

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ**

**Державний вищий
навчальний заклад
«ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
(ДВНЗ «ПДТУ»)**

ISSN 2225-6733

***ВІСНИК
ПРИАЗОВСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО
ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ***

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

**Видається 2 рази на рік
з 1995 року**

Випуск 41

Серія: Технічні науки

Маріуполь, 2020

**DEPARTMENT OF EDUCATION
SCIENCE OF UKRAINE**

**State higher
education institution
«PRYAZOVSKYI STATE
TECHNICAL UNIVERSITY»
(SHEI «PSTU»)**

ISSN 2225-6733

***REPORTER
OF THE PRYAZOVSKYI
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY***

**COLLECTION OF SCIENTIFIC
WORKS**

**Published twice a year,
since 1995**

Issue 41

Section: Technical sciences

Mariupol, 2020

Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Вип. 41. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2020. – 217 с. – (Технічні науки). – Режим доступу: DOI: 10.31498/*2225-6733.41.2020.

У збірнику публікуються результати теоретичних та експериментальних досліджень вчених вищого навчального закладу та провідних спеціалістів у галузі технічних наук, показаний їхній вклад у розвиток науки та сучасних технологій.

Публікації видання зберігаються на офіційному сайті Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського.

Головний редактор

Чигарьов Валерій Васильович д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»

Заст. головного редактора

Матвієнко Володимир Миколайович д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»

Відповідальний секретар

Савенко Ольга Сергіївна

Редакційна колегія

- Angeliki G. Lekatou* Dr., PhD, University of Ioannina (UOI), Greece
Hossam Ahmed Mohamed Halfa Dr., PhD, Central Metallurgical R&D Institute (CMRDI), Cairo, Egypt
Sergey Edward Lyshevski Dr., PhD, Rochester Institute of Technology, New York, USA
Белоконь Каріна Володимирівна канд. техн. наук, доцент, Запорізька державна інженерна академія
Білоусов Євген Вікторович канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія
Бурлака Володимир Володимирович д-р техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»
Бялобржеський Олексій Володимирович канд. техн. наук, доцент, КрНУ імені Михайла Остроградського
Володарець Микита Віталійович канд. техн. наук, ст. викладач, ДВНЗ «ПДТУ»
Грицук Ігор Валерійович д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія
Губинський Михайло Володимирович д-р техн. наук, професор, Національна металургійна академія України
Гулаков Сергій Володимирович д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»
Єфременко Василь Георгійович д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»
Жежеленко Ігор Володимирович акад., д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»
Ковалевська Олена Сергіївна канд. техн. наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія
Кухар Володимир Валентинович д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»
Лук'яненко Анна Олегівна канд. техн. наук, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України
Мазур Владислав Олександрович канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»
Мамедов Аріф Тандиг огли д-р техн. наук, професор, Азербайджанський технічний університет
Молчанова Віра Сергіївна канд. техн. наук, ст. викладач, ДВНЗ «ПДТУ»
Парфененко Юлія Вікторівна канд. техн. наук, доцент, Сумський державний університет
Петренко Тетяна Григорівна канд. техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту
Плахтій Олександр Андрійович канд. техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту
Поднебенна Світлана Костянтинівна канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»
Сагіров Юрій Георгійович канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»
Саєнко Юрій Леонідович д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»
Сорочан Олена Миколаївна канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «ПДТУ»
Ткачов Віктор Васильович д-р техн. наук, професор, НТУ «Дніпровська політехніка»
Чейлях Олександр Петрович д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «ПДТУ»

Коректори

Корчагіна Тетяна В'ячеславівна; Міхно Наталя Анатоліївна

Адреса редакції збірника: ДВНЗ «ПДТУ», к. 175, вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, Донецька обл., 87555, Україна.

Address: PSTU, vul. Universytetska, 7, Mariupol, Donetska Oblast, 87555, Ukraine.

Tel.: (0629) 44-62-34, **tel/fax** (0629) 33-34-16; **fax:** (0629) 52-99-24.

E-mail: vestnik.pgtu@gmail.com (для надсилання статей).

Зареєстрований Міністерством Юстиції України 21.06.2011 р., Свідоцтво КВ № 17950 – 6800 ПР. Збірник входить до переліку наукових фахових видань (категорія «Б»), в якому можуть публікуватися основні результати дисертаційних робіт, згідно з Наказами Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020, № 886 від 02.07.2020. Видається два рази на рік.

Рекомендовано до друку Вченою Радою ДВНЗ «ПДТУ», протокол № 6 від 24.12.2020 р.

ISSN 2225-6733 (Print), ISSN 2519-271X (Online)

ЗМІСТ

CONTENTS

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**COMPUTER SCIENCE AND
INFORMATION TECHNOLOGY**

Проніна О.І., Юхно Д.В., Альошин С.В.
Розпізнавання облич за допомогою згорнутої нейронної мережі

7

O.I. Pronina, D.V. Yuhno, S.V. Aloshin
Face recognition using a neural network

**П'ятикоп О.Є., Мініна К.Г.,
Безуглов Р.О.**
Формування рекомендацій фільмів на основі гібридного підходу

13

**O.E. Piatykor, K.G. Minina,
R.O. Bezuglov**
A Hybrid approach for movie recommendation

Горбатко І.Д., Григоренко О.Є.
Розробка програмного забезпечення кафедрального веб-сервера для дистанційного викладання курсів з електродвигунів

20

I.D. Horbatko, O.E. Gryhorenko
Development of software of the department web-server for remote teaching of courses on the electric drive

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

APPLIED MECHANICS

Карпенко Т.М., Музика І.М.
До питання про власні частоти поперечних коливань системи «балка-двигун»

28

T.M. Karpenko, I.M. Muzyka
On the question of natural frequencies of transverse vibrations of the «beam-engine» system

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

MATERIALS SCIENCE

**Лещинський А.К., Матвієнко В.М.,
Іванов В.П., Степнов К.К.,
Возьянов Е.І., Карауланов О.В.**
Технологія і обладнання для наплавлення валків гарячої прокатки композиціями підвищеної тріщиностійкості

34

**L.K. Leshchinskiy, V.M. Matvienko,
V.P. Ivanov, K.K. Stepnov,
E.I. Vozyanov, O.V. Karaulanov**
Technology and equipment for hot rolls surfacing with increased crack resistance compositions

**Щетинін С.В., Щетиніна В.І.,
Никитенко П.В., Елсаед Халед,
Коваль О.В.**
Ударна в'язкість при односторонньому високошвидкісному зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей

41

**S.V. Shchetinin, V.I. Shchetinina,
P.V. Nikitenko, Elsaed Khaled,
O.V. Koval**
Impact toughness in one-sided high-speed welding of the pipes for gas and oil pipelines

**Щетинін С.В., Щетиніна В.І.,
Коваль О.В., Никитенко П.В.,
Елсаед Халед**
Підвищення тріщиностійкості при аргонодуговому високошвидкісному наплавленні на низькій погонній енергії

47

**S.V. Shchetinin, V.I. Shchetinina,
O.V. Koval, P.V. Nikitenko,
Elsaed Khaled**
Crack resistance increase in argon arc high-speed welding at low heat input

**Білоник І.М., Береговенко М.М.,
Білоник Д.І., Капустян О.Є.,
Смакограй А.Є., Шумикін С.О.**
Вибір матеріалу і способу зміцнення ударної частини молотків механізму струшування електрофільтрів

52

**I.M. Bilonik, M.M. Berehovenko,
D.I. Bilonik, O.Ye. Kapustian,
A.H. Smakohrai, S.O. Shumikin**
Selection of a material and a hardening method for the impact part of the hammers of the electrostatic precipitators shaking mechanism

МЕТАЛУРГІЯ

METALLURGY

**Чупринов Є.В., Журавльов Ф.М.,
Лялюк В.П., Кассім Д.О.,
Шмельцер К.О.**

*Офлюсовані локальні спеки – огрудкова-
на залізородна моносіровина для сучас-
ної доменної плавки*

**E.V. Chuprinov, F.M. Zhuravlev,
V.P. Lyalyuk, D.O. Kassim,
K.O. Shmeltser**

*Fluxed local cakes – lumped mono-raw ma-
terials for modern blast furnace*

**Радько Н.Г., Чупринов Є.В.,
Лялюк В.П., Коренко М.Г.,
Кривенко В.В.**

*Управління технологічним процесом
конвертерної плавки по розрахунковій
температурі реакційної зони*

**N.G. Rad'ko, E.V. Chuprinov,
V.P. Lyalyuk, M.G. Korenko,
V.V. Krivenko**

*Control of the converter melting technologi-
cal process through the calculated temper-
ature of the reaction zone*

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

**ELECTRICAL ENGINEERING AND
ELECTROMECHANICS**

**Поднебенна С.К., Бурлака В.В.,
Корольов І.С.**

*Розробка лабораторного стенду для ви-
значення характеристик безколектор-
ного двигуна постійного струму*

**S.K. Podnebenna, V.V. Burlaka,
I.S. Korolov**

*Development of a laboratory bench for de-
termining the characteristics of a brushless
dc motor*

**Артеменко А.М., Чорний О.П.,
Данилейко О.К.**

*Стан електромеханічного обладнання
та аналіз режимів роботи тягових
електроприводів кар'єрних електро-
возів*

**A.M. Artemenko, O.P. Chornyj,
O.K. Danyleiko**

*State of electromechanical equipment and
analysis of operating conditions of the trac-
tion electric drive of open-pit electric loco-
motives*

**Поднебенна С.К., Кисляк В.Г.,
Бондарук О.М.**

*Підвищення ефективності системи
електроприводу токарного верстату
на базі перетворювачів частоти*

**S.K. Podnebenna, V.G. Kysliak,
O.M. Bondaruk**

*Improving the efficiency of the electric drive
system of a lathe based on frequency con-
verters*

**Шарейко Д.Ю., Білюк І.С.,
Садовий О.С., Савченко О.В.,
Фоменко А.М., Козаченко А.В.**

Модернізація промислових роботів

**D.Yu. Shareyko, I.S. Biliuk,
O.S. Sadovyy, O.V. Savchenko,
A.M. Fomenko, A.V. Kozachenko**

Modernization of industrial robots

Каракуц І.М.

*Підвищення надійності приводу елект-
рогармати для закриття льотки до-
менної печі*

I.M. Karakuts

*Improving the reliability of the electric gun
drive for closing the taphole of a blast fur-
nace*

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-
ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**AUTOMATION AND COMPUTER-
INTEGRATED TECHNOLOGIES**

Mehdiyeva Almaz Mobil gızı

*Development of virtual measuring equip-
ment for control systems*

114 Mehdiyeva Almaz Mobil gızı

*Development of virtual measuring equip-
ment for control systems*

Митрофанов О.В.

Математична модель для дослідження термічного оброблення залізородних обкотишів на конвеєрній випалювальній машині

120

O.V. Mitrofanov

Mathematic model for research of heat treatment of iron ore pellets on a conveyor roasting machine

МЕТРОЛОГІЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

METROLOGY AND INFORMATION AND MEASURING EQUIPMENT

Allahverdiyeva Nurana Mahyaddin gizi

Determination and diagnosis of construction material quality control problems

130

Allahverdiyeva Nurana Mahyaddin gizi

Determination and diagnosis of construction material quality control problems

БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

BIOMEDICAL ENGINEERING

Кунденко М.П., Руденко А.Ю.

Аналіз сучасних методів обробки зернових за критерієм ефективності

136

M.P. Kundenko, A.Yu. Rudenko

Analysis of modern methods of grain processing according to the efficiency criterion

ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY

Шевченко О.С., Шевченко С.С.

Шляхи удосконалення ущільнень для підвищення експлуатаційної безпеки насосів АЕС

145

O.S. Shevchenko, S.S. Shevchenko

Ways to improve seals to increase operational safety of NPP pumps

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

CIVIL SECURITY

Чеберячко С.І., Чеберячко Ю.І., Дерюгін О.В., Славінський Д.В., Клімов Д.Г.

Фільтрувальний респіратор з примусовою подачею повітря

155

S.I. Cheberyachko, Yu.I. Cheberyachko, O.B. Deryugin, D.V. Slavinskyi, D.G. Klimov

Filtering respirator with forced air supply

Савельєв Д.В., Столбченко О.В., Чеберячко І.М.

Оцінка вмісту надмалих частинок в продуктах руйнування гірських порід насичених поверхнево-активними речовинами

171

D.V. Saveliev, O.V. Stolbchenko, I.M. Cheberiyachko

Evaluation of the ultrafine particles content in the products of destruction of rocks saturated with surfactants

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

RAILWAY TRANSPORT

Кіріцева О.В., Клецька О.В., Іванченко Д.А., Ігнатова А.С.

Модель визначення часу обслуговування вагонів на металургійному комбінаті

180

O.V. Kiritseva, O.V. Kletska, D.A. Ivanchenko, A.S. Ignatova

Model of cars stay time determination at a metallurgical plant

Вихопень І.Р., Клецька О.В., Кіріцева О.В., Сумцов А.Л., Барібін М.А.

Випробування дизельного палива, модифікованого присадкою DFC2020

188

I.R. Vikhopen, O.V. Kletska, O.V. Kiritseva, A.L. Sumtsov, M.A. Baribin

Test of diesel fuel modified by an additive of DFC2020

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

ROAD TRANSPORT

Шаріфов Аллахверді Джамал огли

Фактори, що впливають на зіткнення автомобілів, які рухаються один за одним **197**

Allahverdi Sharifov

Factors influencing the collision of cars moving one after another

Dashdamirov F.S.

Creation of a simulation model of bus traffic in urban routes

205

F.S. Dashdamirov

Creation of a simulation model of bus traffic in urban routes

Симоненко Р.В.

Особливості функціональних можливостей і телематичного забезпечення системи «Колісні транспортні засоби-Інфраструктура» **211**

R.V. Symonenko

Features of functional possibilities and telematic support of the system «Wheeled vehicles-Infrastructure»

ДО УВАГИ АВТОРІВ

217 INTO CONSIDERATION OF AUTHORS

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.896

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226118

© Проніна О.І.¹, Юхно Д.В.², Альошин С.В.³

РОЗПІЗНАВАННЯ ОБЛИЧ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗГОРНУТОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

В статті розглядається тема розпізнавання обличчя за допомогою згорнутої нейронної мережі, яка може на основі проведеного тренування з обмеженою кількістю світлин розпізнати та ідентифікувати людину в реальному часі. В рамках роботи було проведено аналіз наукових публікацій існуючих методів розпізнавання та вилучення об'єктів на зображенні. Виявлено, що використання вже існуючого апарату класифікаторів Хаара має ряд недоліків, тому необхідно покращити та модифікувати цей класифікатор. Були визначені основні критерії, що необхідно модифікувати в стандартному класифікаторі для його покращення. Був виявлений загальний алгоритм для роботи зі зображенням при розпізнаванні. Для реалізації була побудована математична модель нейронної мережі та класифікатора. В експериментальних дослідженнях було проведено навчання нейронної мережі та її тестування на різних варіантах відображення обличчя на світлинах. Для визначення адекватності роботи розробленої згорнутої нейронної мережі було проведено тестування на визначення помилок.

Ключові слова: розпізнавання обличчя, нейронні мережі, алгоритм Хаара.

O.I. Pronina, D.V. Yuhno, S.V. Alosin. Face recognition using a neural network. Modern trends in security and development of information technologies push forward all spheres of human life. The task of isolating a human face in a natural or artificial setting and subsequent identification has always been among the highest priority tasks for researchers working in the field of machine vision systems and artificial intelligence. Besides, the task of recognition is very relevant in the field of security – just as for storing data and so for finding criminals on surveillance cameras, and so on. Besides, all recognition systems use neural networks to improve performance, increase efficiency and facilitate the process itself. However, at present, despite the similarity of the tasks and methods used in the development of alternative systems for biometric identification of a person, such as identification by fingerprints or by the image of the iris, the identification systems by the image of the face are significantly inferior to the above mentioned systems. Therefore, there many perfecting techniques for improving face recognition systems. In the work, an analysis of literary publications, existing algorithms used for face recognition and human identification has been carried out. The main method of face recognition is the use of a convolutional neural network, the selection of objects in the image is carried out using the Viola-Jones method, the AdaBoost machine learning algorithm is used, and the Haar classifier is most often used as a classifier. The article is devoted to the creation of software for face recognition using a convolutional neural network in real time. The software can recognize and identify a person with the head tilted, turned, and under different lighting conditions. In this case, sampling training for the model is car-

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0001-7085-8027, pronina.lelka@gmail.com

² магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

³ ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

ried out on a limited number of photographs. Experimental studies were carried out to test the developed mathematical model and the real-time face recognition algorithm.

Keywords: *face recognition, neural networks, Haar algorithm.*

Постановка проблеми. Розпізнавання обличчя – це прогресивна технологія, що активно використовується в сучасному світі в різних сферах діяльності. Технологія розпізнавання осіб вимагає від штучного інтелекту чималих здібностей, а від розробника – постійного удосконалення алгоритмів. Розпізнавання обличчя вже застосовується в повсякденні, так, наприклад соціальна мережа Facebook вже може визначити ваших друзів на фотографії [1]. Надалі розпізнавання осіб дозволить вгадувати емоції людей, безпомилково вибирати їх на відео і знімках з натовпу, а також знаходити їх в будь-якій точці світу з вуличних відеокамер.

