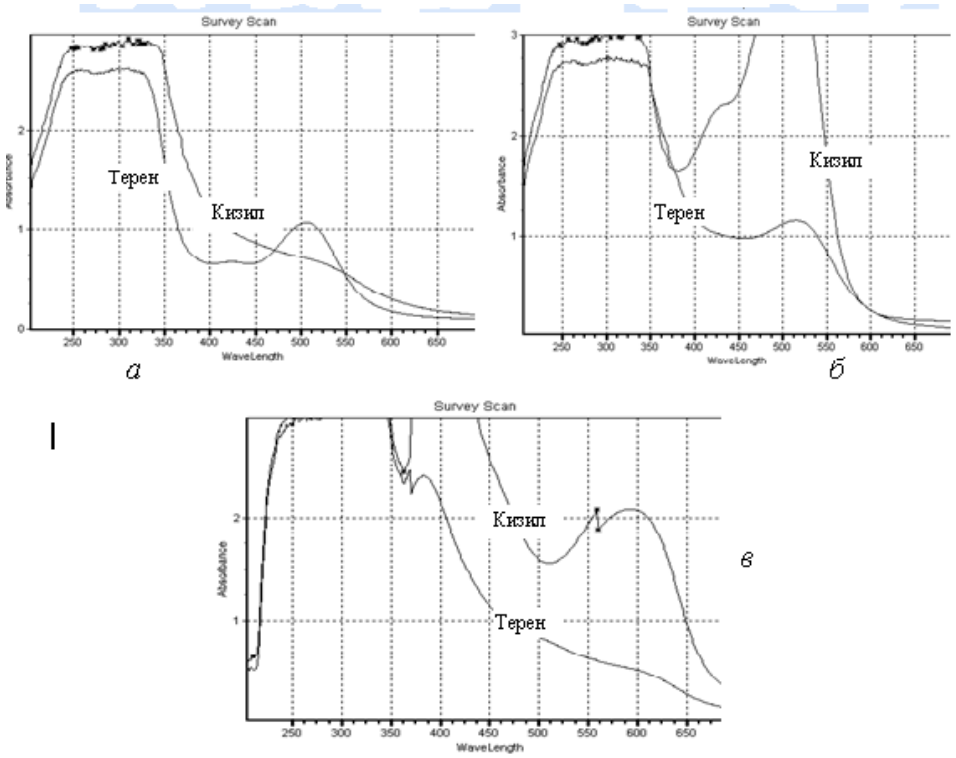


Рис. 1. Спектри барвників з кизилу і терну: а – у нейтральному середовищі; б – у кислому середовищі; в – у лужному середовищі

Виходячи з того, що ковбасне виробництво має бути забезпеченим натуральними барвниками протягом усього року, то сировина (ягоди) повинна певним чином перероблятися. З цієї причини нами досліджено можливість виготовлення барвників із сухих і заморожених ягід кизилу і терну. З цією метою ягоди кизилу і терну висушували в сушарках при температурі 60 °С до остаточного вмісту вологи не більше 14 % та заморожували у швидкоморозильних камерах при температурі –23 °С (умови сушіння та заморожування максимально наближені до промислових).

Під час використання висушених ягід (суха сировина) термін екстракції барвних речовин збільшився майже удвічі, що економічно не вигідно. У разі заміни екстрагенту (чиста вода) на водно-спиртовий розчин, час екстракції вдалося значно зменшити навіть у порівнянні із запатентованою методикою [11–12]. Між тим колір отриманих барвників суттєво змінився таким чином, що зробив неможливим їх застосування у ковбасному виробництві: барвника з кизилу – з інтенсивного червоного на темно-жовтий, барвника з терну – з червоного з фіолетовим відтінком на жовтогарячий.

На спектрограмі видно, що основні смуги спектрів водно-спиртових екстрактів барвників з кизилу і терну знаходиться у видимій області до 470 нм (поглинання у синій області спектра), що відповідає жовтому кольору барвників (рис. 2). У цьому випадку має місце сольватохромний ефект.

З метою встановлення речовин, що забезпечують колір отриманих барвників з кизилу і терну дикорослих, нами здійснено аналіз їх фракційного складу методом ВЕРХ. Дослідження здійснено на хроматографі Simadzu LC (колонка 2 × 80 мм), сорбент – Сіласорб C_{18} (розмір часточок 7 мкм); рухома фаза – ацетонітрил (марка «для ВЕРХ») + вода (бідистильована) – оцтова кислота Льодяна (марка х.ч. 2 : 8 : 0,05). Перед початком дослідження рухому фазу протягом 10 хвилин деаерували гелієм. Витрати елюента 80 мкл/хв. Оптична довжина хвилі $\lambda = 280$ нм;