Розпізнавання осіб зазвичай використовується в системах безпеки і може бути порівняне з іншими біометричними системами (наприклад, розпізнавання відбитків пальців або очної діфрагми). Останнім часом воно також стало популярним в якості інструменту комерційної ідентифікації та реклами.

Проблема розпізнавання осіб розглядалася ще на ранніх стадіях комп'ютерного зору. Ряд компаній протягом більше 40 років активно розробляють автоматизовані, а зараз і автоматичні системи розпізнавання людських облич: Smith & Wesson (система ASID – Automated Suspect Identification System); ImageWare (система FaceID); Imagis, Epic Solutions, Spillman, Miros (система Trueface); Vissage Technology (система Vissage Gallery); Visionics (система FaceIt) та тощо.

На даний момент існує велика кількість алгоритмів і методів, які використовуються при розпізнаванні обличчя. У найзагальнішому випадку алгоритм вирішення задачі виявлення та ідентифікації людини по зображенню його особи складається з наступних очевидних кроків: виявлення факту присутності людини на аналізованій сцені; виділення фігури людини; виділення голови; визначення ракурсу спостереження голови (анфас, профіль); виділення особи; порівняння з еталонами і ідентифікація.

Метою даної роботи є використання вже існуючих алгоритмів розпізнавання особи з метою їх удосконалення шляхом додавання нейронної мережі. Розпізнавання обличчя буде відбуватися на основі декількох широко відомих алгоритмів, таких як виділення об'єктів на зображенні Віоли-Джонса, активні моделі зовнішнього вигляду і каскаду Хаара.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технології розпізнавання осіб дозволяють виробляти автоматичний пошук і розпізнавання осіб в графічних файлах і відео потоці. Як зазначено у статті [2], усі системи складаються з трьох програм: основне розпізнавання обличчя; faceId – збереження даних лица; визначення незнайомця – порівняння лица з базою даних.

В роботі [3] представлено підхід до розпізнавання облич на основі комбінованого каскаду нейромережних класифікаторів, методу головних компонент та згорткової нейронної мережі. Наведено результати експериментальних досліджень етапів виявлення, визначення ракурсу та розпізнавання облич порівняно з відомими методами.

В роботі [4] розглянуто використання штучного інтелекту для розпізнавання обличчя у рамках роботи органів правопорядку; вони добиваються 100% точності системи за допомогою спеціальних дерев, які зберігають у собі перелік спеціальних ознак обличчя, потрібних для підвищення точності розпізнавання. Також, автор демонструє позбавлення зображення від шумів, тому що вони заважають у певній мірі досягати точності.

У статті [5] представлений метод розпізнавання осіб з низькою роздільною здатністю, заснований на дискримінантному кореляційному аналізі (DCA). Пропонований метод обчислювально ефективний і може застосовуватися для складних додатків реального часу, таких як розпізнавання декількох осіб, що з'являються в перевантаженому кадрі відеоспостереження.

Аналізуючи існуючі методи, можна визначити загальний алгоритм для роботи зі зображенням при розпізнаванні: необхідно мати на вході максимально якісне зображення обличчя (чи мати можливість покращити його); необхідно знайти обличчя на цьому зображенні; знайти ключові точки на зображенні (точність буде залежати від їх кількості та вірності їх пошуку відносно реального їх місцезнаходження); необхідно знайти усі взаємні відстані між контрольними точками; порівняти отримані дані з раніше отриманими. У даній роботі буде розглянуто всі пункти.

Першочерговим завданням в роботі є використання вже існуючого апарату класифікаторів Хаара [6], при цьому були виявлені основні недоліки, а саме – обмежена кількість точок, що використовуються, для знаходження обличчя та його подальшого розпізнання; обмежена кількість облич, що можуть бути розпізнані; обмеження щодо самих зображень – пошук та розпізнання обличчя задовільно працює лише у тих випадках, коли обличчя знаходиться анфас.

Маючи цю інформацію, було розроблено схему щодо вдосконалення класифікатора Хаара наступним чином: збільшити кількість точок, що використовуються для пошуку та розпізнання обличчя (не тільки положення очей та відстань між ними, положення роту та інші, а й використання брів, контуру обличчя, форми очей, положення носу, ніздрі та інше); покращити розпізнавання обличчя у різних положеннях (не тільки анфас, а й у профіль).

Виклад основного матеріалу. Виділення об'єктів на зображенні здійснюється за методом Віюлі-Джонса [7]. В оригінальній версії алгоритму Віюлі-Джонса використовувалися тільки примітиви без поворотів, а для обчислення значення ознаки сума яскравостей пікселів однієї підобласті віднімалася з суми яркостей іншої підобласті. У розвитку методу були запропоновані примітиви з нахилом на 45 градусів і несиметричних конфігурацій. Також замість обчислення звичайної різниці, було запропоновано приписувати кожній підобласті певне політичне значення і значення ознаки обчислювати як зважену суму пікселів різнотипних областей [8]:

$$\text{feature} = \sum_{i \in I=1, \dots, N} w_i \times \text{RectSum}(r_i). \quad (1)$$

За основу було обрано саме цю функцію (1) обчислення ознак. Спираючись на те, що в роботі використовується алгоритм машинного навчання AdaBoost [9], формула класифікатора набуває вигляду (2):

$$f(x) = \sum_{k=1}^m \alpha_k g_k(x), \quad (2)$$

де α_k та g_k – «слабкі» класифікатори за формулою (1).

Для кожної ознаки слабкий класифікатор визначає оптимальну порогову функцію класифікації, що забезпечує мінімальне число неправильно класифікованих прикладів. Слабкий класифікатор h , таким чином, складається з значень ознаки об'єкта f , порога p і паритету θ , з вказівкою напрямку знаку нерівності. В результаті на кожній ітерації формується простий класифікатор, загальний вид якого наведено у формулі (3):

$$h_j(z) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } p_j f_j(z) < p_j \theta_j \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}, \quad (3)$$

де p_j – значення порога, показує напрямок знаку нерівності; $f_j(z)$ – обчислене значення ознаки; z – вікно зображення розміром 20×20 пікселів.

Кількість ознак є дуже великою, тому обчислити повну безліч ознак є надмірно трудомістким завданням. Було виявлено, що невелика кількість цих ознак може бути об'єднана для формування ефективного класифікатора. Знаходження цих ознак є головним завданням в розробленому алгоритмі. Знаходження ознак відбувається наступним чином. Нехай є набір слабких класифікаторів (4) та кількість ітерацій T :

$$S = \{(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)\}. \quad (4)$$

Далі слід проініціалізувати набір, формула (5):

$$d_n^{(1)} = 1/N, \text{ для всіх } n = 1, \dots, N. \quad (5)$$

Наступним кроком для кожної ітерації ($t = 1, \dots, T$) слід тренувати класифікатор у відношенні до зваженої вибірки $\{S, d^{(t)}\}$, після чого слід обчислити гіпотенузу за формулою (6):

$$h_t: x \rightarrow \{-1, +1\}, h_t = \lambda(S, d^{(t)}). \quad (6)$$

Далі розраховується зважена помилка навчання (7):

$$\varepsilon_t = \sum_{n=1}^N d^{(t)} I(y_n \neq h_t(x_n)). \quad (7)$$

Після чого слід наповнити вибірку новими значеннями (8):

$$\alpha_t = \frac{1}{2} \log \frac{1 - \varepsilon_t}{\varepsilon_t}. \quad (8)$$

Далі оновлюються ваги:

$$d^{(t+1)} = \frac{d_n^{(t)} \exp\{-\alpha_t y_n h_t(x_n)\}}{Z_t} d_n^{(t)}, \quad (9)$$

де Z_t – нормалізована константа, така як $\sum_{n=1}^N d_n^{(t+1)} = 1$.

Після чого необхідно переривати ітерації, якщо виконується умова (10):

$$\epsilon_t=0, \text{ або } \epsilon_t \geq \frac{1}{2} \text{ та } T=t-1. \quad (10)$$

У результаті буде отримано наступний класифікатор:

$$f(x) = \sum_{r=1}^T \frac{\alpha_r}{\sum_{r=1}^T \alpha_r} h_r(x). \quad (11)$$

Для класифікації зображень при розпізнаванні використовується згорнута нейронна мережа. Накладаються обмеження на мережу: швидкість відповіді – не більше 1 секунди; точність розпізнавання – не менше 70%. Загальна топологія мережі наведена на рис. 1.

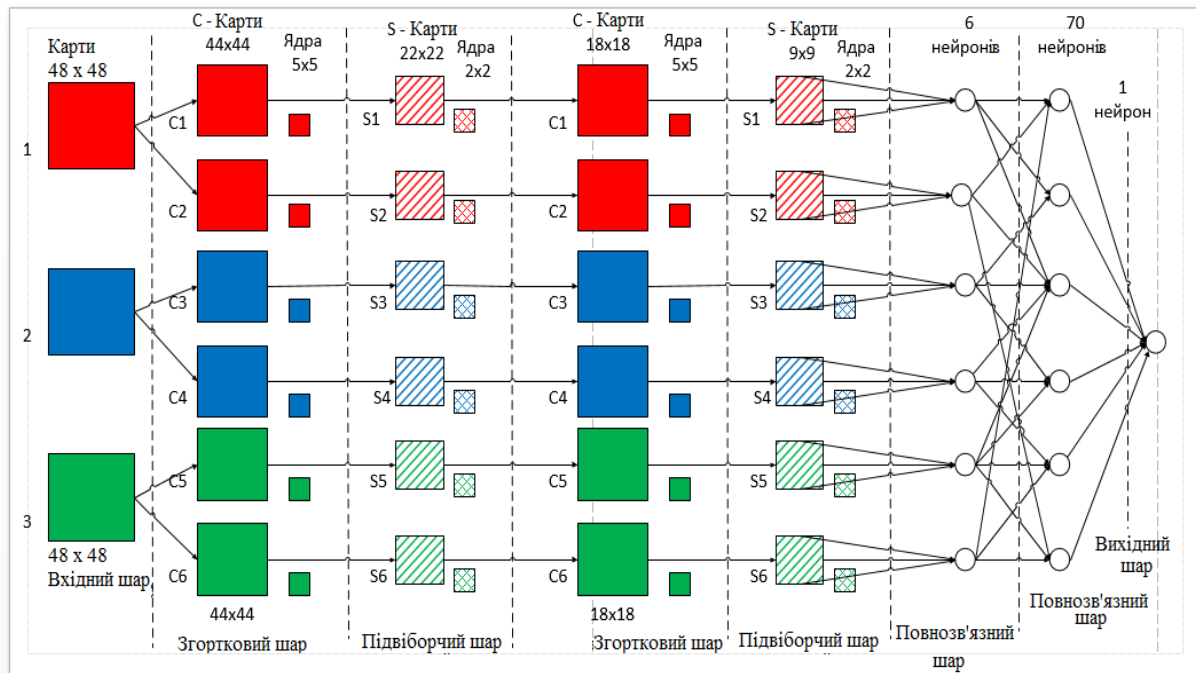


Рис. 1 – Топологія згорнутої нейронної мережі

Вхідні дані являють собою кольорові зображення типу JPEG, розміром 48×48 пікселів. Якщо розмір буде занадто великий, то обчислювальна складність підвищиться, відповідно, обмеження на швидкість відповіді будуть порушені, визначення розміру в даній задачі вирішується методом підбору. Якщо вибрати розмір занадто маленький, то мережа не зможе виявити ключові ознаки осіб. Кожне зображення розбивається на 3 канали: червоний, синій, зелений. Таким чином виходить 3 зображення розміром 48×48 пікселів.

Одним з етапів розробки нейронної мережі є вибір функції активації нейронів. Вид функції активації багато в чому визначає функціональні можливості нейронної мережі і метод навчання цієї мережі. У даній роботі в якості функції активації в прихованих і вихідному шарах застосовується гіперболічний тангенс, в згортальних шарах застосовується ReLU.

Був проведений експеримент для перевірки розробленої нейронної мережі. Для проведення експерименту на першому етапі було проведено налаштування розробленої згорнутої нейронної мережі; для цього до нейронної мережі було завантажено світліну зі зображенням двадцяти трьох людей. Далі відбувалось тренування нейронної мережі, щоб покращити показник визначення обличчя на світліні. Після того, як нейронна мережа розпізнала всі обличчя, вона була готова для подальшого використання, приклад рис. 2. Також ця світліна була завантажена для перевірки на стандартному класифікаторі Хаара.

Стандартний класифікатор Хаара на світліні з рис. 2 зміг знайти лише 10 облич, оскільки деякі обличчя є в нахилі чи перекриті іншими обличчями. Тобто розроблений класифікатор прокрашує результати визначення облич.

Для визначення адекватності роботи розробленої згорнутої нейронної мережі було проведено тестування на визначення помилок. Існує два види помилок: помилки першого роду та

помилки другого роду. Помилки першого роду – це коли об’єкту не має на цій світліні, а мережа його там розпізнає, та помилки другого роду – коли об’єкт є на світліні, а нейронна мережа його не розпізнає.



Рис. 2 – Налаштована нейронна мережа, що знайшла обличчя

Для розрахунку помилок першого роду використовується формула (12), для розрахунку помилок другого роду, використовується формула (13) [10].

$$d_{\alpha} = 1 - \sum_{i=k}^n S_n^i (1-\alpha)^i \cdot \alpha^{n-i}; \tag{12}$$

$$d_{\beta} = \sum_{i=k}^n S_n^i (1-\beta)^{n-i} \cdot \beta^i; \tag{13}$$

де α – помилки першого роду; β – помилки другого роду; d_{α} – ймовірності помилок першого роду, відмова більш, ніж $(n-k)$ -показників; S_n^i – ситуація, яка виникла; k – кількість показників, яка необхідна для коректної роботи; i – номер поточного показника; n – можлива загальна кількість показників в системі.

Для цього було сформовано три різних вибірки. Вибірki були сформовані випадковим чином та мають де окремі світліни людей, де групові світліни. В кожній вибірці своя кількість об’єктів, що треба класифікувати, та кількість класів, до яких їх слід віднести. Вибірka 3 має більшу кількість об’єктів та класів та має не зовсім точні обличчя та перехрестя обличч, тим самим вона завідомо більш складніша. Навчання відбувалось для всіх трьох вибірок. Графічні результати дослідження наведені на рис. 3.

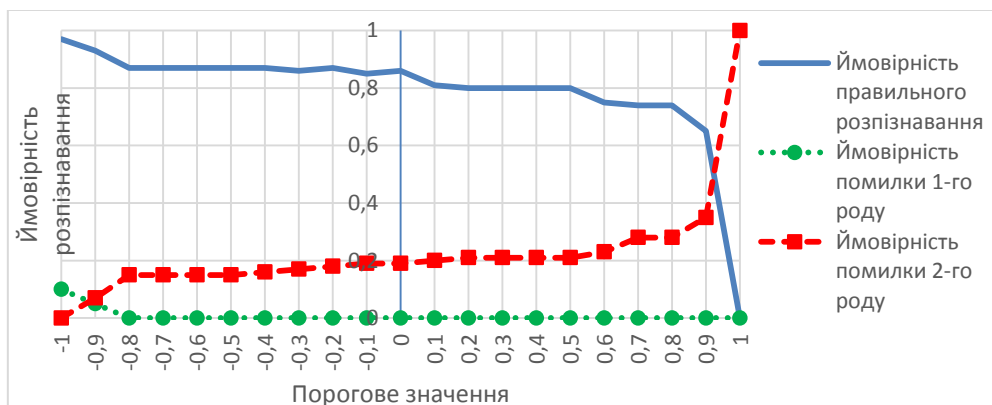


Рис. 3 – Залежність достовірності розпізнавання обличчя від порогу згорнутої нейронної мережі для вибірки

Результати дослідження, наведені на рисунку 3, демонструють, що при більш складних зображеннях результати розпізнавання є менш точнішими та ймовірність виявлення помилок як першого так і другого роду зростає.

Висновки

Робота є актуальною, оскільки на сьогоднішній день питання ідентифікації використовується в багатьох сферах як засіб безпеки, ідентифікації при використанні пристроїв, тощо. В статті були розглянуті основні методи розпізнавання обличчя.

На основі проведеного літературного огляду було вирішено розробляти нейронну мережу для розпізнавання та ідентифікації обличчя в режимі реального часу на основі класичних алгоритмів. Для цього було покращено існуючий класифікатор Хаара та удосконалено методи верифікації обличчя-кандидатів. Метод базується на властивості згорнутої нейронної мережі, що дозволяє обробляти вхідне зображення за один етап і формувати навчальну вибірку згорнутої нейронної мережі, що використовує параметричну адаптацію структури активної навчальної вибірки. Запропоновано враховувати ракурс обличчя при розпізнаванні. Було розроблено програмний продукт та експериментально досліджено, що алгоритм ідентифікації та класифікації обличчя з використанням згорнутої нейронної мережі та покращеного класифікатора працює достовірно.