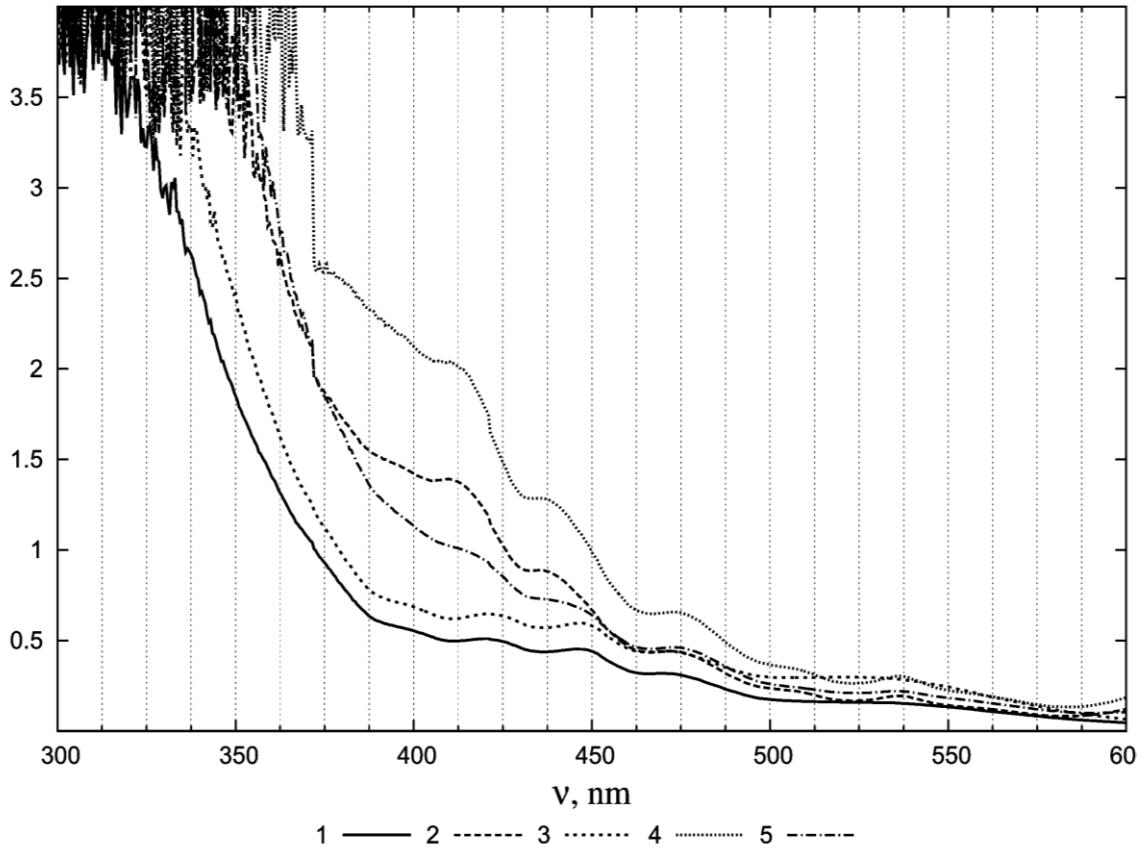


Рис. 2. Спектри водно-спиртових екстрактів барвників з кизилу і терну: 1, 2 – кизил, 4-5 – терен

Результати хроматографічних випробувань (за встановленими піками) щодо ідентифікації виду і кількісного вмісту складових барвників представлені в табл. 2. При цьому частина антоціанів залишилася не ідентифікованою, оскільки деякі піки характеризують суміш компонентів із близькими полярними властивостями.

Таблиця 2

Фракційний склад барвників з кизилу і терну (за даними ВЕРХ)

№ піка	Барвник з кизилу			Барвник з терну		
	T_R, хв	Речовина	Вміст, %	T_R, хв	Речовина	Вміст, %
1	2,924	Ціанідин-3,5діглюкозид	3	5,382	Дельфінідин-3діглюкозид	11
2	4,845	Ціанідин-3глюкозид	64	6,550	Ціанідин-3 рутинозид	37
3	5,123	Ціанідин-3галактозид		7,004	Дельфінідин-3 рутинозид	
4	5,762	Ціанідин-3арабінозид		7,928	Дельфінідин-3 глюкозид	16
5	6,945	Ціанідин-3ксілозид		8,564	Ціанідин-3 глюкозид	
6	7,621	Ціанідин	16	9,301	Не ідентифіковано	–
7	8,521	Гесперидин	2	10,845	Дельфінідин	10
8	11,0	Не ідентифіковано	–	14,804	Петунідин	9
9	11,769			15,692	Не ідентифіковано	–
10-11	12,4-12,7					
12	13,024	Пеларгонідин	6			
13	13,8	5-метілціанідин	4			

Як показали дослідження, основною барвною речовиною в кизиловому барвнику є різні хімічні форми цианідину (червоний). Цим пояснюється той факт, що барвник з кизилу має червоний колір. До складу барвника також входять пеларгонідин та геспери-

дин. Пеларгонідин характеризується пурпуровим кольором, а гесперидин, що має помаранчевий колір, знаходиться в невеликих кількостях і суттєвого впливу не становить.

Основною речовиною в тереновому барвнику є різні хімічні форми дельфінідину (червоно-синій). Терновий барвник характеризується інтенсивним червоним кольором з фіолетовим відтінком, у ньому ідентифікується суміш дельфінідинів з ціанідинами та петунідин (червоно-фіолетовий). У цілому ж превалювання цианідів у барвнику з кизилу та дельфінідинів у барвнику з терну є безсумнівним.

Введення сухих барвників з кизилу і терну в ковбасний фарш передбачено на етапі куттерування, тому необхідно враховувати, що в куттер вноситься лускуватий лід. Лід, який переходить у воду, розчиняє барвники, тобто відбувається їх відновлення.

Нами розроблено метод оцінювання відновлюваності сухих барвників у разі їх використання у ковбасному виробництві на основі закону Бугера-Ламберта-Беєра.

Виходячи із цього закону, основною характеристикою, яка здатна охарактеризувати відновлюваність сухих барвників, є оптична густина. За умови постійності показників коефіцієнта спектральних характеристик барви і товщини шару, зміна оптичної густини прямопропорційна зміні концентрації барви. В умовах наших досліджень барвник не змінюється, метод визначення (шар) також залишається постійним, тобто про концентрацію барвника у відновленому розчині може свідчити оптична густина.

Визначивши оптичну густину відновленого барвника та пермеату, розраховано коефіцієнт відновлюваності сухого барвника як відношення першого показника до другого. Результати експерименту і математичних розрахунків дозволили визначити, що барвник з кизилу відновлюється на 96,99 %, а барвник із терну – на 97,01 %.

Висновки і пропозиції. Застосування натуральних барвників є одним із шляхів вирішення проблеми формування кольору варених ковбас. Визначення характеристик кольору (фракційного складу), стійкості зафарбовування, реагування на зміну pH середовища, відновлюваності показали можливість і доцільність використання барвників з кизилу і терну для формування типового кольору варених ковбас.

Список використаних джерел

1. *Баймишев Р. Х.* Влияние нитрита натрия на качество и безопасность вареных колбас / Р. Х. Баймишев, М. В. Трифонов // Мясные технологи. – 2004. – № 6 (18). – С. 8–9.

2. *ДСТУ 4436* : 2005. Ковбаси варені, сосиски, сардельки, м'ясні хліби. Загальні технічні умови. – Введ. 2007–01–01. – К. : Держспоживстандарт, 2007. – 46 с.

3. *Оносова И.* Красители для мяса – кодексы, регламенты, нормативы реальность / И. Оносова, С. Суйков // Мясной бизнес. – 2011. – № 3. – С. 34–40.

4. *Пасічний В. М.* Стабілізація технологічних властивостей ферментованого рису для виробництва м'ясопродуктів / В. М. Пасічний, І. В. Кремешна // Наукові праці НУХТ. – 2004. – Вип. 15. – С. 49–50.

5. *Алешкевич Ю. С.* Натуральные пищевые красители и их применение в мясном производстве / Ю. С. Алешкевич. – Краснодар : Знамя. – 2005. – 164 с.

6. *Отакулов М. К.* Красители из штокрозы / М. К. Отакулов, А. С. Салихов, Т. Т. Сандова // Пищевая промышленность. – 2009. – № 9. – С. 43–44.

7. *Соакян Э. Л.* Применение растительных пигментов для окраски мясопродуктов / Э. Л. Соакян, Е. И. Грушина, С. С. Симаворян // Известия аграр. науки. – 2003. – № 2. – С. 82–84.

8. *Красникова Е. В.* Пищевой краситель из аронии черноплодной / Е. В. Красникова // Всё о пищевой промышленности России. – 2009. – С. 48.

9. *Дадян Н. К.* Исследования и практическая реализация технологических свойств красителя из лаконоса американского при производстве вареных колбас : дис. … канд. техн. наук / Н. К. Дадян. – Ставрополь, 2009. – 207 с.

10. *Груздь А. Ю.* Натуральні барвники для м'ясного виробництва: теоретичний і практичний аспекти / А. Ю. Груздь // М'ясні технології. – 2012. – № 14 (52). – С. 28–32.

11. *Пат.* на корисну модель UA № 59833 U МПК C09B 61/00. Спосіб отримання натурального барвника з кизилу дикорослого / А. А. Квасніков, Л. В. Молоканова. – u 2011 02475 ; заявл. 02.03.2011 ; опубл. 25.05.2011, Бюл. № 10.

12. *Пат.* на корисну модель UA № 59834 U МПК C09B 61/00. Спосіб отримання натурального барвника з терену дикорослого / Л. В. Молоканова, А. А. Квасніков. – u 2011 02476 ; заявл. 02.03.2011 ; опубл. 25.05.2011, Бюл. № 10.