Розроблена система вирішує найрозповсюдженіші проблеми розпізнавання обличчя, такі як чутливість до зашумленого фону, чутливість до освітлення, відмінного від того, що було присутнє на навчальній вибірці, нестійкість до присутності декількох людей на зображенні.

Розроблене програмне забезпечення можна використовувати в реальному часі, здійснювати ідентифікацію обличчя, тобто використовувати в системах безпеки як дешифратор ключа, оснований на розпізнаванні володаря мобільного пристрою, тощо. Такий підхід збільшить надійність систем, що розробляються зі графічним ключом, та може бути використаний в будь-якій сфері.

Перелік використаних джерел:

1. Facebook's facial recognition now looks for you in photos you're not tagged in [Electronic resource]: [Website]. – Electronic data. – Mode of access: <https://www.theverge.com/facebook-facial-recognition-tagging-photos>.
2. Andrew Heinzman. How Does Facial Recognition Work? [Electronic resource]: [Website]. – Electronic data. – Режим доступу: <https://www.howtogeek.com/427897/how-does-facial-recognition-work/>.
3. Палій І.О. Нейромережний підхід до комп'ютерного розпізнавання обличчя / І.О. Палій, А.О. Саченко, С.Г. Антошук, Т.О. Бурак // Штучний інтелект. – 2010. – № 3. – С. 378-387.
4. Error Rates in Users of Automatic Face Recognition Software / D. White, J.D. Dunn, A.C. Schmid, R.I. Kemp // PLOS ONE. – 2015. – Vol. 10(10). – Pp. 1-14. – Mode of access: [DOI: 10.1371/journal.pone.0139827](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139827).
5. Haghghat M. Low Resolution Face Recognition in Surveillance Systems Using Discriminant Correlation Analysis / M. Haghghat, M. Abdel-Mottaleb // 12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2017). – 2017. – Pp. 912-917. – Mode of access: [DOI: 10.1109/FG.2017.130](https://doi.org/10.1109/FG.2017.130).
6. Cootes T. Active appearance models / T. Cootes, G. Edwards, C. Taylor // Proceedings of the European Conference on Computer Vision. – 1998. – Vol. 2. – Pp. 484-498.
7. Convolutional Neural Networks for Visual Recognition [Electronic resource]: [Website]. – Electronic data. – Mode of access: <https://www.cs231n.github.io>.
8. Pat. 2002/0102024A1 US, Int. Cl. G 06 K 9/62. Method and system for object detection in digital images / M.J. Jones, P. Viola. – № 09/992,795; filed 12.11.2001; pub. date 01.08.2002. – 19 p.
9. Boosting and AdaBoost for Machine Learning [Electronic resource]: [Website]. – Electronic data. – Mode of access: <https://machinelearningmastery.com/boosting-and-adaboost-for-machine-learning/>.
10. Каргин А.А. Введение в интеллектуальные машины. Кн. 1. Интеллектуальные регуляторы / А.А. Каргин. – Донецк : Норд-Пресс, ДонНУ, 2010. – 526 с.

References:

1. Facebook's facial recognition now looks for you in photos you're not tagged in Available at: <https://www.theverge.com/facebook-facial-recognition-tagging-photos> (accessed 15 June 2020).
2. Andrew Heinzman. How Does Facial Recognition Work? Available at:

- <https://www.howtogeek.com/427897/how-does-facial-recognition-work/> (accessed 10 June 2020)
3. Paliy I.O., Sachenko A.O., Antoshchuk S.H., Burak T.O. Neyromerezhnyi pidkhdid do komp'yuternoho rozpiznavannya oblych [Neural network approach to computer facial recognition]. *Shtuchnyy intelekt – Artificial Intelligence*, 2010, no. 3, pp. 378-387.
 4. White D., Dunn J.D., Schmid A.C., Kemp R.I. Error Rates in Users of Automatic Face Recognition Software. *PLOS ONE*, 2015, vol. 10 (10), pp. 1-14. doi: 10.1371/journal.pone.0139827.
 5. Haghghat M., Abdel-Mottaleb M. Low Resolution Face Recognition in Surveillance Systems Using Discriminant Correlation Analysis. *12th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2017)*, 2017, pp. 912-917. doi: 10.1109/FG.2017.130.
 6. Cootes T., Edwards G., Taylor C. Active appearance models. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, 1998, vol. 2, pp. 484-498.
 7. Convolutional Neural Networks for Visual Recognition Available at: [https://www/cs231n.github.io](https://www.cs231n.github.io) (accessed 10 August 2020).
 8. Viola P., Jones M.J. Method and system for object detection in digital images. Patent 2002/0102024A1, 2002.
 9. Boosting and AdaBoost for Machine Learning Available at: <https://machinelearningmastery.com/boosting-and-adaboost-for-machine-learning/> (accessed 20 July 2020).
 10. Kargin A.A. *Vvedeniye v intellektual'nyye mashiny. Kniga 1. Intellektual'nyye regulatory* [Introduction to intelligent machines. Book 1. Intellectual regulators]. Donetsk, Nord-Press, DonNU Publ., 2010. 526 p. (Rus.)

Рецензент: О.Є. П'ятикоп
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 15.11.2020

УДК 004.78

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226119

© П'ятикоп О.Є.¹, Мініна К.Г.², Безуглов Р.О.³

ФОРМУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ФІЛЬМІВ НА ОСНОВІ ГІБРИДНОГО ПІДХОДУ

Стаття присвячена темі створення системи рекомендацій, яка зможе проаналізувати дані, отримані від користувача про вподобання фільмів та використати їх для прогнозування нових рекомендацій. В рамках роботи було проведено аналіз наукових видань, існуючих методів та алгоритмів, які використовуються для побудови системи рекомендацій та їх гібридизацію. Визначено, що гібридизація може бути досягнута різними підходами завдяки поєднанню декількох алгоритмів. Об'єднання методів для вирішення проблеми в більшості випадків дає більш ефективні і точні результати. Для реалізації гібридного підходу обрано два метода: фільтрацію на основі вмісту та спільну (колаборативну) фільтрацію, кожен з яких відповідає певному сценарію рекомендацій. У експериментальних дослідженнях було випробувано здатність системи запропонувати фільми, спираючись на дані про подібність користувачів. Подібність користувачів розраховувалась на основі вимірювання ступеня лінійної залежності – коефіцієнт кореляції Пірсона.

Ключові слова: рекомендаційна система, колаборативна фільтрація, контентна фільтрація, схожість елементів.

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-7731-3051, pee_pstu@ukr.net

² магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

³ магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

O.E. Piatykor, K.G. Minina, R.O. Bezuglov. A Hybrid approach for movie recommendation. The rapid growth in the amount of digital information available and in the number of Internet users has created a potential problem of information overload and quick access to the items that may interest the users. Therefore, there arises a necessity to filter, prioritize and effectively deliver relevant information to the users. Recommendation systems solve this problem through searching for dynamically generated information to provide the users with personalized content and services. From a large amount of data, recommendation systems filter information according to personal preferences, interests, or user behavior as to an item. Recommendation systems have become a big attraction through which web portals attract the attention of their users. This article explores different characteristics and potentials of various forecasting methods in recommendation systems. Within the scope of the work, an analysis of scientific publications, existing methods and algorithms that are used to make up a system of recommendations and their hybridization have been carried out. Hybridization can be achieved by various approaches combining different algorithms. Combining multiple methods to solve a problem is more efficient and gives more accurate results in most cases. To implement the hybrid approach, two effective methods have been chosen; they are: content-based filtering and collaborative filtering, each of which corresponds to a specific recommendation scenario. The article is devoted to creating a recommendation system that can analyze the data received from the user as to preferences or descriptions of films and use them to predict new recommendations. Pilot studies tested the system's ability to suggest items based on the users' similarity data. Users' similarity was calculated from the measurement of Pearson's correlation coefficient.

Keywords: recommendation systems, collaborative filtering, content-based filtering, hybrid filtering technique.

Постановка проблеми. Обсяг інформації у всесвітній павутині постійно збільшується. Кожен день людина стикається з вибором і безліччю варіантів: який фільм подивитись, який телефон купити, яку книгу прочитати. Розміри просторів цих рішень часто об'ємні: ресурс Лібрарекс представляє майже 270 000 книг і кожен місяць більше 5000 оновлень [1], а Amazon.com має більше 410 000 найменувань продуктів тільки в Kindle Store. Підтримка прийняття рішення в інформаційних просторах такого масштабу є серйозною проблемою. Тому, щоб допомогти користувачеві знайти необхідну інформацію, інтенсивно використовуються рекомендаційні системи. Рекомендаційні системи можна розглядати як засоби передбачення уподобань користувачів, на основі даних про їх враження, зацікавленість чи інтереси. Використання таких систем дозволяє інтернет-магазинам прискорити прибуток, любителям музики відкрити нових, невідомих їм раніше виконавців, тощо. Тому, з точки зору електронної комерції, рекомендаційна система визначена як інструмент, що допомагає користувачам отримувати контент, який їх може зацікавити [2-3].

На даний момент існує велика кількість алгоритмів і методів, які використовуються при створенні якісної рекомендаційної системи [2-10]. До переліку основних підходів, які використовуються в системах рекомендацій, відносяться [4-6]:

- методи та моделі, що засновані на описі елементів контенту (content-based);
- методи та моделі, що використовують схожість об'єктів на основі матриці оцінок (collaborative filtering);
- методи та моделі, що засновані на знаннях про предметну область, а не про кожен об'єкт (knowledge-based);
- гібридні методи (hybrid).

На рисунку 1 показана анатомія різних методів фільтрації рекомендацій [2]. Кожний алгоритм не є ідеальним та має свої слабкі сторони, що створює прогалини в рекомендаціях, наприклад, для нових користувачів.

Використання декількох методів рекомендації може усунути слабкі місця окремого методу в комбінованій моделі. Ідея гібридних методів полягає в тому, що комбінація алгоритмів дасть більш точні і ефективні рекомендації, ніж один алгоритм, оскільки недоліки одного алгоритму можуть бути подолані іншим алгоритмом. Гібридність – це підхід до нейтралізації недоліків окремо взятих алгоритмів.

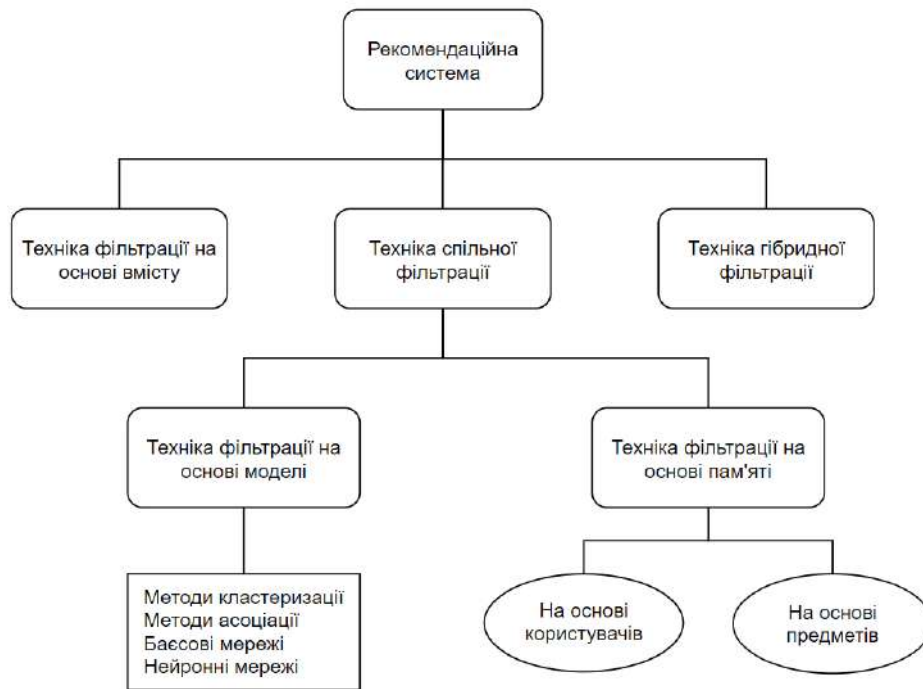


Рис. 1 – Рекомендаційні методи

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний момент системи рекомендацій дуже розповсюджені і затребувані, адже це приваблює відвідувачів сайту, що прямо пропорційно впливає на прибуток сайту.

Існує велика кількість наукових публікацій, пов'язаних з рекомендаційними системами. Широке дослідження проведено автором в роботі [2]. Ця стаття досліджує різні характеристики та потенціали різних методів прогнозування в системах рекомендацій. В ній зазначено, що доцільно все ж використовувати гібридну фільтрацію, яка поєднує два або більше методів фільтрації різними способами для підвищення точності та продуктивності рекомендованих систем. Добрі результати показує поєднання підходів спільної (колаборативної) фільтрації та фільтрації на основі вмісту (контентної фільтрації).

Автор роботи [4] також вважає, що вдалим є гібридний алгоритм, що базується на колаборативній фільтрації та content-based-алгоритмах. Дослідженню методів побудови рекомендаційних систем у мережі Інтернет також присвячені роботи [3, 6]. Метою цих робіт є пошук схожих товарів або схожих клієнтів для подальшого формування рекомендації товарів або послуг. Автори приділяють увагу методам контентної та колаборативної фільтрації. В роботі [6] перспективним визначили гібридний підхід на основі алгоритмів машинного навчання та з врахуванням контексту.

Успішне поєднання різних методів формування рекомендацій отримали автори [8] для підбору теми новин, що відображається на першій сторінці Bing. В своїй роботі вони запропонували підхід до спільної фільтрації на основі вмісту (CCF), що поєднав як підхід до фільтрування за вмістом, так і підхід до спільної фільтрації. Автори виявили наступне поєднання. З одного боку, CCF дає рекомендації, виходячи з насиченого контексту новин. З іншого боку, CCF спільно аналізує мізерні відгуки користувачів довгих хвостів. Використання такого підходу продемонструвало значні успіхи у залученні користувачів. В роботі [9] також розроблено гібридний метод пошуку груп користувачів для рекомендації супутніх та додаткових продажів.

Таким чином, підтверджено, що об'єднання декількох методів для вирішення проблеми дає ефективні результати. Отже, з метою побудови рекомендаційної системи для користувачів сайту для перегляду фільмів вирішено використати гібридний метод на основі алгоритмів контентної та спільної фільтрації.

Метою даної роботи є побудова рекомендаційної системи для користувачів сайту для перегляду фільмів на основі гібридного підходу.

Виклад основного матеріалу. Основна ідея спільної (колаборативної) фільтрації заснована на подібності вподобань користувачів [4, 7-9]. Математичний опис для прив'язки різних елементів моделей рекомендаційних систем наступний. Визначимо, що маємо множини з користувачами $u \in U$, елементів – $i \in I$ та активні дії користувачів – $(r_{u,i}, u, i, \dots) \in D$. Активність задається результатом: $r_{u,i}$ – оцінка користувача u для елемента i ; r_u – вектор всіх оцінок користувача u ; r_i – вектор всіх оцінок елемента i ; \bar{r}_u та \bar{r}_i – середні значення оцінок користувача u та елемента i , відповідно; $\hat{r}_{u,i}$ – рекомендаційний прогноз.

Для реалізації спільної фільтрації для рекомендаційного прогнозу використовується розрахунок з урахуванням середніх оцінок схожих користувачів:

$$\hat{r}_{u,i} = \frac{\sum_{j \in S} S_{i,j} \cdot r_{u,j}}{\sum_{j \in S} |S_{i,j}|}, \quad (1)$$

де S – множина елементів, найбільш близьких до об'єкта, $S_{i,j}$ – міра близькості кожного елемента j до елемента i .

При цьому визначається сума добутку схожості користувача на його оцінку за всіма найбільш схожими користувачами.

Для вимірювання міри близькості обрано коефіцієнт кореляції Пірсона [10]:

$$S_{i,j} = \frac{\sum_{u \in U} (r_{u,i} - \bar{r}_i)(r_{u,j} - \bar{r}_j)}{\sqrt{\sum_{u \in U} (r_{u,i} - \bar{r}_i)^2} \sqrt{\sum_{u \in U} (r_{u,j} - \bar{r}_j)^2}}. \quad (2)$$

Цей показник розраховує ступінь лінійної залежності між значеннями. Значення коефіцієнту є від -1 до 1. Якщо наближене до 1 показує, що залежність між значеннями лінійна, це означає зростання параметрів. Якщо навпаки, прямує до -1, значення знаходяться на прямій, що означає зменшення першого значення при збільшенні другого.

В статті [2] описується алгоритм фільтрації на основі контенту, в якому моделі засновані на описі елементів. Прогнозування інтересів користувача u щодо елемента i обчислюється за формулами:

$$\hat{r}_{u,i} = b_{u,i} + \rho_u^T (q_i + \eta), \quad (3)$$

$$b_{u,i} = \mu + b_u + b_{i,\eta} = |N(\theta, i)|^{-\frac{1}{2}} \sum_{j \in N(\theta, i)} \theta_{j,i} Y_j, \quad (4)$$

де θ – міра подібності між двома предметами.

В системі рекомендацій θ вимірює схожість між двома великими сумами контекстів (два набори документів).