УДК 338.436

Т.І. Ткаченко, аспірант
Черкаський національний університет ім. Б. Хмельницького, м. Черкаси, Україна

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ КОМБІКОРМОВОЇ ПРОДУКЦІЇ

Т.И. Ткаченко, аспирант
Черкасский национальный университет им. Б. Хмельницкого, г. Черкассы, Украина

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И КАЧЕСТВА КОМБИКОРМОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Taras Tkachenko, PhD student
Cherkasy National University of the name of B. Khmelnitsky, Cherkassy, Ukraine

THE SYSTEM OF MONITORING OF THE SECURITY AND QUALITY ASSURANCE OF MIXED FEED PRODUCTION

Розглянуто систему моніторингу забезпечення безпечності та якості комбікормової продукції. Запропоновано методику контролю якості продуктів і послуг, що базується на їх постійному вдосконаленні, позиціонуванні споживчого оцінювання, статистичному моделюванні, ієрархічній оптимізації та організації зокрема. Системи дослідження вирішує завдання знаходження оптимальних показників якості сировини комбікормів, що забезпечують їх конкурентоспроможність.

Ключові слова: *моніторинг, якість, комбікормова продукція, виробництво.*

Рассмотрена система мониторинга обеспечения безопасности и качества комбикормовой продукции. Предложена методика контроля качества продуктов и услуг, основанная на их постоянном совершенствовании, позиционировании потребительской оценки, статистическом моделировании, иерархической оптимизации и организации в частности. Системы исследования решает задачу нахождения оптимальных показателей качества сырья комбикормов, обеспечивающих их конкурентоспособность.

Ключевые слова: *мониторинг, качество, комбикормовая продукция, производство.*

In article rassmotrena System Security and Monitoring obespechenyya kombykormovoy of quality products. Predlozhennaya method of quality control produktov and services, to osnovannыy 's Always Improvement , positioning potrebytelskoy comments, statystycheskom modeling, optimization and yerarhycheskoy organization in particular. Systems Studies reshaet problem nahozhdenyya optymalnыh indicators of quality raw materials kombykormov, obespechyvayuschyh 's competitiveness.

Key words: *monitoring, the quality, kombykormovaya out production production.*

Постановка проблеми. На сьогодні актуальним постає питання щодо вдосконалення технології приготування та зберігання кормів, застосування досконалих машин і устаткування, які дозволять переробляти в якісний корм практично увесь біологічний урожай. Проте велике значення в цьому випадку відіграє питання моніторингу забезпечення безпечності та якості комбікормової продукції. Практично доведено, що харчування тварин і птахів не забезпечить високого рівня продуктивності, якщо не буде оптимально задоволено потреби організму в різноманітних життєво необхідних елементах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні принципи і підходи щодо визначення суті, механізмів контролю якості та управління конкурентними перевагами підприємств на ринку комбікормової продукції розглядалися в роботах В. Я. Амбросова, О. І. Дація, С. Н. Іляшенка, М. Х. Корецького, Д. Ф. Крисанова, А. В. Линенка, П. М. Макаренка, Л. Ю. Мельника та інших.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Проте багато теоретичних і методологічних питань щодо управління якістю і конкурентоспроможністю

продукції стосовно харчової промисловості, зокрема комбікормових підприємств, залишаються не дослідженими. Використовуючи в харчуванні тварин навіть менше корму, але який містить у своєму складі біологічно повноцінні поживні речовини, можна отримати стільки ж або більше продукції, ніж під час вирощування великої кількості корму, але нижчого рівня якості. Найбільш ефективним способом підготовки кормів до згодовування є якісне приготування комбікормів. Комбікорм містить усі життєво необхідні елементи харчування для тварини у відповідних співвідношеннях, тому поживні речовини краще засвоюються, ніж під час згодовування одного виду корму. Застосування комбікормів підвищує ефективність використання поживних речовин на 20–30 % і дозволяє отримати додаткову продукцію від тварин у разі застосування тих же кормових засобів. Значення комбікормів у повноцінному живленні сільськогосподарських тварин і птахів є великим, оскільки їх використання дозволяє отримати від тварин швидші прирости при одночасному зниженні витрат на їх придбання, а також використання та скорочення витрат кормів.

Мета статті ґрунтується на розробленні системи моніторингу забезпечення безпечності та якості комбікормової продукції.

Виклад основного матеріалу. Застосування збалансованих за основними елементами харчування комбікормів високого рівня якості дозволяє економити кормові ресурси, у тому числі і кормове зерно. При цьому до обороту повинні залучатися продукти багатьох галузей промисловості таких, як: харчова, м'ясо-молочна, рибопереробна та ін. Враховуючи кризовий стан у країні, останнім часом спостерігається спад виробництва комбікормів та сільськогосподарської продукції. Основною причиною такого спаду є високий рівень інфляції, відсутність інноваційних технологій, комплексної системи управління якістю, яка б базувалася на механізмі процесів контролю якості виробничої системи та враховувала б вплив внутрішніх та зовнішніх факторів середовища. В результаті відбувся процес скорочення продукції тваринництва на 30–60 %, а комбікормового виробництва за ці ж роки зменшилося більше, ніж у 5 разів.

Порушені технологічні зв’язки комбікормових підприємств із сільгоспвиробниками. Раніше під час створення підприємств враховувалися перспективи розвитку системи виробництва комбікормів і продуктів тваринництва, а станом на сьогодні кожен товаровиробник розробляє свою концепцію, створює свій бізнес-план з урахуванням лише своїх інтересів, причому в більшості випадків має тимчасовий кон’юнктурний характер.

Є необхідність запропонувати рекомендації Міністерству аграрної політики та продовольства щодо модернізації комбікормових підприємств за рахунок розроблення механізму підвищення рівня якості та показників діяльності виробництва, а також розроблення комплексного підходу із системою АПК, орієнтуючись саме на підвищення рівня якості виробників тваринницької продукції, комбікормових підприємств, постачальників сировини для виробництва комбікормів, переробних і торговельних організацій. Функціонування комбікормової промисловості без налагодженого механізму міжгалузевої взаємодії неможливе. Досить негативно вплинула на стан ослабленого у ході реформ агропромислового сектору масована інтервенція імпортного продовольства, внаслідок чого комбікормові підприємства і споживачі їх продукції опинилися у кризовій ситуації. Різке скорочення виробництва комбікормів привело до істотного зниження рівня використання виробничих потужностей підприємств, зростання витрат з розрахунку на одиницю продукції, що вироблялася. Для подолання негативних тенденцій у комбікормовій промисловості, створення умов надійного забезпечення тваринництва високоякісним кормом за оптимальними цінами потребує розроблення систем контролю якості виробництва, враховуючи вплив інтеграційних процесів в АПК.

Комбікормова промисловість виготовляє суміші з різних компонентів (видів сировини), комбінуючи їх у самих різних поєднаннях і пропорціях. Суміш має недоліки (низький вміст білка, нестачу вітамінів тощо) одних компонентів, але компенсує за рахунок переваг іншими. Головним фактором при виробництві комбікормів є створення такої суміші, яка задовольнить потребу сільськогосподарських, домашніх тварин, птахів у харчових речовинах, забезпечить їх зростання, розвиток і збереження. Вимоги до комбікормів для промислових тваринницьких та птахопідприємств надзвичайно великі. Комбікорм стає зв'язною ланкою між природою і тваринами. Всі поживні речовини, необхідні для зростання і розвитку, компенсуються комбікормами, оскільки тварини знаходяться на клітинному і станковому утриманні та позбавленні спілкування з живою природою.

Враховуючи, що при виробництві комбікормів використовується сировина як рослинного, так і тваринного походження, є необхідність визначити чинники, що впливають на якість цих видів сировини. Проблема хімічного та мікробіологічного забруднення продовольства та кормів нині є актуальною. За статистичними даними Держкомстату України, понад 4,7 % зразків дослідженої харчової продукції не відповідають нормативам за санітарно-хімічними показниками, а понад 8 % – за мікробіологічними. За нормативними даними для кормів ці цифри є значно вищими і можуть становити від 10 до 15 %.

У біосфері циркулює величезна кількість ксенобіотиків техногенного походження, більшість з яких має виключно високу токсичність. Серед них особлива роль відводиться стійким органічним забруднювачам (СОЗ), які включають декілька груп високотоксичних хлорорганічних речовин з канцерогенною, тератогенною, ембріотоксичною, а також мутагенною дією. Вони здатні завдавати шкоди людині, сільськогосподарським тваринам, птахам, а також оточуючому середовищу в дуже низьких концентраціях. До СОЗ відносяться поліхлоровані ді-бензо-n-диоксини та дибензофурани (понад 200 речовин); поліхлоровані біфеніли (понад 200 з'єднань); хлорорганічні пестициди (понад 100 з'єднань). Хоча діоксин ніколи не вироблявся спеціально, вони набули поширення, будучи небажаними і часто неминучими побічними продуктами деяких виробництв хімічної та целюлозно-паперової промисловості, процесів спалювання хлорвмісних відходів та ін. За оцінюванням експертів, упродовж року глобальна емісія діоксину в довкілля становить близько 5000 кг.

Хлорорганічні пестициди (ХОП) – найбільш небезпечні забруднювачі кормів та продуктів харчування, що відрізняються високою токсичністю, канцерогенними властивостями, а також стабільністю в довкіллі. Серед ХОП найбільш широке застосування і популярність отримав дихлордифенілтрихлоретан або ДДТ, період напіврозпаду якого становить 15–20 років. Незважаючи на те, що ДДТ включений до міжнародного списку найбільш небезпечних речовин і заборонений у 80 країнах, він досі виробляється в Індії і Китаї. В Індії річне виробництво ДДТ становить близько 10000 метричних тонн. Виробничі потужності Китаю невідомі. На сьогодні легальне використання ДДТ обумовлено виключно боротьбою з малярією. Найвищі концентрації ХОП в оточуючому середовищі спостерігаються у країнах Африки, Азії та особливо Індії, тобто в регіонах, де вони інтенсивно застосовуються до теперішнього часу.