Тепер необхідно змоделювати приховану особливість товару i за формулою (5). Використовуємо вектор елемента q_i для представлення прихованої ознаки від самого елемента i , а прихований вектор ознак доповнюється зваженою сумою:

$$q_i + |N(\theta, i)|^{-\frac{1}{2}} \sum_{j \in N(\theta, i)} \theta_{j,i} Y_j. \quad (5)$$

Параметри моделі, пов'язані з правилом прогнозування в формулі (6), вивчаються шляхом вирішення регуляризованої задачі найменших квадратів. Оцінюються параметри моделі, мінімізуючи регуляризовану квадратичну функцію похибки за допомогою стохастичного градієнтного спуску.

$$\min_{b_*, p_*, q_*, y_*} \sum_{(u,i)} ((r_{u,i} - \mu - b_u - b_i - p_u(q_i + \eta))^2 + \lambda_1 b_u^2 + \lambda_2 b_i^2 + \lambda_3 \|p_u\|^2 + \lambda_4 \|q_i\|^2 + \lambda_5 \sum_{j \in N(\theta, i)} \|Y_j\|^2), \quad (6)$$

$$b_u \leftarrow b_u + \gamma_1(e_{u,i} - \lambda_1 b_u); \quad b_i \leftarrow b_i + \gamma_2(e_{u,i} - \lambda_2 b_i),$$

$$p_u \leftarrow p_u + \gamma_3(e_{u,i}(q_i + \eta) - \lambda_3 p_u); \quad q_i \leftarrow q_i + \gamma_4(e_{u,i} p_u - \lambda_4 q_u),$$

$$e_{u,i} = r_{u,i} + \hat{r}_{u,i},$$

$$\forall_j \in h(A,i): y_i \leftarrow y_i + \gamma_5(e_{u,i} p_u |N(\theta,i)|^{-\frac{1}{2}} \theta_{j,i} - \lambda_5 y_j),$$

де λ_* – константи регуляризації; γ_* – константи для розміру кроку.

На основі описаних методів була розроблена гібридна система рекомендацій. Вона містить модулі розрахунку якості рекомендацій та схожості користувачів, засоби побудови матриць для представлення даних про користувачів та фільми, для зручності проведення операцій над інформацією. Також наявний блок завантаження необхідних даних. Щоб система могла розпочати роботу, необхідно надати їй усі необхідні дані, а саме:

- рейтинги фільмів з оцінками користувачів;
- характерні дані про сам контент (теги, опис фільмів та інше).

Цей процес відбувається так: з інтерфейсу надходять дані про конкретного користувача у вигляді ідентифікатора. Далі за цією інформацією надходить запит до бази даних (БД), де за ідентифікатором отримуємо перелік з його оцінок та переглядів. Далі в БД отримуємо оцінки всіх користувачів системи, будуємо матрицю з отриманих параметрів, де розраховуємо вектор схожості з іншими користувачами на основі оцінок. Тим самим отримуємо перелік користувачів, які вважаються схожими на нашого конкретного користувача. Наступним кроком отримуємо перелік матеріалів, які оцінили подібні користувачі. У цьому переліку фільтруємо інформацію і отримуємо в результаті контент, який може зацікавити нашого користувача.

За подібним алгоритмом можна отримати контент на основі контенту. Цей процес відбувається за так: з інтерфейсу надходять дані про конкретний фільм, також у вигляді ідентифікатора. За ідентифікатором отримуємо перелік з його оцінок для більш детальної інформації. У нашому випадку це перелік тегів, до якого відноситься даний елемент. Далі в БД отримуємо теги усіх фільмів системи, будуємо матрицю з отриманих параметрів, де розраховуємо їх вектор схожості, на основі того, що деякий набір має збіги з іншими подібними наборами. Тим самим отримуємо перелік фільмів, які вважаються схожими на елемент, обраний нами на початку. У цьому переліку фільтруємо інформацію і отримуємо в результаті контент, який може зацікавити користувача.

Тестування прототипу системи проходило на основі розрахунків коефіцієнта схожості користувачів. В якості вхідних використовувалися таблиці бази даних з оцінками та їх даними, таблиці з даними про фільми. Результати наведені в таблиці. Графік зображено на рисунку 2.

Таблиця

Схожі користувачі

Коефіцієнт кореляції Пірсона	ID Користувача	Кількість співпавших фільмів	Кількість співпавших оцінок	Ваги оцінок
0.900975	55940	9	7	0.93
0.856614	170293	11	8	0.78
0.848065	137096	7	6	0.89
0.840172	115715	9	7	0.51
0.802868	20589	10	8	0.89
0.800049	79362	7	7	0.61
0.785674	52145	12	5	0.93
0.746093	5626	8	4	0.76
0.733768	101240	13	7	0.96
0.730644	151869	6	5	0.75
0.725388	263685	10	5	0.8
0.716077	10422	11	3	0.85

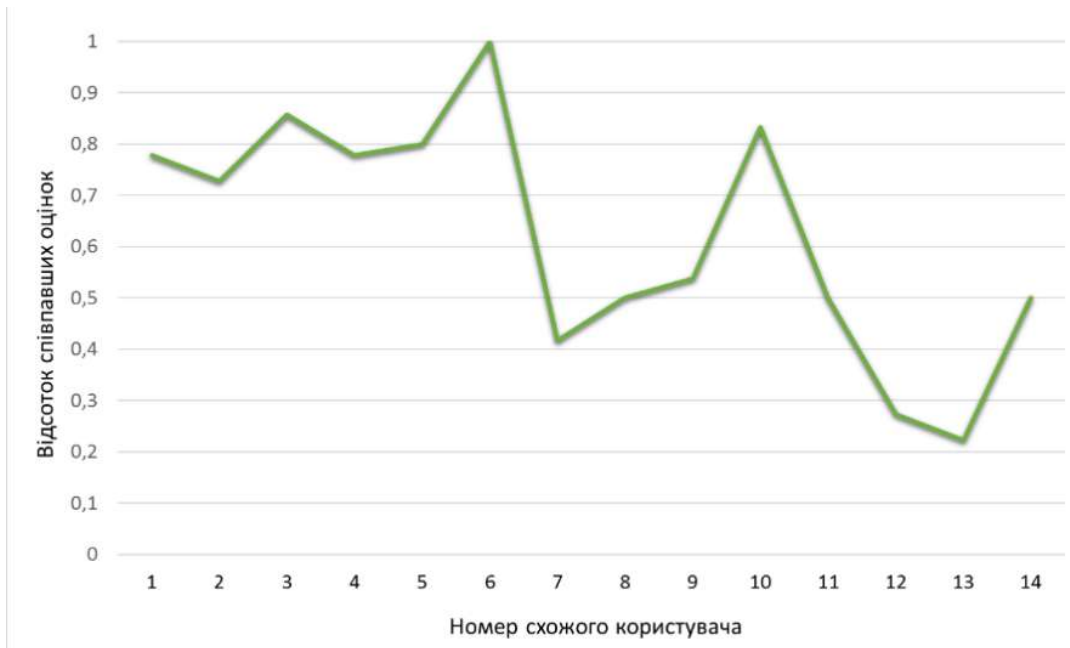


Рис. 2 – Графік результатів експерименту

Висновки

Робота є актуальною, оскільки на даний час досі існує проблема інформаційного перевантаження, що перешкоджає пошуку необхідного контенту для користувачів, та проблема пріоритетності і персоналізації, яку також вирішує система рекомендацій.

В даній статті було розглянуто існуючі методи побудови систем рекомендацій та можливі алгоритми. В результаті аналізу наукових джерел було прийнято рішення побудувати рекомендаційну систему на основі гібридного підходу з використанням алгоритмів контентної та колаборативної фільтрації. Було розроблено прототип рекомендаційної системи для користувачів сайту для перегляду фільмів. Проведено ряд експериментів роботи системи в напрямку пошуку подібності користувачів за їх вподобаннями. В результаті експериментів було виявлено параметри, які впливають на процес рекомендацій: кількість наявних оцінок користувача, схожі оцінки до конкретних фільмів; вага оцінок; об'єм відомостей про елементи рекомендацій; релевантність даних.

Дану реалізацію гібридного підходу можна застосувати в програмних засобах типу блогів, інтернет-магазинів, медіа- та відео-порталів, книг, статей, ігор, фотокарток, соціальних мереж, новинних порталів та інших системах з наявністю елементів, які можна пропонувати користувачам.

Перелік використаних джерел:

1. Либрусек – много книг [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: www.librusec.pro. – Назва з екрану.
2. Isinkaye F.O. Recommendation systems: Principles, methods and evaluation / F.O. Isinkaye, Y.O. Folajimi, B.A. Ojokoh // Egyptian informatics journal. – 2015. – Vol. 16 (3). – Pp. 261-273. – Mode of access: DOI: [10.1016/j.eij.2015.06.005](https://doi.org/10.1016/j.eij.2015.06.005).
3. Чередніченко О.Ю. Моделі формування рекомендацій у інтелектуальних системах електронної комерції / О.Ю. Чередніченко, О.В. Янголенко, О.В. Іващенко, О.М. Матвеев // Системи обробки інформації. – 2020. – № 1 (160). – С. 32-39. – Mode of access: DOI: [10.30748/soi.2020.160.04](https://doi.org/10.30748/soi.2020.160.04).
4. Мазурік О.Ю. Покращення результатів роботи рекомендаційних систем за допомогою алгоритму SVD / О.Ю. Мазурік // International scientific journal. – 2015. – № 9. – С. 61-64. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnj_2015_9_16.
5. Aggarwal C.C. Recommender Systems: The Textbook / C.C. Aggarwal. – New York : Springer International Publishing, 2017. – 498 p.

6. Мелешко Є.В. Дослідження методів побудови рекомендаційних систем в мережі інтернет / Є.В. Мелешко, С.Г. Семенов, В.Д. Хох // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ, 2018. – Т. 1 (47). – С. 131-136. – Mode of access: [DOI: 10.26906/SUNZ.2018.1.131](https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.1.131).
7. Thorat P.B. Survey on collaborative filtering, content-based filtering and hybrid recommendation system / P.B. Thorat, R.M. Goudar, S. Barve // International Journal of Computer Applications. – 2015. – № 110 (4). – Pp. 31-36. – Mode of access: [DOI: 10.5120/19308-0760](https://doi.org/10.5120/19308-0760).
8. Content-based collaborative filtering for news topic recommendation / Z. Lu, Z. Dou, J. Lian, X. Xie, Q. Yang // Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI'15). – AAAI Press, 2015. – Pp. 217-223.
9. Лобур М.В. Моделі і методи прогнозування рекомендацій для колаборативних рекомендаційних систем / М.В. Лобур, М.Є. Шварц, Ю.В. Стех // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Інформаційні системи та мережі». – Львів, 2018. – № 901. – С. 68-75.
10. Ly A. Analytic posteriors for Pearson's correlation coefficient / A. Ly, M. Marsman, E.J. Wagenmakers // Statistica Neerlandica. – 2018. – Vol. 72 (1). – Pp. 4-13. – Mode of access: [DOI: 10.1111/stan.12111](https://doi.org/10.1111/stan.12111).

References:

1. Librusek – mnogo knig (Librusek – many books) Available at: www.librusek.pro (accessed 20 June 2020). (Rus.)
2. Isinkaye F.O., Folajimi Y.O., Ojokoh B.A. Recommendation systems: Principles, methods and evaluation. *Egyptian informatics journal*, 2015, vol. 16 (3), pp. 261-273. doi: [10.1016/j.eij.2015.06.005](https://doi.org/10.1016/j.eij.2015.06.005).
3. Cherednichenko O.Yu., Yanholenko O.V., Ivashchenko O.V., Matvyeyev O.M. Modeli formuvannya rekomendatsiy u intelektual'nykh systemakh elektronnoyi komertsiyi [Models of formation of recommendations in intellectual systems of electronic commerce]. *Systemy obrobky informatsiyi – Information processing systems*, 2020, no. 1 (160), pp. 32-39. doi: [10.30748/soi.2020.160.04](https://doi.org/10.30748/soi.2020.160.04). (Ukr.)
4. Mazurik O.Yu. Pokrashchennya rezul'tativ roboty rekomendatsiynykh system za dopomohoyu alhorytmu SVD [Improving the results of recommendation systems using the SVD algorithm]. *International scientific journal*, 2015, no. 9, pp. 61-64. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnj_2015_9_16. (Ukr.)
5. Aggarwal C.C. Recommender Systems: The Textbook. New York, Springer International Publ., 2017. 498 p.
6. Meleshko Ye.V., Semenov S.H., Khokh V.D. Doslidzhennya metodiv pobudovy rekomendatsiynykh system v merezhi internet [Research of methods for building recommendation systems on the Internet]. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv'yazku – Control, navigation and communication systems*, 2018, vol. 1 (47), pp. 131-136. doi: [10.26906/sunz.2018.1.131](https://doi.org/10.26906/sunz.2018.1.131). (Ukr.)
7. Thorat P.B., Goudar R.M., Barve S. Survey on collaborative filtering, content-based filtering and hybrid recommendation system. *International Journal of Computer Applications*, 2015, no. 110 (4), pp. 31-36. doi: [10.5120/19308-0760](https://doi.org/10.5120/19308-0760).
8. Lu Z., Dou Z., Lian J., Xie X., Yang Q. Content-based collaborative filtering for news topic recommendation. *Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI'15)*, 2015, pp. 217-223.
9. Lobur M.V., Shvarts M.Ye., Stekh Yu.V. (2018) Modeli i metody prohnouzuvannya rekomendatsiy dlya kolaboratyvnykh rekomendatsiynykh system [Models and methods of forecasting recommendations for collaborative recommendation systems]. *Visnyk Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politekhnika» «Informatsiyni systemy ta merezhi» – Journal of Lviv Polytechnic National University «Information Systems and Networks»*, 2018, no. 901, pp. 68-75. (Ukr.)
10. Ly A., Marsman M., Wagenmakers E.J. Analytic posteriors for Pearson's correlation coefficient. *Statistica Neerlandica*, 2018, vol. 72 (1), pp. 4-13. doi: [10.1111/stan.12111](https://doi.org/10.1111/stan.12111).

Рецензент: І.В. Федосова
д-р пед. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 08.08.2020

**РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КАФЕДРАЛЬНОГО
ВЕБ-СЕРВЕРА ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИКЛАДАННЯ КУРСІВ З
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ**

У даній статті розглядається можливість реалізації невеликого веб-сервера, основним завданням якого являється надання доступу до кафедральних навчальних курсів з електроприводу з подальшою можливістю їх накопичення та редагування. Середовищем розробки для веб-додатку був мікрофреймворк Flask для створення веб-додатків на мові програмування Python. Flask класифікується як мікрофреймворк, тому що не вимагає певних інструментів або бібліотек, свідомо надаючи свободу вибору розробнику який функціонал реалізовувати в своєму додатку, підтримуючи розширення, які можуть додавати функції програми, як якщо б вони були реалізовані в самому Flask. Цей функціонал реалізується за допомогою набору розширень, які за бажанням можна встановити у мікрофреймворк таким чином, як якщо б вони були реалізовані в самому Flask. У веб-додатку були реалізовані наступні функції: система реєстрації користувачів, надавання ролі для викладачів, адміністративна сторінка для викладачів та два види файлового менеджера як для звичайних користувачів, так і для викладачів. Система реєстрації та надавання ролі реалізується за допомогою розширення Flask-Security. Адміністративна сторінка та файловий менеджер було створено за допомогою розширення Flask-Admin. Для стилізації додатку використовувався шаблонізатор Jinja2, який дозволяє підставляти змінні з Python прямо у html-сторінці в браузері та є стандартом при написанні веб-додатків на Flask. Також використовувався CSS-фреймворк під назвою Bootstrap, призначений для гнучкої інтерфейсної веб-розробки. В якості сервера використовується мініатюрний одноплатний комп'ютер Orange Pi Zero, який виділяється на фоні інших мікрокомп'ютерів компактними габаритами, низьким енергоспоживанням та привабливою ціною.

Ключові слова: веб-сервер, веб-додаток, мікрофреймворк, Flask, Python, Orange Pi Zero.

I.D. Horbatko, O.E. Hryhorenko. Development of software of the department web-server for remote teaching of courses on the electric drive. This article discusses the possibility of implementing a small web-server, the main task of which is to provide access to the department training courses on electric drive with the subsequent possibility of their accumulation and editing. The development environment for the web-application was the Flask microframework for creating web-applications in the Python programming language. Flask is classified as a microframework, since it does not require either specific tools or libraries, deliberately giving the developer latitude in the choice of the specific set of functions in his app, supporting an extension that can add program functions as if they were implemented in Flask itself. This set of functions is implemented using a set of extensions that, if desired, can be installed in the microframework in such a way as if they were implemented in Flask itself. The web-application implements the following functions: a user registration system, granting a role for teachers, an administrative page for teachers, and two types of file manager for both regular users and teachers. The system for registering and granting a role is implemented through the Flask-Security extension. Both the admin page and file manager have been created using the Flask-Admin extension. To style the application, the Jinja2 templating engine was used, which makes it possible to substitute variables from Python di-

¹ студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

² студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, aeg.sasha15@gmail.com

rectly in the html page in the browser and is a standard when making up web-applications in Flask. CSS framework called Bootstrap designed for flexible front-end web-development has been used as well. A miniature single-board computer Orange Pi Zero is used as a server, which stands out against other microcomputers with its compact dimensions, ultra-low power consumption and an attractive price.