Нині Україна імпортує велику кількість фуражу і кормових добавок з-за кордону. І хоча в переліку пестицидів, дозволених до застосування в Україні, немає жодного з ХОП, вони включені до списку токсикантів для обов'язкового контролю як найбільш небезпечні індикатори забруднення навколишнього середовища внаслідок їх високої стійкості і здатності до персистенції. Забруднення довкілля важкими металами має безпосереднє відношення до моніторингу супертоксикантів, оскільки багато з них проявляють високу токсичність у відповідній кількості та, в свою чергу, концентруються в

живих організмах. Найбільш небезпечні токсиканти біологічного походження – мікотоксини. Серед них виділяються своїми токсичними, канцерогенними властивостями афлатоксини. В багатьох випадках трапляється у продуктах харчування та кормах висока токсичність, можливість переходу в продукцію тваринництва (молоко) і птахівництва (яйця), що визначило гостру необхідність організації регулярного контролю за змістом цих мікотоксинів у кормі та продуктах харчування. Велику групу становлять трихотеценові мікотоксини, більшість з яких є токсичними метаболітами грибів з роду Fusarhim.

Сьогодні відомо більше 100 метаболітів трихотеценової природи. Трихотецинові мікотоксини утворюються в районах з помірним кліматом, де переважає висока вологість і прохолодна температура. Для нашої країни вони, мабуть, представляють найбільшу небезпеку. Продукування цих токсинів на зернових субстратах відбувається при низьких температурах (4–14 °С) та підвищеним рівнем вологості, чим обумовлено їх поширення на території нашої країни. За даними Г. П. Кононенко [2], частота виявлення Т-2 токсину в Криму становила у середньому 36–38 %. Найбільше поширення Т-2 токсину спостерігали в Західній Україні (87 %). У зерні з далекосхідного регіону частота виявлення Т-2 токсину становила 23,6 %. У пшениці та ячмені з південно-західного регіону частота виявлення Т-2 токсину становила 59 %.

Досить часто контаминують зерно хлібних злаків (ячмінь, пшеницю, овес, жито, кукурудзу) охратоксини. В Україні охратоксикоз досить розповсюджений. Охратоксин А відноситься до високотоксичних з’єднань. Найбільшу небезпеку представляє те, що охратоксин А може виявлятися у м’язах свиней до 2 тижнів, у печінці – 3 тижні, а нирках – 4 тижні після припинення потрапляння з кормом. Залишковий вміст токсину досить часто виявляється у нирках свиней після забою. За даними Г. П. Кононенко, у деяких областях центрально-чорноземного району частота виявлення охратоксина А у фуражному зерні становила у середньому 34 %. Причому у деяких партіях ячменю були виявлені надвисокі рівні токсину (від 9 до 65 МДУ), що викликали гострі отруєння тварин і контаминацію токсином продукції тваринництва.

До сировини тваринного походження, яка використовується при виробництві комбікормів, відносяться рибне та м’ясокістне борошно, що входять до складу білково-мінеральних компонентів. Значно підвищена увага повинна приділятися профілактичним заходам, заснованим на виявленні і ліквідації потенційних небезпек на всіх стадіях виробництва, починаючи від виробництва кормів і до моменту прийняття їжі. Незважаючи на те, що відповідальність за виробництво і випуск на ринок безпечного продовольства лежить на виробниках, захист здоров’я споживача завжди залишиться під контролем держави. Державні ветеринарні служби мають бути повністю готові до виконання нових вимог міжнародних організацій (ВІЗ, Кодекс Аліментаріус, МЕБ, СОТ) та керуватися у своїй роботі науковим підходом, заснованим на належному оцінюванні ризиків. Для ефективного виконання поставлених перед ветеринарною службою завдань потрібна національна програма моніторингу за вмістом залишкових кількостей лікарських засобів для тварин, ксенобіотиків техногенного та біологічного походження у продукції тваринництва і кормах зокрема. Невід’ємна частина інтенсивного тваринництва ґрунтується на використанні лікарських засобів у ветеринарії, що обумовлює потенційну можливість наявності залишкових кількостей цих препаратів у тваринницькій продукції і необхідності контролю за їх вмістом. Більшість цих препаратів застосовується з кормами. Причини забруднення комбікормів лікарськими препаратами включають: людський фактор (помилки оператора), перехресне забруднення у процесі виробництва лікувальних і серійних комбікормів на одному і тому ж технологі-

чному обладнанні, забруднення у процесі транспортування, а також безпосередньо в господарствах.

Проблеми, що виникають у результаті забруднення комбікормів ветеринарними препаратами, включають: токсичність для тварин і залишки ветеринарних препаратів у продукції тваринництва. Токсичність забруднених ветеринарними препаратами комбікормів обумовлена різною видовою чутливістю тварин до тих або інших ветеринарних препаратів. Найбільша кількість випадків токсичності для тварин пов'язана з широким використанням іонофорних антибіотиків для боротьби з кокцидиозом у птахівництві. Іонофори, вживані в терапевтичних дозах для птахів (120 міліграм/кг), викликають отруєння у коней, великої рогатої худоби, верблюдів, собак (максимальна доза 33 міліграми/кг).

Проте головна небезпека перехресної контамінації кормів ветеринарними препаратами – це отримання тваринницької продукції, забрудненої залишками цих препаратів. Моніторингові дослідження, проведені в Північній Ірландії, показали, що в 44 % досліджених кормів були виявлені антимікробні препарати, хоча виробник декларував їх відсутність. При моніторингу комбікормів, що містять лікарські препарати, в 35 % з них знаходилися препарати, що додатково не декларували. Найчастіше виявляли контамінацію кормів хлортетрацикліном (у 15 % випадків), сульфаніламідами (6,9 %), пеніциліном (3,4 %), іонофорами (3,4 %). Для запобігання подібному забрудненню найефективніше використовувати окремі ТЛ для виробництва комбікормів та премікси з лікарськими препаратами і застосування гранульованих лікарських премікси, що зменшує проблему електростатичних сил. Для надійного гарантування якості і безпеки продуктів харчування необхідно контролювати правильність застосування ветеринарних препаратів з кормом, перехресну контамінацію ними кормів, визначати залишковий вміст ветеринарних препаратів в органах і тканинах тварин. Забезпечення належного рівня безпеки продовольства неможливе без організації строгого контролю якості та безпеки кормів і кормових добавок для тваринництва з використанням сучасних приладів та нових високочутливих методів аналізу. Таке завдання поставлене й успішно вирішується на рівні держави саме щодо тварин і кормів [1; 3]. Створення інтегрованих систем контролю якості в АПК, що об'єднуватиме виробників зерна, його переробників, виробників комбікормів і тваринницької продукції, полегшить процес впровадження системи дослідження на цих підприємствах і дозволить отримати якісну та безпечну продукцію. Причому ця система включатиме такі етапи виробництва, як виробництво фуражного зерна, виробництво відходів підприємств хлібопродуктів, а також виробництво продуктів тваринництва, у тому числі м'ясокістне та рибне борошно.

Нині комбікорми виробляються для великого рогатого скота, овець, свиней, хутрових звірів, риб, для усіх видів сільськогосподарських птахів (індичок, курей, качок, страусів, перепелиць), оленів, лабораторних тварин (білих мишей), кішок, собак та інших тварин. Сучасна комбікормова промисловість України є важливою ланкою в розвитку промислового тваринництва, всіх його галузей (птахівництва, скотарства, рибництва, хутрового звірівництва тощо). Застосування збалансованих за основними елементами харчування високого рівня якості комбікормів, враховуючи максимальне використання ресурсів у виробничій системі та мінімізацію відходів виробництва, дозволяє економити кормові ресурси, у тому числі і кормове зерно. Узагальнена схема виробництва комбікормів наведена на рис. 1 у вигляді пріоритетних структурних елементів.

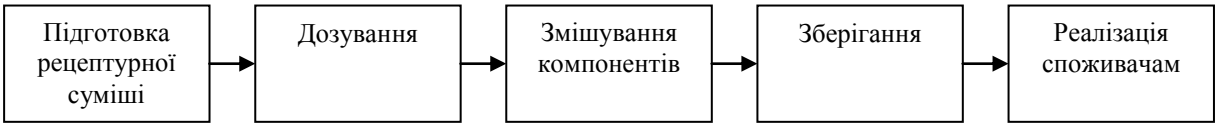


Рис. 1. Структурна схема виробництва комбікормів

Для підвищення якості та речової цінності виготовлення комбікормів є необхідність на ПАТ «Миронівський завод по виготовленню круп і комбікормів» покращити дозування сировини на основі використання автоматичних шнекових дозаторів. Шнекова подача напівпродукту в апарат, а також наявність спеціального ворошителя матеріалу, що дозується в понаддозаторному бункері, надає можливість покращити контроль якості ТП на комбікормовому підприємстві за рахунок регулювання тиску в дозаторі.

У результаті дослідження і застосування вищенаведених методів можна сформувати модель БІС контролю якості виготовлення продукції на комбікормовому підприємстві, яка наведена на рис. 2.

Рис. 2. Модель БІС контролю якості виготовлення продукції на ПАТ «Миронівський завод по виготовленню круп і комбікормів»

Висновки і пропозиції. Комбікормове виробництво є досить складним та багатостадійним процесом. Організація ТП виробництва комбікормів, кормових сумішей та домішок, що входять до системи простеження, повинна забезпечити отримання готового продукту високої якості з мінімальними поточними витратами і повним використанням виробничих потужностей. Для того, щоб отримати якісний комбікорм, необхідно мати і сучасне устаткування та розроблений проект. Спостерігається пожвавлення у проектній діяльності підприємств щодо зберігання та переробці зерна. Проектувальники у своїй діяльності використовують комп'ютерні технології. Автором розроблена комп'ютерна програма щодо моделювання ТС комбікормових підприємств.