Keywords: web-server, web-app, microframework, Flask, Python, Orange Pi Zero.

Постановка проблеми. Сучасна ситуація, пов'язана з пандемією, змушує повністю переходити на дистанційні методи викладання навчальних матеріалів, що в свою чергу підвищує попит на сервіси, які вирішують цю проблему. Проте, нинішні сервіси, що надаються університетом, не були розраховані на подібне збільшення користувачів та не відрізняються стабільною і надійною роботою. Рішенням даної проблеми може стати розробка власного веб-додатку, розрахованого на малий круг користувачів, так як його робота поширюється тільки на конкретну кафедру. Це дозволить спростити процес програмної розробки, а також сильно знизить витрати на придбання та обслуговування серверного обладнання, так як для роботи подібного веб-додатку буде досить використання мініатюрного одноплатного комп'ютера.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день найпопулярнішими веб-фреймворками для розробки веб-додатків на мові Python є Django та Flask. Причому, Flask обігнав Django і посів перше місце, враховуючи, що індустрія веб-розробки протягом останніх п'яти років мала тенденцію до мікрофреймворків та мікросервісів [1]. Flask – це хороший вибір, коли треба швидко створити сайти малого або середнього розміру, такі як форуми та особисті блоги, в той час, як Django ідеально підходить для великих проектів, таких як сайти електронної комерції та CMS (Content management system – система управління контентом). Flask мінімалістичний і не має обмежень, що означає, що розробники можуть реалізувати саме те, що вони хочуть, за допомогою зовнішніх бібліотек, що робить Flask гнучким та розширюваним [2].

На основі перерахованого вище, оптимальним вибором інструментарію для розробки веб-сервера був обраний саме Flask, так як в необхідному додатку потрібен невеликий функціонал, який виконує лише основні задачі, для меншої ресурсоемності та простоти його реалізації.

Мета роботи – розробка веб-сервера, який надає дистанційний доступ до кафедральних навчальних курсів з електроприводу.

Виклад основного матеріалу. Поняття «веб-сервер» може ставитися як до апаратної начинки, так і до програмного забезпечення. Або навіть до обох частин, які працюють спільно.

З точки зору «заліза», «веб-сервер» – це комп'ютер, який зберігає файли сайту (HTML-документи, CSS-стили, JavaScript-файли, картинки та інше) та доставляє їх на пристрій кінцевого користувача (веб-браузер і т. д.). Він підключений до мережі Інтернет і може бути доступний через доменне ім'я.

З точки зору програмного забезпечення, веб-сервер включає в себе кілька компонентів, які контролюють доступ веб-користувачів до розміщених на сервері файлів, як мінімум – це HTTP-сервер. HTTP-сервер – це частина програмного забезпечення (ПЗ), яка розуміє URL (веб-адреси) та HTTP (протокол, який браузер використовує для перегляду веб-сторінок).

На самому базовому рівні, коли браузеру потрібен файл, розміщений на веб-сервері, браузер запитує його через HTTP-протокол. Коли запит досягає потрібного веб-сервера («заліза»), сервер HTTP (ПЗ) приймає запит, знаходить запитуваний документ (якщо немає, то повідомляє про помилку 404) і відправляє назад, також через HTTP.

Щоб опублікувати веб-сайт, необхідний або статичний, або динамічний веб-сервер.

Статичний веб-сервер складається з комп'ютера («залізо») з сервером HTTP (ПЗ). Він називається «статикою», тому що сервер посилає розміщені файли в браузер «як є».

Динамічний веб-сервер складається з статичного веб-сервера і додаткового програмного забезпечення, найчастіше сервера додатку та бази даних. Він називається «динамічним», тому що сервер додатків змінює вихідні файли перед відправкою в браузер по HTTP [3].

У даному випадку був розроблений веб-сервер, де в якості «заліза» застосовується мікрокомп'ютер Orange Pi, а в якості ПЗ – веб-додаток, написаний за допомогою мікрофреймворка Flask на мові програмування Python.

Flask класифікується як мікрофреймворк, тому що не вимагає певних інструментів або бібліотек, свідомо надаючи лише базові функції. Іншими словами, Flask своєю простотою надає

розробнику вибір який функціонал використовувати для вашої програми, підтримуючи розширення, які можуть додавати функції програми, як якщо б вони були реалізовані в самому Flask. Існують розширення для перевірки форм, обробки завантаження, різних технологій відкритої аутентифікації і декількох загальних інструментів [4].

Для розробки веб-сервера застосовувалися такі розширення, як Flask-Security та Flask-Admin. Flask-Security дозволяє швидко додавати загальні механізми безпеки у Flask, а саме: сесійна аутентифікація; реєстрація користувача; доступ на основі ролей; хешування пароля та його перевірка на складність; базова HTTP-аутентифікація; підтвердження по електронній пошті; скидання та відновлення пароля.

Аутентифікація на основі сеансу повністю виконується розширенням Flask-Login та Flask-WTF. Flask-Security обробляє конфігурацію Flask-Login автоматично на основі декількох власних значень конфігурації і використовує функцію альтернативного токена Flask-Login для запам'ятовування користувачів, коли їх сеанс закінчився. Flask-WTF інтегрується з сеансом, а також відразу забезпечує підтримку CSRF (англ. Cross Site Request Forgery – «міжсайтова підробка запиту»).

Flask-Security реалізує дуже просте управління ролями, яке дозволяє зв'язати роль високого рівня або кілька ролей з будь-яким користувачем. Наприклад, можна призначити користувачу такі ролі, як адміністратор, редактор, привілейований користувач або їх комбінацію. Контроль доступу заснований на імені ролі та/або дозволах, що містяться в ролі. Всі ролі повинні мати однозначні імена. Ця функція реалізована за допомогою розширення Flask-Principal.

Хешування паролів включено за допомогою бібліотеки passlib. За замовчуванням паролі хешуються за допомогою функції bcrypt, але можна легко налаштувати алгоритм хешування.

При бажанні, можна включити, щоб нові користувачі підтвердили свою адресу електронної пошти. Flask-Security відправить всім новим користувачам повідомлення електронної пошти з посиланням для підтвердження (рис. 1-3). Після переходу за посиланням підтвердження, користувач автоматично увійде в систему. Також є можливість повторної відправки посилання підтвердження на дану електронну пошту, якщо користувач спробує використовувати прострочений токен або втратив попередній лист. Посилання підтвердження можна налаштувати так, щоб термін дії закінчувався після закінчення певного часу.

doc.in

Создать аккаунт

Спасибо. Инструкция по подтверждению аккаунта отправлена на ervvibnvinkfybkbfr@niwghx.online.

Пожалуйста, войдите чтобы получить доступ к этой странице.

Войдите

Почтовый адрес

Пароль

Запомнить меня

Войти

[Забыли пароль?](#)

[Еще нет аккаунта? Зарегистрируйтесь](#)

Рис. 1 – Демонстрація підтвердження електронної адреси при реєстрації нового користувача

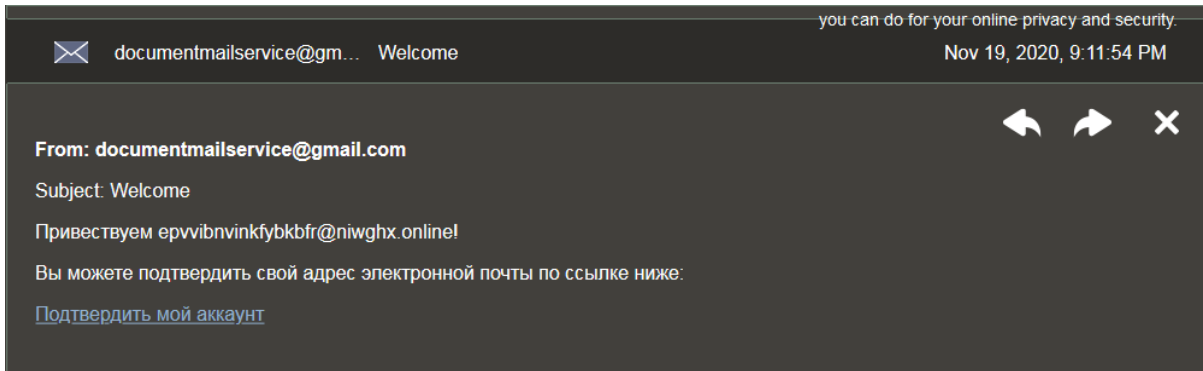


Рис. 2 – Демонстрація отримання листу для активації аккаунту нового користувача

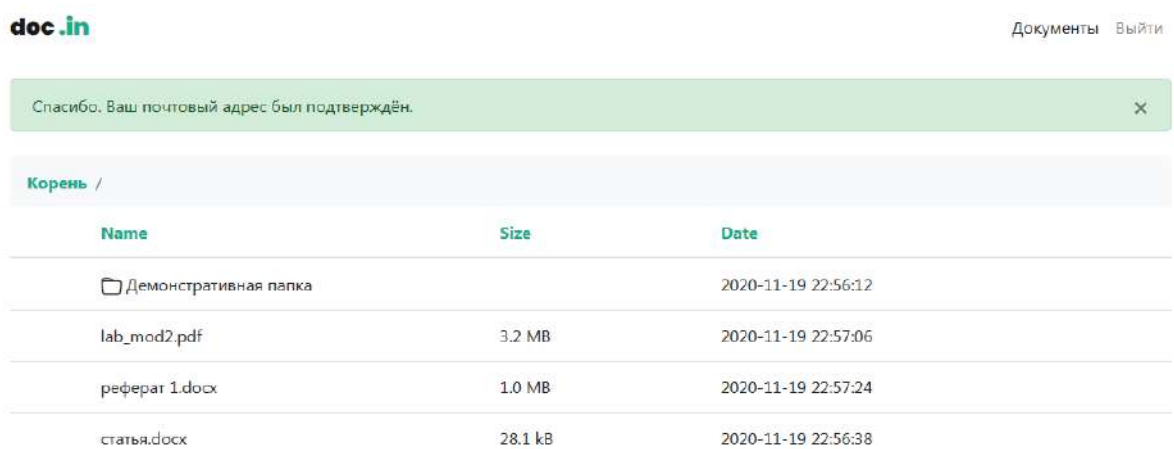


Рис. 3 – Демонстрація підтвердження електронної адреси при реєстрації нового користувача

Flask-Security відправляє користувачу електронного листа з посиланням, в якому він може скинути свій пароль (рис. 4). Після скидання пароля відбувається автоматичний вхід в систему, і з цього моменту буде використовуватися новий пароль. Посилання для скидання пароля можуть бути налаштовані таким чином, щоб термін їх дії закінчувався по заданому часу.

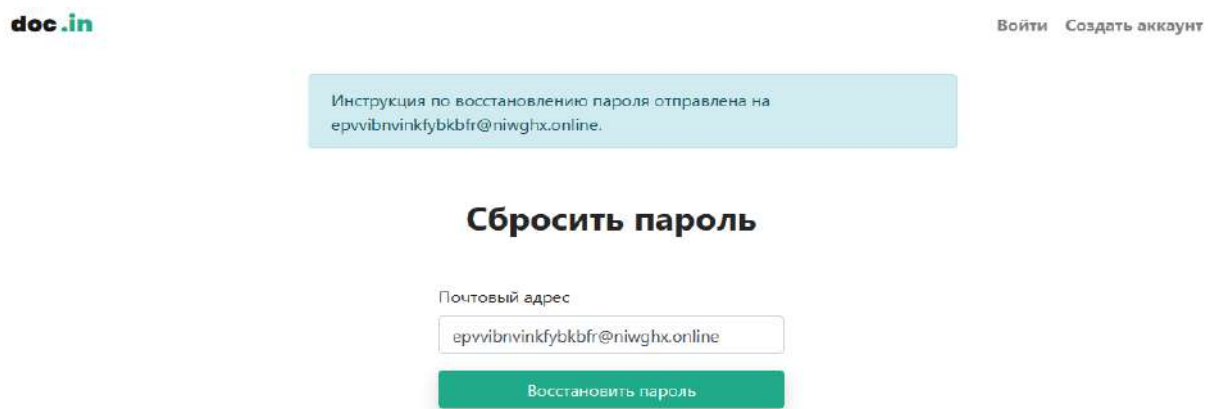


Рис. 4 – Демонстрація скидання пароля користувача

Flask-Security поставляється з базовим представленням реєстрації користувача. Новим користувачам потрібно лише вказати адресу електронної пошти та пароль. Це представлення можна змінити, якщо в процесі реєстрації потрібно більше полів [5].

В свою чергу Flask-Admin вирішує проблему побудови інтерфейсу адміністратора поверх існуючої моделі даних. З невеликими зусиллями воно дозволяє керувати даними веб-служби через зручний інтерфейс [6]. З його допомогою були реалізовані дві версії файлового менеджера. Одна – для викладачів (рис. 5), яка дозволяє завантажувати, редагувати файли та папки, і друга – для звичайних користувачів (рис. 6), яка дозволяє лише перегляд та завантаження файлів.

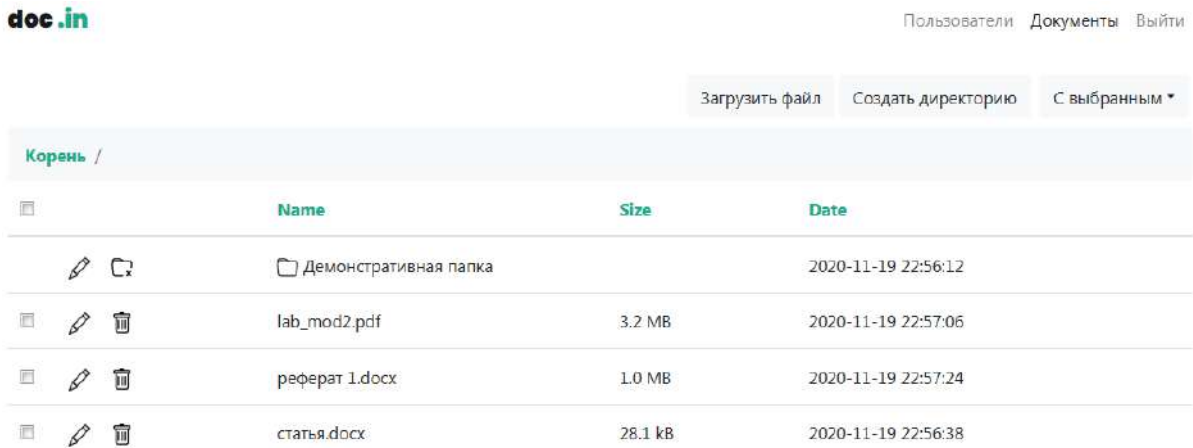


Рис. 5 – Демонстрація версії файлового менеджера з повним функціоналом для викладачів

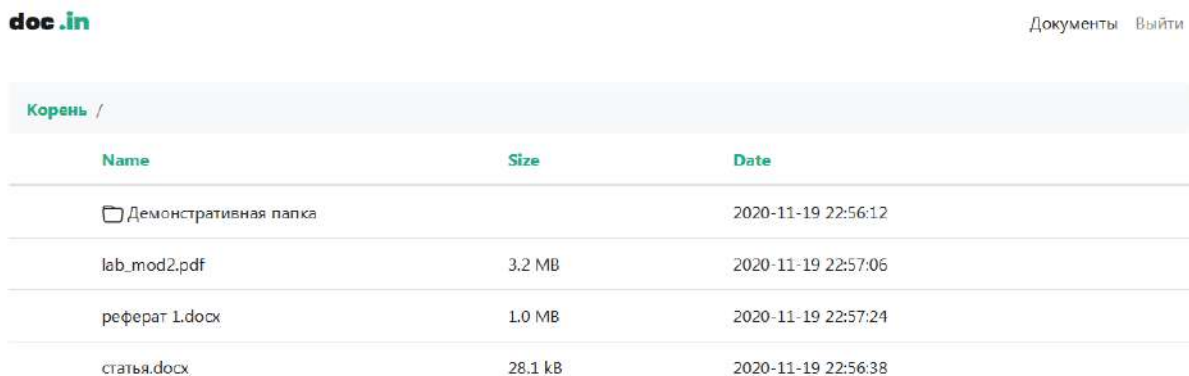


Рис. 6 – Демонстрація версії файлового менеджера з обмеженим функціоналом для звичайних користувачів

Додаток веб-сервера має володіти логікою розуміння нинішнього статусу користувача для генерації йому відповідних посилань та сторінок. Наприклад, якщо користувач не авторизован, йому будуть доступні лише сторінки логіна та реєстрації, в свою чергу при авторизації користувача його переадресують на сторінку файлового менеджера, де в свою чергу відбувається перевірка наявності у нього ролі, яка вирішує яку сторінку додатка відображати. З боку сервера ця логіка реалізується за допомогою вищезгаданого доповнення Flask-Security, а html-шаблони, які генеруються за цією логікою, створюються за допомогою шаблонізатора Jinja2.

Шаблонізатор Jinja2 дозволяє підставляти змінні з Python прямо у html-сторінці в браузері та є стандартом при написанні веб-додатків на Flask. Jinja2 позиціонує себе як інструмент для дизайнерів та верстальників, що спрощує верстку і відокремлює її від розробки, також намагається в міру можливостей ізолювати не-розробників від Python [7].

Для стилізації додатку використовувався CSS-фреймворк під назвою Bootstrap з відкритим вихідним кодом, призначений для гнучкої інтерфейсної веб-розробки, орієнтованої на адаптивний дизайн. Він містить шаблони дизайну на основі CSS і на основі JavaScript для типографіки, форм, кнопок, навігації та інших компонентів інтерфейсу [8].

В якості сервера використовується мініатюрний одноплатний комп'ютер Orange Pi Zero. Це відповідь на Raspberry Pi Zero, який і був найменшим та дешевим комп'ютером. Orange Pi Zero коштує всього 7 доларів США на AliExpress, що трохи дорожче за Raspberry Pi Zero, але він більш просунутий в технічному плані.

Виріб має розміри всього 48×46 мм і важить 26 грамів. Побудований на 4-ядерному процесорі Allwinner H2 з архітектурою ARM (Advanced RISC Machine – вдосконалена RISC-машина) і графічним прискорювачем Mali 400MP2. Міні-комп'ютер може нести на борту 256 або 512 Мбайт оперативної пам'яті DDR3 SDRAM. Для зберігання даних служить змінна карта microSD (рис. 7).

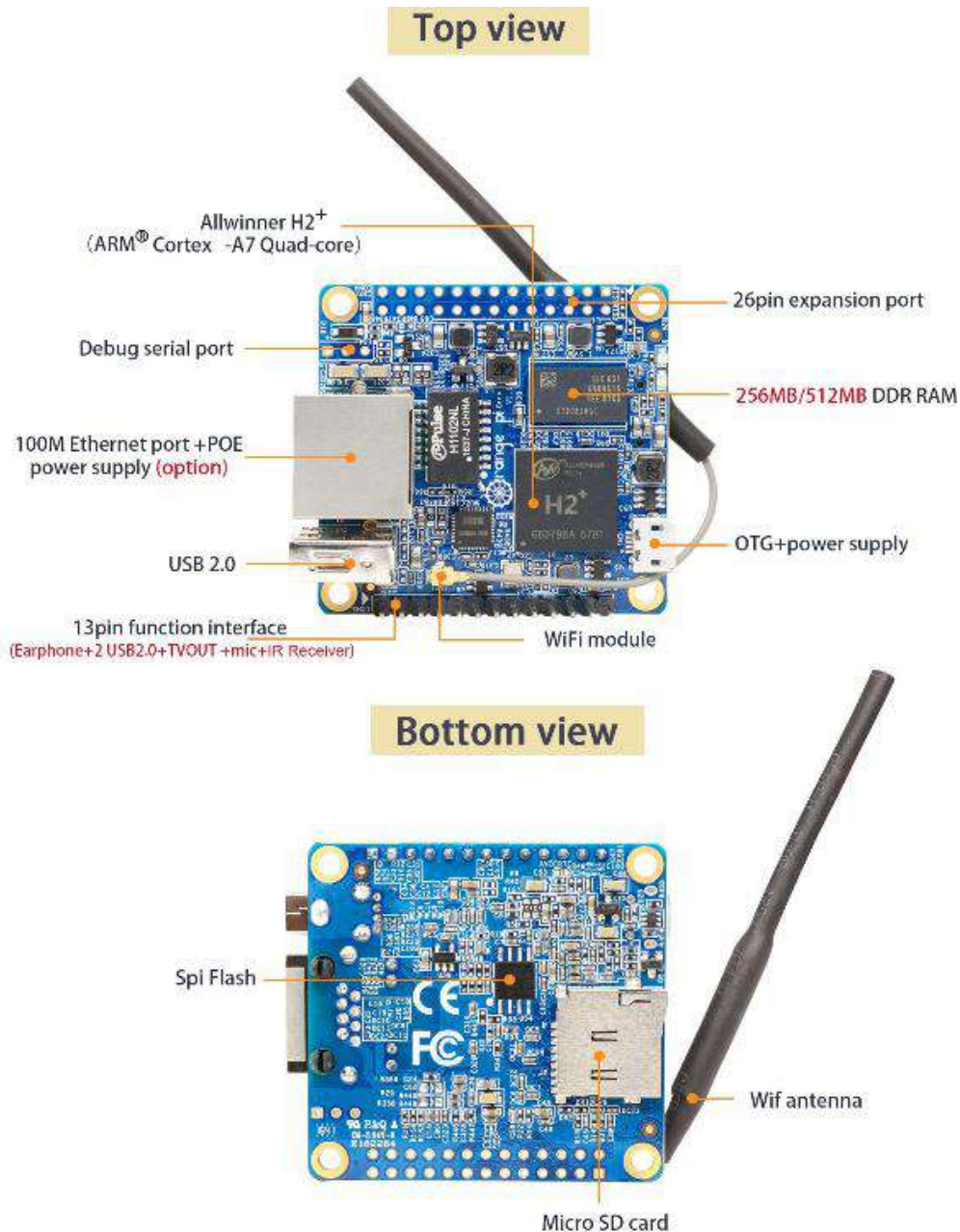


Рис. 7 – Зображення плати Orange Pi Zero

На Orange Pi Zero є адаптер Wi-Fi 802.11b/g/n із зовнішньою антеною і мережевий контролер Ethernet 10/100 з відповідним роз'ємом для підключення кабелю. На платі також є порт USB 2.0 і microUSB 2.0, через який подається живлення, але можна жити й через GPIO-піни та PoE. Є GPIO (General-purpose input/output, Інтерфейс введення/виведення загального призна-

чення) на 26 пінов і додатковий на 13 пінов. 13-піновий інтерфейс дозволяє підключати адаптер для монітора, перехідник на два додаткових USB-порту, мікрофон та навушники. Для полегшення роботи з 13-піновим інтерфейсом є плата розширення, яку можна купити на AliExpress за ціною 2 долари США [9].

Orange Pi Zero досить-таки невимогливий до живлення – сам по собі мікрокомп'ютер споживає приблизно 300 мА, тобто для роботи буде достатньо блоку живлення з вихідним струмом до 1 А.

Цей мікрокомп'ютер має компактні габарити, наднизьке енергоспоживання і здатний виконувати ті завдання, для реалізації яких буде мало платформи Arduino або ESP8266, що робить його дуже привабливим варіантом в якості серверного обладнання для невеликих веб-додатків.

Висновки

1. Запропоновано використовувати для невеликих веб-додатків мікрофреймворк Flask з опціональною можливістю використання розширень.
2. Для швидкої та адаптивної стилізації дизайну додатку запропоновано використовувати Bootstrap.
3. В якості серверного обладнання запропоновано використовувати компактний мікрокомп'ютер Orange Pi Zero.

Перелік використаних джерел:

1. Python Developers Survey 2019 Results [Electronic resource] : [Website]. – Electronic data. – Mode of access : <https://jetbrains.com/lp/python-developers-survey-2019>.
2. Flask vs Django: How to Understand Whether You Need a Hammer or a Toolbox [Electronic resource] : [Website]. – Electronic data. – Mode of access : <https://medium.com/@SteelKiwiDev/flask-vs-django-how-to-understand-whether-you-need-a-hammer-or-a-toolbox-39b8b3a2e4a5>.
3. What is a web server? [Electronic resource] : [Website]. – Electronic data. – Mode of access : https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Common_questions/What_is_a_web_server.
4. Welcome to Flask – Flask Documentation [Electronic resource] : [Website]. – Electronic data. – Mode of access : <https://flask.palletsprojects.com/en/1.1.x>.
5. Flask-Security [Electronic resource] : [Website]. – Electronic data. – Mode of access : <https://pythonhosted.org/Flask-Security>.
6. Flask-Admin – flask-admin 1.5.3 documentation [Electronic resource] : [Website]. – Electronic data. – Mode of access : <https://flask-admin.readthedocs.io/en/latest/>.
7. Jinja – Jinja Documentation (2.11.x) [Electronic resource] : [Website]. – Electronic data. – Mode of access : <https://jinja.palletsprojects.com/en/2.11.x>.
8. Bootstrap 4 – Introduction [Electronic resource] : [Website]. – Electronic data. – Mode of access : <https://getbootstrap.com/docs/4.0/getting-started/introduction>.
9. Orange pi zero – Orangepi [Electronic resource] : [Website]. – Electronic data. – Mode of access : <http://www.orangepi.org/orangepizero>.

References:

1. Python Developers Survey 2019 Results Available at : www.jetbrains.com/lp/python-developers-survey-2019 (accessed 13 August 2020).
2. Flask vs Django: How to Understand Whether You Need a Hammer or a Toolbox Available at : www.medium.com/@SteelKiwiDev/flask-vs-django-how-to-understand-whether-you-need-a-hammer-or-a-toolbox-39b8b3a2e4a5 (accessed 20 August 2020).
3. What is a web server? Available at : www.developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Common_questions/What_is_a_web_server.
4. Welcome to Flask – Flask Documentation Available at : www.flask.palletsprojects.com/en/1.1.x (accessed 13 August 2020).
5. Flask-Security Available at : www.pythonhosted.org/Flask-Security (accessed 02 September 2020).
6. Flask-Admin – flask-admin 1.5.3 documentation Available at : www.flask-admin.readthedocs.io/en/latest (accessed 02 September 2020).

7. Jinja – Jinja Documentation (2.11.x) Available at : www.jinja.palletsprojects.com/en/2.11.x (accessed 10 September 2020).
8. Bootstrap 4 – Introduction Available at : www.getbootstrap.com/docs/4.0/getting-started/introduction (accessed 11 September 2020).
9. Orange pi zero – Orangepi Available at : www.orangepi.org/orangepizero (accessed 12 September 2020).

Рецензент: Д.С. Міроненко
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 30.09.2020

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.86.065

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226121

© Карпенко Т.М.¹, Музика І.М.²

ДО ПИТАННЯ ПРО ВЛАСНІ ЧАСТОТИ ПОПЕРЕЧНИХ КОЛИВАНЬ СИСТЕМИ «БАЛКА-ДВИГУН»

У статті розглянуті задачі по визначенню уточнених значень частот власних згинальних коливань балок для поширених в інженерній практиці розрахункових схем. Об'єкт вивчення – пружна балка і розташований на ній двигун з неврівноваженою ексцентрично насадженою масою. Дослідження виконувалися з метою отримання достатнього коефіцієнта динамічності і уточненого формулювання умови міцності балки. Для визначення власної частоти з врахуванням маси балки побудована динамічна модель об'єкта з приведеною масою, розташованою в перерізі балки, через яке проходить сила тягіння двигуна. Запропоновано методу визначення коефіцієнта зведення маси, зведеного коефіцієнта згинальної жорсткості балки, власної частоти коливань. Для цього використовується рівняння зігнутої осі балки, з огляду на зміну координати точки зведення. Визначено основну частоту коливань системи з врахуванням осьового моменту інерції маси двигуна щодо його центральної осі. Рішення рівняння частот для малого відношення радіуса інерції двигуна до довжини балки дозволяє отримати суттєву поправку до частоти, яка мала б місце для точкової маси двигуна. Виходячи з умов міцності балки при відсутності демпфера, отримані рекомендації щодо безпечної швидкості обертання ротора в дорезонансній і післярезонансній фазах руху об'єкта. Маючи уточнене амплітудне значення напружень, з врахуванням заданих параметрів балки і двигуна, рекомендовано підібрати характеристику демпфера в'язкого тертя, яка забезпечить заданий коефіцієнт витривалості при несиметричному циклі зміни напружень. Результати статті можуть бути використані студентами та інженерами для підбору оптимального, з точки зору міцності балки, поєднання параметрів балки і двигуна.

Ключові слова: вимушені коливання, власна частота, коефіцієнт динамічності, резонанс.

T.M. Karpenko, I.M. Muzyka. On the question of natural frequencies of transverse vibrations of the «beam-engine» system. The article deals with the tasks of determining the refined values of the frequencies of natural bending vibrations of beams for the design schemes common in engineering practice. The object of study is an elastic beam and an engine located on it with an unbalanced eccentrically mounted mass. The studies were carried out with the aim of obtaining a sufficient dynamism coefficient and a refined formulation of the beam strength condition. To determine the natural frequency, taking into account the mass of the beam, a dynamic model of an object with a reduced mass has been built, located in the beam section through which the gravity force of the engine passes. A method for determining: the coefficient of mass reduction, the reduced coefficient of bending stiffness of the beam, the natural vibration frequency has been proposed. To do this, the equation for the curved beam axis is used, taking into account the change in the coordinate of the mass focusing point. The basic vibration frequency of the system has been determined taking into account the axial moment of inertia of the engine mass

¹ канд. фіз.-мат. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, karpenko_t_n@pstu.edu

² ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, muzyka_i_n@pstu.edu

relative to its central axis. The solution of the frequency equation for a small ratio of the radius of the motor inertia to the length of the beam makes it possible to obtain a significant correction to the frequency that would take place for a point mass of the motor. Based on the strength conditions of the beam in the absence of a damper, recommendations have been obtained regarding the rotor rotation safe speed in the pre-resonant and post-resonant phases of the object motion. Having the refined amplitude value of stresses, taking into account the given parameters of the beam and the engine, it is recommended to select the characteristic of the viscous friction damper, which will provide a given endurance coefficient with an asymmetric cycle of stress change. The results of the article can be used by both students and engineers to select the optimal, in terms of beam strength, combination of beam and engine parameters.

Keywords: forced vibrations, natural frequency, dynamic factor, resonance.

Постановка проблеми. Серед об'єктів, напружено-деформований стан яких представляє інтерес, важливе місце займають балки, на яких встановлені машини з незбалансованою масою, що обертається. Підбір поєднання параметрів, які забезпечать міцність балки при безрезонансному режимі коливань, є актуальною задачею. Розрахунки на міцність зводяться до визначення коефіцієнта динамічності, величина якого залежить від власної основної частоти коливань системи. Чим точніше буде знайдена ця частота, тим достовірніше буде розрахунок балки на міцність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням визначення власних частот балок присвячений цілий ряд класичних робіт [1, 2] та ін. В роботі [3] запропонована методика визначення спектра власних частот згинальних коливань двоопорної балки, навантаженої розподіленим навантаженням. Аналітичні вирази для визначення власних частот, отриманих в роботі [4], дозволяють прогнозувати зміни власних частот в залежності від параметрів балок. Експериментально і теоретично розраховані власні частоти коливань асфальтобетонних балок в роботі [5].

Мета статті – для часто використовуваних розрахункових схем системи «балка–двигун»: виконати розрахунки власних частот згинальних коливань балки з урахуванням її маси, осьового моменту інерції маси двигуна і місця розташування двигуна на балці; рекомендувати, з точки зору міцності балки, безпечні кутові швидкості обертання валу двигуна.

Виклад основного матеріалу. Пружна балка маси m_0 , на якій розташований двигун маси m_d , з неврівноваженою масою $m_{ек}$, ексцентриситет якого дорівнює e , здійснює поперечні вимушені коливання з частотою обертання валу двигуна ω під дією збурюючої сили $F = H \cdot \sin \omega t$, де $H = m_{ек} \omega^2 e$. Умова міцності об'єкта вивчення виражається формулою

$$K_o \cdot \sigma_{\max} \leq [\sigma]. \quad (1)$$

Коефіцієнт динамічності, згідно [6], дорівнює

$$K_o = 1 + \frac{\delta_H}{\delta_{ст}} \cdot \lambda, \quad (2)$$

де δ_H , $\delta_{ст}$ – деформація балки під дією сили H і сили $Q = mg$, відповідно; $m = m_d$, якщо масою балки нехтують; $m = m_d + \beta \cdot m_0$, β – коефіцієнт зведення маси балки; λ – коефіцієнт наростання коливань, що дорівнює:

– без врахування сил опору

$$\lambda = \frac{1}{|k^2 - \omega^2|}; \quad (3)$$

– з врахуванням сили лінійного опору, яка характеризується коефіцієнтом α

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{k^2}\right)^2 + \left(\frac{\alpha \cdot \omega}{m \cdot k^2}\right)^2}}, \quad (4)$$

де k – основна частота власних коливань, яка дорівнює

$$k = \sqrt{\frac{c}{m}}, \quad (5)$$

де c – коефіцієнт згинальної жорсткості балки.

При виконанні наближених розрахунків частоту k найчастіше визначають без врахування маси балки і осьового моменту інерції маси двигуна.

Розглянемо приклад визначення власної частоти коливань з врахуванням маси балки, якщо змінювати положення точки зведення маси.

Балку, яка коливається, довжиною l , з рівномірно розподіленою масою, замінюють точковою масою, яка розташовується в перерізі $x = x_0$, через який проходить сила ваги двигуна. Ця маса має таку ж кінетичну енергію, як і вся балка. При цьому вводиться припущення про те, що для динамічних прогинів балки виконується закон Гука, а швидкості прямо пропорційні динамічним деформаціям. Маємо формулу для визначення коефіцієнта β згідно [6]

$$\beta = \frac{1}{l} \int_0^l \left(\frac{y(x)}{\delta_{ст}} \right)^2 dx, \quad (6)$$

де $y(x)$ – рівняння зігнутої осі балки під дією зосередженої сили \bar{Q} .