Список використаних джерел

1. *Жарков Ю.* Соціальні стандарти поліпшують якість життя / Ю. Жарков, С. Бульдович, В. Хмель // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2005. – № 2. – С. 4–5.

2. *Про підтвердження* відповідності : Закон України за № 2406-III від 17 травня 2001 р.

3. *Popalambras P.,* Utilizing Knowledge – Based Systems in Desung Optimization. Presentation at the, NATO ASI on Computatianal Mathematical Programing. Bad Windsheim FR- Germany (July 23-Aug. 2).

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 ЧНТУ.

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. **Вся інформація про автора (ів), 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.

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.

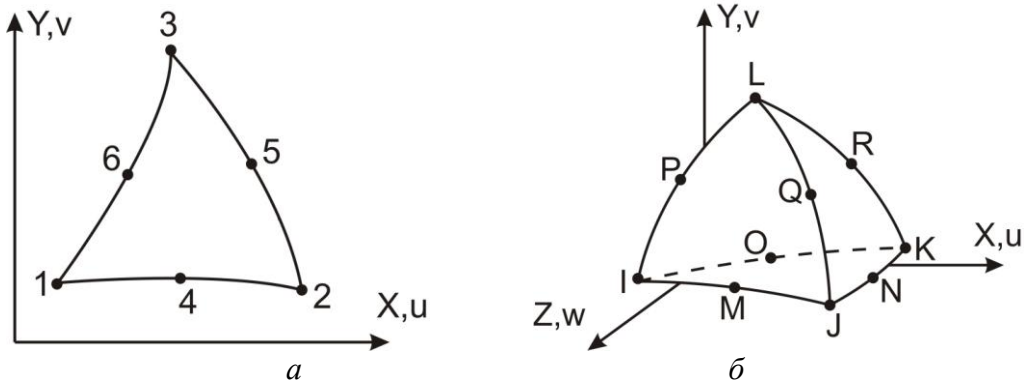
Рисунки і таблиці необхідно подавати у статті безпосередньо після тексту, де вони згадані вперше, або на наступній сторінці.

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:



а *б*

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, не виходячи за поле. Формули необхідно вирівнювати по лівому краю сторінки. Між ними та текстом витримується інтервал в один рядок. Обов'язково подають розшифровку літерних позначень величин у формулах. Для набору позначень фізичних величин використовують редактор формул Microsoft Equation для WINDOWS.

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, які 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.

Контактна особа: 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
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

БЕЗКОНТАКТНА ЗАРЯДКА АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

А.В. Будённый, канд. техн. наук
М.А. Прокопец, магистр
Е.Ю. Коваленко, магистр
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

БЕСКОНТАКТНАЯ ЗАРЯДКА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Oleksandr Budionnyi, PhD in Technical Sciences
Maryna Prokopets, master
Yevhen Kovalenko, master
National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute», 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		

ДО УВАГИ АВТОРІВ!

Договір про передачу права на використання твору укладається на кожну статтю і надсилається поштою у паперовому вигляді з повністю заповненими автором (ами) твору реквізитами у 2-х примірниках (один для редакційної колегії, інший – для автора). Договір підписується ректором Чернігівського національного технологічного університету й один примірник повертається у паперовому вигляді автору (ам) твору поштою. Наявність Договору про передачу права на використання твору є обов’язковою умовою публікації наукових статей у наукових виданнях університету для всіх аторів.

Додаток В

Бланк квитанції для оплати публікації

Заява на переказ готівки

Дт **1002** Ідентифікаційний код 05460798

Кт **31259203106996**

Одержувач платежу ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Дата здійснення операції _____

Дата валютування _____

Код установи банку 853592

Найменування установи банку ГУДКСУ Укр. в Чернігівській області

Прізвище, ім'я, по-батькові платника _____

Адреса платника _____

Призначення платежу за видання у збірнику **25010100**

Сума _____

Загальна сума _____ (словами)

Підпис платника _____

Касир

Квитанція

Дт **1002** Ідентифікаційний код 05460798

Кт **31259203106996**

Одержувач платежу ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Дата здійснення операції _____

Дата валютування _____

Код установи банку 853592

Найменування установи банку ГУДКСУ Укр. в Чернігівській області

Прізвище, ім'я, по-батькові платника _____

Адреса платника _____

Призначення платежу за видання у збірнику **25010100**

Сума _____

Загальна сума _____ (словами)

Підпис платника _____

Касир

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК

ЧЕРНІГІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

СЕРІЯ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ»

НАУКОВИЙ ЗБІРНИК

№ 1 (71)

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 10.06.2014. Формат 60х84/8. Друк різографія.
Гарнітура Times New Roman. Умов. друк. арк. – 28,8.
Тираж 300 пр. Замовлення № 237/14.

Редакційно-видавничий відділ Чернігівського національного 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.