Для визначення уточненої власної частоти пропонується наступний алгоритм.

1. Записати формулу згинального моменту $M(x)$, що виник під дією сили \bar{Q} , яка прикладена в точці зведення.

2. Інтегрувати диференціальне рівняння

$$E \cdot I \cdot y''(x) = M(x) \quad (7)$$

з врахуванням умов обпирання балки і отримати рівняння $y(x)$.

3. Визначити значення $\delta_{ст}$, β і зведений коефіцієнт згинальної жорсткості балки за формулою

$$c = \frac{Q}{\delta_{ст}}. \quad (8)$$

Значення частоти k визначаємо за формулою (5).

Приклад 1. Для розрахункової схеми, зображеної на рис. 1, визначити як змінюється власна частота коливань об'єкта в залежності від положення двигуна на балці з врахуванням маси балки. Вихідні дані: $E, I_z, l, m_0, m_d, 0 \leq x_0 \leq 0,5l$.

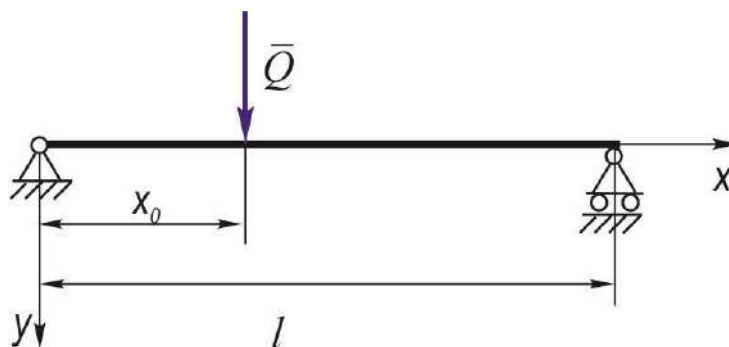


Рис. 1 – Розрахункова схема 1

Маючи залежність $M(x)$, інтегруємо рівняння (7) з врахуванням умов обпирання балки і отримаємо рівняння зігнутої осі

$$y(x) = \frac{Q}{6E \cdot I} (1 - \gamma) \cdot (x^3 + 2\gamma xl^2 + \gamma^2 xl^2), \text{ де } \gamma = \frac{x_0}{l}.$$

Коефіцієнт згинальної жорсткості, зведений до координати x_0 , дорівнює $c = \frac{3E \cdot I}{l^3} \bar{c}$, де $\bar{c} = \frac{1}{\gamma^2(1-\gamma)^2}$.

Залежність коефіцієнту зведення маси β від параметру γ визначимо за формулою (6). Тоді власна частота коливань дорівнює $k = \sqrt{\frac{3E \cdot I_z}{l^3(m_d + \beta m_6)}} \cdot \bar{k}$, де $\bar{k} = \sqrt{\frac{\bar{c}}{\beta}}$.

Результати чисельного аналізу поміщені в таблиці.

Таблиця

Значення коефіцієнтів β, \bar{c}, \bar{k}					
$\gamma = \frac{x_0}{l}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
β	2,86	1,01	0,84	0,52	0,48
\bar{c}	123,45	39,06	22,67	17,36	16,00
\bar{k}	6,56	6,21	5,94	5,78	5,74

Оскільки для безрезонансного режиму коливань об'єкта має виконуватися нерівність $0,8 < \frac{\omega}{k} < 1,2$, виходячи з результатів вище наведених досліджень, робимо висновок про місце розміщення двигуна на балці.

Застосовуючи запропоновану методику, можна знайти коефіцієнти зведення мас для інших розрахункових схем. Наприклад, для консолі маємо:

$$\beta = \frac{1}{140}(63\gamma^5 - 35\gamma^6 + 5\gamma^2), \quad k = \sqrt{\frac{3E \cdot I_z}{l^3(m_d + \beta m_6)}}.$$

Приклад 2. Для розрахункової схеми, зображеної на рис. 2, встановимо, яка похибка допускається при визначенні основної власної частоти коливань об'єкта, якщо не враховується момент інерції маси двигуна.

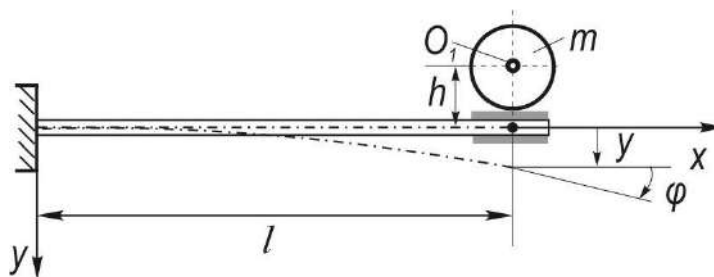


Рис. 2 – Розрахункова схема 2

Вихідні дані: балки E, I_z, l ; двигуна m, I_{O_1}, h .

Мета задачі: визначити уточнене значення власної частоти, якщо врахувати момент інерції маси двигуна щодо осі O_1z .

Визначимо радіус інерції i маси двигуна щодо осі, яка знаходиться на відстані h від центральної осі O_1z : $i = \sqrt{\frac{I}{m}}$, де $I = I_{O_1} + mh^2$.

Рух системи, що вивчається, можна описати двома координатами згідно [1]: y – вертикальне переміщення вільного кінця балки, φ – кут обертання балки.

Склавши диференціальні рівняння руху методом сил і прийнявши розв'язок цих рівнянь у вигляді $y = A_1 \sin kt$, $\varphi = A_2 \sin kt$, маємо рівняння частот

$$(m \cdot \delta_{11} \cdot k^2 - 1)(I \cdot \delta_{22} \cdot k^2 - 1) - m \cdot I \cdot \delta_{12}^2 \cdot k^4 = 0,$$

де коефіцієнти впливу дорівнюють $\delta_{11} = \frac{l^3}{3E \cdot I_z}$, $\delta_{12} = \frac{l^2}{2E \cdot I_z}$, $\delta_{22} = \frac{l}{E \cdot I_z}$.

Розв'язуючи рівняння частот, враховуючи, що відношення i до l мале, отримано наближене значення квадрата меншої частоти згідно [1]: $k_1^2 = \frac{3E \cdot I_z}{ml^3} - \frac{9E \cdot I_z}{ml^3} \cdot \frac{i^2}{l^2}$.

Тому поправка до основної частоти дорівнює $\Delta k_1 = \frac{3i}{l} \sqrt{\frac{E \cdot I_z}{ml^3}}$.

Чисельний аналіз задачі виконаємо для наступних початкових даних.

Двигун МТН613, маса $m = 1100 \text{ кг}$, $i = 0,159 \text{ м}$, $\omega = 100,48 \text{ с}^{-1}$.

Балка виконана з двотавра №30а, $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $I_z = 8,95 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$, $l = 1,5 \text{ м}$.

Результати обчислення наступні:

– без врахування $I - k_{\text{наближене}} = 123 \text{ с}^{-1}$;

– з врахуванням $I - k_{\text{уточнене}} = 100,6 \text{ с}^{-1}$.

Тобто маємо явище резонансу, якщо враховувати момент інерції двигуна I ; та маємо до-резонансний режим для коефіцієнту розладу $\frac{\omega}{k} = 0,81$, якщо I не враховувати.

Чому це важливо знати власні частоти коливань системи «балка–двигун».

1. Маючи уточнені значення власних частот коливань об'єкта «балка–двигун», при заданих початкових параметрах можна підібрати демпфер в'язкого тертя, що задовольняє коефіцієнту запасу витривалості n . Це можливо тому, що коефіцієнт n при несиметричному циклі змін напружень містить амплітудне значення напруження σ_a , в якому є одна невідома α – коефіцієнт сили лінійного опору демпфера. Згідно [7] σ_a дорівнює:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{ст}}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{k^2}\right)^2 + \left(\frac{\alpha \omega}{mk^2}\right)^2}}.$$

2. Виходячи з умов міцності балки, що здійснює разом з двигуном вимушені коливання, можна відповісти на питання: яким нерівностям в дорезонансному і післярезонансному режимах повинна задовольняти безпечна кутова швидкість обертання валу двигуна $\omega_{\text{безп.}}$.

Перепишемо умову міцності (1) з врахуванням значення коефіцієнта λ в разі відсутності демпфера

$$1 + \frac{m_{\text{ек}} \cdot e \cdot \omega^2}{G} \cdot \frac{k^2}{|k^2 - \omega^2|} \leq \frac{[\sigma]}{\sigma_{\text{max}}}.$$

Тут G – вага двигуна. Ввівши позначення $\chi = \frac{m_{\text{ек}} \cdot l}{G}$, $\psi = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\text{max}}} - 1$, отримаємо нерівності

для безпечних значень ω :

$$\begin{aligned} \text{– для } \omega < k \quad \omega &\leq \sqrt{\frac{\psi}{\chi + \frac{\psi}{k^2}}}; \\ \text{– для } \omega > k \quad \omega &\geq \sqrt{\frac{\psi}{\chi - \frac{\psi}{k^2}}}. \end{aligned}$$

Висновки

1. Результати проведених в статті досліджень дозволяють знаходити уточнені значення власних частот коливань системи «балка–двигун».

2. Маючи ці частоти, конструктора та експлуатаційники об'єкту, можуть підібрати раціональне поєднання параметрів системи при виконанні умов міцності балки з метою віддалення від резонансу.

Перелік використаних джерел:

1. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний / Я.Г. Пановко. – М. : Высшая школа, 1967. – 316 с.
2. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко. – М. : Физматгиз, 1960. – 380 с.
3. Гордон В.А. Собственные частоты и формы изгибных колебаний балки с трещиной / В.А. Гордон, Э.А. Кравцова // Вестник МГСУ. – № 3. – 2014. – С. 50-56.
4. Гаврилов А.А. Методика расчета собственных частот кран балок и их элементов / А.А. Гаврилов, Н.В. Морозов, Ю.Л. Власов // Вестник Оренбургского государственного университета. – № 1 (176). – 2015. – С. 212-217.
5. Маляр В.В. Определение частот собственных колебаний асфальтобетонных балок, испытываемых на вибростенде ХНАДУ / В.В. Маляр // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – Вып. 64. – 2014. – С. 130-133.
6. Беляев Н.М. Сопrotivление материалов / Н.М. Беляев. – М. : ГИ Ф.-М.Л., 1962. – 856 с.
7. Йосилевич Г.Б. Прикладная механика: для студентов ВУЗов / Г.Б. Йосилевич, П.А. Лебедев, В.С. Стреляев. – М. : Машиностроение, 1985. – 576 с.

References:

1. Panovko Ya.G. *Osnovy prikladnoi teorii uprugih kolebaniy* [Fundamentals of the applied theory of elastic vibrations]. Moscow, Higher school Publ., 1967. 316 p. (Rus.)
2. Timoshenko S.P. *Kolebaniya v ingenernom dele* [Oscillations in engineering]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1960. 380 p. (Rus.)
3. Gordon V.A. *Sobstvennye chastoty i formy izgibnyh kolebaniy balki s treshchinoy* [Natural frequencies and forms of flexural vibrations of a beam with a crack]. *Vestnik MGSU – Vestnik MGSU*, 2014, no. 3, pp. 50-56. (Rus.)
4. Gavrilov A.A. *Metodika rascheta sobstvennyh chastot kran balok i ih elementov* [Methodology for calculating natural frequencies of crane beams and their elements]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta – Vestnik of the Orenburg State University*, 2015, no. 1 (176), pp. 212-217. (Rus.)
5. Malyar V.V. *Opređenje chastot sobstvennyh kolebaniy asfaltobetonnyh balok, ispytyvaemyh na vibrostende KhNADU* [Determination of natural vibration frequencies of asphalt concrete beams tested on a vibration stand KhNADU]. *Visnik Kharkivs'kogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhn'ogo universitetu – Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 2014, iss. 64, pp. 130-133. (Rus.)
6. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. Moscow, GI F.-M.L. Publ., 1962. 856 p. (Rus.)
7. Yosilevich G.B. *Prikladnaya mehanika: Dlya studentov vuzov* [Applied mechanics: For university students]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 576 p. (Rus.)

Рецензент: А.О. Іщенко
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 15.09.2020

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.791.927

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226126

До 50-річчя галузевої лабораторії наплавлення

© Лещинський Л.К.¹, Матвієнко В.М.², Іванов В.П.³, Степнов К.К.⁴,
Возьянов Е.І.⁵, Карауланов О.В.⁶

ТЕХНОЛОГІЯ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ ВАЛКІВ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ КОМПОЗИЦІЯМИ ПІДВИЩЕНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ

Наведено результати аналізу шляхів підвищення тріщиностійкості наплавлених композицій при зміцненні валків гарячої прокатки. Показано, що запобігти утворенню кільцевих магістральних тріщин дозволяє технологія формування шарів з швів з непрямої траєкторією укладання (зигзагоподібних або синусоїдальних) і асиметричною зміною траєкторії в кожному наступному шарі. При поширенні тріщин в таких швах відбувається їх взаємне перетинання з подальшим галуженням і уповільненням. Разом з тим, періодична зміна траєкторії швів супроводжується розорієнтацією кристалічної структури, що сприяє уповільненню тріщини. Підвищити опір розтріскуванню дозволяє зміна напрямку наплавлення, а отже напрямку росту дендритів в металі суміжних шарів багатошарової композиції, що наплавляється на валки гарячої прокатки. Показано, що при такій зміні, з метою зменшення ймовірності утворення дефектів в першому шарі (підшару), наплавлення здійснюється по гвинтовій лінії з максимально можливим кроком, при якому забезпечується надійне перекриття суміжних швів. У поєднанні з гальмуванням на межі однорідних, тим більше різнорідних швів змінного складу, така технологія наплавлення забезпечує підвищення тріщиностійкості композиції. Показано, що такі різнорідні багатошарові композиції характеризуються підвищеним значенням ударної в'язкості і коефіцієнту інтенсивності напружень. Для реалізації узгодженої зміни вектора швидкості наплавлення і змінного хімічного складу швів розроблена і освоєна модернізована система управління установкою для наплавлення валків.

Ключові слова: валки гарячої прокатки, наплавлення, вектор швидкості, непрямої лінійність, багатошаровість, змінний хімічний склад швів, різнорідність, система управління траєкторією, межі швів, гальмування тріщини, ударна в'язкість, коефіцієнт інтенсивності напружень.

L.K. Leshchinskiy, V.M. Matvienko, V.P. Ivanov, K.K. Stepnov, E.I. Vozyanov, O.V. Karaulanov. Technology and equipment for hot rolls surfacing with increased crack resistance compositions. The results of the analysis of ways to increase the crack resistance of deposited compositions at hardening of hot rolling rolls are presented. It has been shown that the technology of forming layers from seams with a non-straight laying (zigzag or sinusoidal) and an asymmetric change in the path in each subsequent layer makes it possible to prevent the formation of circular main cracks. With the propagation of cracks in such seams, their mutual intersection occurs, followed by branching and slowing

¹ д-р техн. наук, професор, Бостон, США

² д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, matviyenkovn@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

⁴ інженер, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

⁵ головний зварювальник, ПРАТ «МК «Азовсталь», м. Маріуполь

⁶ головний зварювальник, ООО «МЕТИНВЕСТ-МРМЗ», м. Маріуполь

down. Along with it, the periodic change in the trajectory of the welds is accompanied by a disorientation of the crystal structure, which helps to slow down the crack. Changing the direction of surfacing, and hence the direction of dendrite growth, in the metal of adjacent layers of a multilayer composition being deposited on hot rolling rolls, makes it possible to increase the resistance to cracking. It has been shown that with such a change, in order to reduce the possibility of defect formation in the first layer (sublayer), surfacing is carried out along a helical line with the maximum possible pitch, thus ensuring reliable overlap of adjacent seams. In combination with braking at the boundaries of homogeneous, especially dissimilar welds of variable composition, this surfacing technology provides an increase in the fracture toughness of the composition. It has been shown that such heterogeneous multi-layer compositions are characterized by increased impact toughness and stress intensity factor. To implement the coordinated change in the velocity vector of surfacing and variable chemical composition of the welds, a modernized control system for the installation for surfacing rolls has been developed and mastered.

Keywords: hot rolling rolls, surfacing, velocity vector, non-straightness, multi-layering, welds of variable chemical composition, heterogeneity, trajectory control system, weld boundaries, crack retardation, impact strength, stress intensity factor.

Постановка проблеми. Високі вимоги до тріщиностійкості робочого шару валків гарячої прокатки пов'язані з прагненням збільшити їх ресурс за рахунок підвищення опору розтріскування і запобігання руйнуванню. Ці вимоги треба враховувати при розробці як технології наплавлення, так і системи управління обладнанням наплавної установки. Оскільки значні труднощі викликає проектування і застосування універсальної технології наплавлення тріщиностійких композицій, необхідно використовувати такі способи гальмування тріщини, які визначаються реальними умовами роботи валка прокатного стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Залежно від розмірів, маси і величини зносу прокатних валків технологія, що запропонують, повинна забезпечити високу продуктивність і безперервність процесу наплавлення. У той же час, якщо за умовами роботи величина зносу валка має допустиму межу, кількість шарів може бути мінімальною, що сприяє обмеженню тепловкладення в виріб і зниженню рівня залишкових зварювальних напружень. При оцінці тріщиностійкості наплавлених композицій найважливіше значення має напрямок розвитку тріщини по відношенню до межі шарів, а також швів в кожному шарі [1, 2]. На відміну від тріщини, яка поширюється вздовж межі шарів (Crack-propagation), можлива зупинка тріщини (Crack-arrester), орієнтованої в напрямку, перпендикулярному межі шарів багат шарової композиції. Робота поширення тріщини в таких композиціях залежить від схеми формування кожного наплавленого шару, де роль бар'єрів, що гальмують тріщину, грають межі не тільки між різнорідними, але і однорідними швами, а також між шарами. При перетині межі шарів знижується швидкість втомої тріщини (fatigue crack retardation), внаслідок чого змінюється її напрямок (Crack deflection) і починається розгалуження первинної тріщини з утворенням сітки дрібних вторинних тріщин (Crack-delamination). Реалізація цих положень, які забезпечують підвищення тріщиностійкості, повинна здійснюватися шляхом вибору матеріалів, технології та системи управління обладнанням для наплавлення валків.

Технічна доцільність вдосконалення технології наплавлення прокатних валків, розробка та впровадження сучасної технології і системи управління наплавною установкою, як і пов'язані з цим витрати, залежать від їх відповідності рівню функціональних властивостей застосовуваних наплавних матеріалів. Тільки в разі такої відповідності можна забезпечити істотне збільшення ресурсу валків. З огляду на умови роботи валків гарячої прокатки наплавні матеріали, що застосовуються, поряд з опором зносу і термоутомленню руйнуванню повинні забезпечувати мінімальне погіршення цих характеристик при повторному нагріванні в зонах перекриття суміжних швів (валиків). Тому вибір наплавних матеріалів, навіть при значному збільшенні вартості, здійснюється, виходячи з необхідності знизити інтенсивність розтріскування, тим більше зародження магістральних кільцевих тріщин (рис. 1), а також зменшити виборчий знос поверхні. Для обґрунтування такого вибору доцільно порівняти два близьких за складом матеріали. Перший отриманий при напавленні валків гарячої прокатки порошковим дротом ВЕЛТЕК-470 (%): 0,15 С, 0,9 Мn, 0,6 Si, 13,0 Cr, 2,1 Ni, 0,21 Nb, 0,25 V, який забезпечує в стані

наплавлення твердість до 40–48 HRC. Після відпустки ударна в'язкість, пластичність і міцність металу досягають значень: $KCV = 0,60$ МДж/м², $\psi = 53\%$, $\sigma_b = 660$ МПа, твердість 30 HRC. У той же час, застосування набагато більш дорогого порошкового дроту SK 742-SK дозволяє отримати в складі шва (%): 0,04 С, 1,3 Мн, 0,4 Si, 13,5 Cr, 3,3 Ni, 1,3 Мо, 0,1 Nb, 0,15 V, 0,08 N; твердість 42–44 HRC. Наплавлений метал після відпустки відрізняється значно більш високою ударною в'язкістю ($KCV = 1,0$ МДж/м²) і пластичністю ($\psi = 68\%$). Дуже низький вміст вуглецю в наплавленому шарі призводить до зменшення випадання карбідів на межі зерен при кристалізації ванни, а також при повторному нагріванні затверділого металу. На додаток до цього, введення до складу азоту призводить до утворення дисперсних нітридних сполук, які не випадають на межі зерен і рівномірно розподілені в структурі. Це дозволяє підвищити опір зародженню тріщин при циклічних тепловмінах [3].

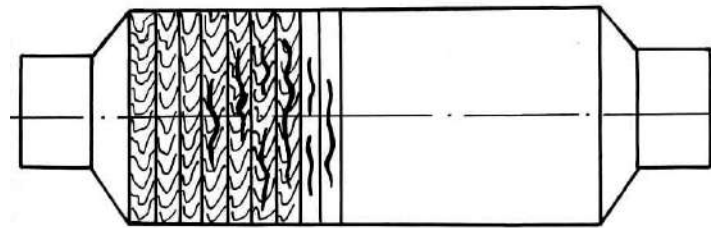


Рис. 1 – Схема утворення кільцевих магістральних тріщин на поверхні валка

Підвищити тріщиностійкість дозволяє формування наплавленого шару з швів, макрорізнорідна структура яких містить включення однакового з матрицею складу або складу, що відрізняється. Як показали дослідження [4], лита структура, матриця якої відповідає складу X7H5 і містить включення складу X4H2, відрізняється більш високими значеннями ударної в'язкості, а також коефіцієнта динамічної тріщиностійкості в порівнянні зі структурою металу однорідного складу. Однак поле напружень, що виникає при формуванні таких включень, не призводить до гальмування тріщини на межі матриці і включення (рис. 2).

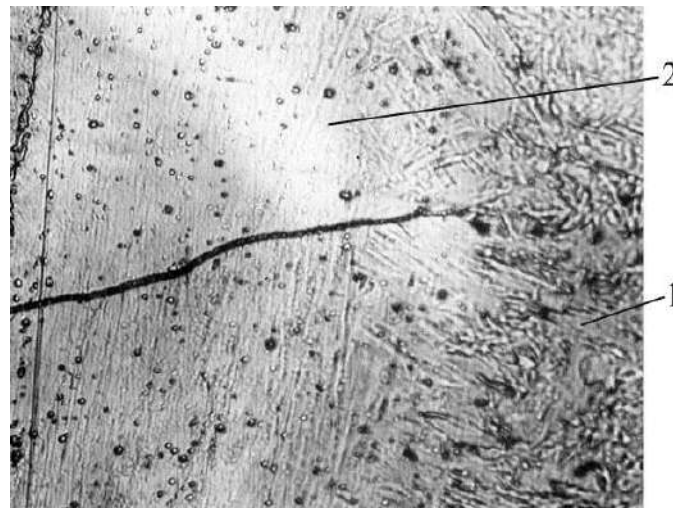


Рис. 2 – Перетинання тріщиною межі між матрицею і включенням (×500)

Мета статті – аналіз шляхів підвищення тріщиностійкості валків гарячої прокатки за рахунок вдосконалення технології наплавлення і її освоєння в промислових умовах.

Виклад основного матеріалу. Тріщиностійкість багатошарової композиції зростає зі зміною напрямку наплавлення швів в суміжних шарах (рис. 3, а), причому, схильність до розтріскування помітно нижче в шарах, наплавлених уздовж твірної бочки валка. Це підтверджується даними експериментів про зниження тангенціальних і поздовжніх напружень (на 14 і 70%, відповідно) при поздовжньому напавленні в порівнянні з напавленням по гвинтовій лінії, близькою до

кільцевої [5]. Підвищити опір розтріскуванню такої багатошарової композиції при наплавленні валків гарячої прокатки дозволяє наплавлення останнього шару вздовж твірної. У той же час, з метою зменшення ймовірності утворення дефектів, наплавлення першого шару (підшару) здійснюється по гвинтовій лінії з максимально можливим кроком, що забезпечує надійне покриття суміжних швів [6]. У той же час, підвищеним опором поширенню тріщини характеризуються композиції*, які в процесі наплавлення прокатних валків формуються як з однорідних, так і різноорідних за складом шарів, утворених швами з непрямої траєкторією укладання – зигзагоподібною, синусоїдальною, за схемою «перехресного намотування» (рис. 3, б). При цьому в межах кожного шару може відрізнятись склад суміжних швів і формуватись шар змінного складу [7]. Зазначене підвищення тріщиностійкості пов'язано, перш за все, з утворенням додаткових перешкод на шляху поширення тріщини. Додаткові бар'єри для тріщини при переході від шару до шару можуть створюватись за рахунок асиметричного укладання швів (отже, і меж між ними) (рис. 3, в). Більш того, оскільки межі між швами можуть бути причиною не тільки виборчого зносу, але і поширення термоутомлених тріщин, до зростання тріщиностійкості повинна призводити зміна орієнтації цих зон щодо магістрального напрямку розтріскування.

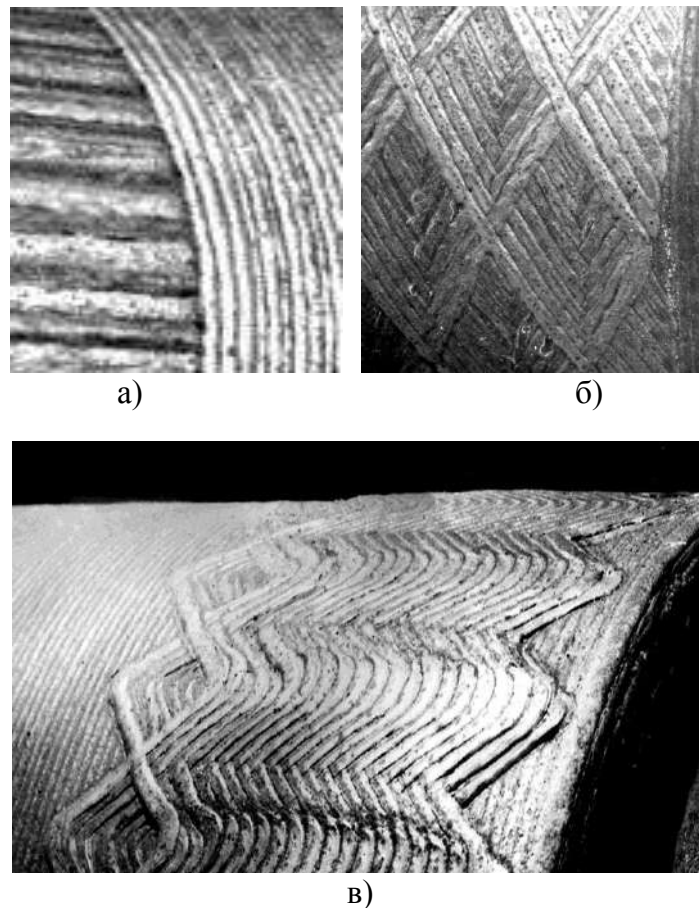


Рис. 3 – Утворення бар'єрів на шляху поширення тріщини при зміні напрямку наплавлення в суміжних шарах (а), формуванні шарів зі швів з траєкторією укладання за схемою «перехресного намотування» (б), синусоїдальною траєкторією з асиметричним положенням вершин синусоїди в суміжних шарах (в)

Не можна також не враховувати вплив на опір тріщиноутворенню періодичних відхилень траєкторії шва, які призводять до зміни напрямку росту кристалів і формування литого металу, що має дозволити отримати більш стійку до розтріскування розорієнтовану структуру шарів і композиції в цілому. Це узгоджується з результатами, отриманими в роботі [8], де дос-

* розроблені в галузевої лабораторії наплавлення ДВНЗ «ПДТУ»

ліджувався вплив на зносостійкість наплавленого металу умов формування кристалічної структури, орієнтації, розмірів і напрямку росту дендритів, а також супутньої цьому хімічної мікронеоднорідності. Результати проведених досліджень дозволили встановити взаємозв'язок напрямку росту, ступеня подрібнення дендритної структури і опору зносу складів металу типу 40Х3Г1С і 60Х4Г2С. Подальший розвиток дослідження отримали в роботі [9], де з огляду на вплив на зносостійкість напрямку росту кристалів в поверхневому шарі сталі 25Х5ФМС, наплавленої на опорні валки стану 2000, вибирався напрямок обертання валка в кліті. При збігу напрямку кристалізації і обертання валка, завдяки підвищенню стійкості проти зносу, напрацювання валків зростає в 1,3-1,4 рази. Аналізуючи причини руйнування роликів МБЛЗ діаметром 270 мм на комбінаті «Азовсталь», при проведенні механічних випробувань зразків виявлено, що ударна в'язкість зразків, вирізаних з робочого шару уздовж твірної, в 1,5-1,7 рази вище, ніж для металу вирізки в поперечному напрямку [10]. Оцінка опору термічним ударам наплавленого металу 18Х6ГМФС також підтверджує залежність результатів досліджень від напрямку дії навантаження по відношенню до напрямку росту кристалів [11]. Вплив дисперсності дендритної структури на інтенсивність руйнування наплавленого металу Ni-Cr-B-C-Si вивчався в роботі [12]. Встановлено, що в разі утворення грубої дендритної структури швидкість поверхневого руйнування зростає за рахунок викришування твердих надлишкових фаз. З урахуванням цих даних, змінюючи напрямок кристалізації в суміжних шарах, а в межах кожного шару – за рахунок непрямої траєкторії укладання швів, утворюються межі, які гальмують поширення тріщини.

При зустрічі з межею різномірних швів відбувається розгалуження магістральної тріщини, напрямок вторинної тріщини відхиляється від магістрального, а зниження її швидкості сприяє гальмуванню [4]. Імовірність гальмування тріщини зростає за рахунок взаємного перетину в однорідному наплавленому шарі, який формується з зигзагоподібних швів (рис. 4). Ще в більшій мірі опір поширенню тріщини зростає в неоднорідному шарі, який утворений зигзагоподібними швами, коли поєднуються два шляхи гальмування тріщини – за рахунок взаємного перетинання, а також на кордоні різномірних швів. Така роль меж швів і шарів в гальмуванні тріщини, в якійсь мірі, аналогічна ролі зварних швів, як гасителів тріщин, що розповсюджуються в спіральних трубах [12].

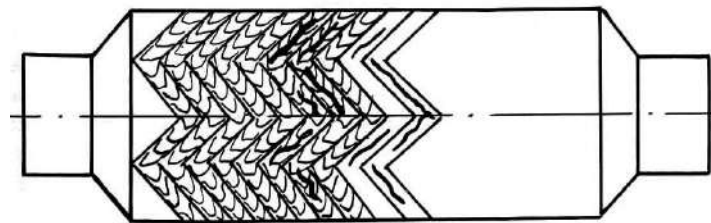


Рис. 4 – Схема запобігання утворенню магістральних кільцевих тріщин при їх взаємному перетині в шарі з швів з зигзагоподібною траєкторією укладання

Для узгодженої зміни по заданих функціональних залежностей вектора швидкості наплавлення і змінного хімічного складу шва (валика) доцільно використовувати модернізовану систему управління обладнанням для наплавлення [7]. Система управління наплавною установкою повинна забезпечити не тільки відпрацювання траєкторії переміщення електрода щодо поверхні, що наплавляється, але і управління приводами подачі електродів, складу яких відрізняються, без переналадження обладнання в процесі наплавлення. Функціональна схема управління (рис. 5) містить блок керування електроприводами, який дозволяє здійснювати зміну швидкості обертання кожного електродвигуна по необхідному закону, що задається контролером. В якості зворотнього зв'язку в стандартних приводах зварювального устаткування використовуються датчики кута повороту. Для управління швидкістю подачі електродів застосовуються крокові двигуни з інкрементними енкодерами.

Підтвердженням підвищення опору розтріскування при динамічному навантаженні багатшарових різномірних композицій, в тому числі наплавлених зигзагоподібними або синусоїдальними швами, служить порівняльна кількісна оцінка ударної в'язкості (KCV) і коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) наплавленого металу (рис. 6).

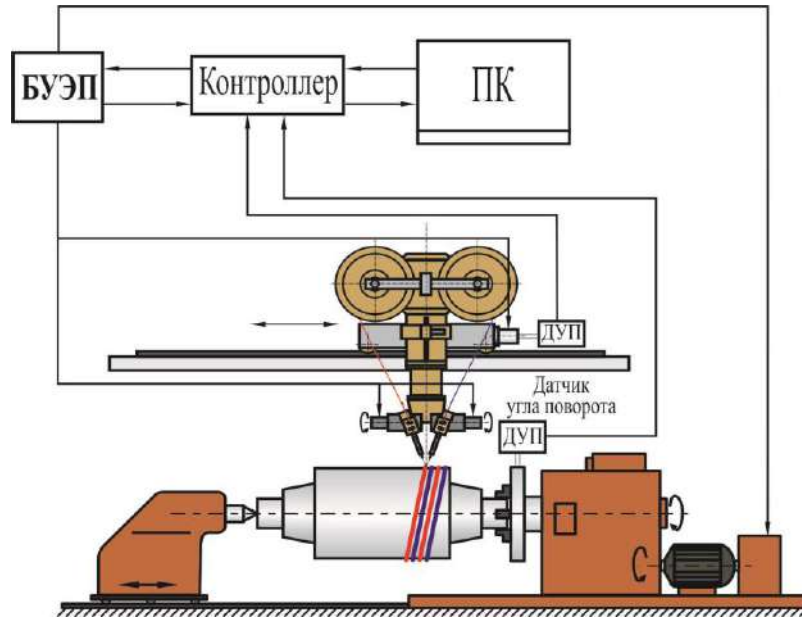


Рис. 5 – Функціональна схема системи управління процесом наплавлення композиції підвищеної тріщиностійкості

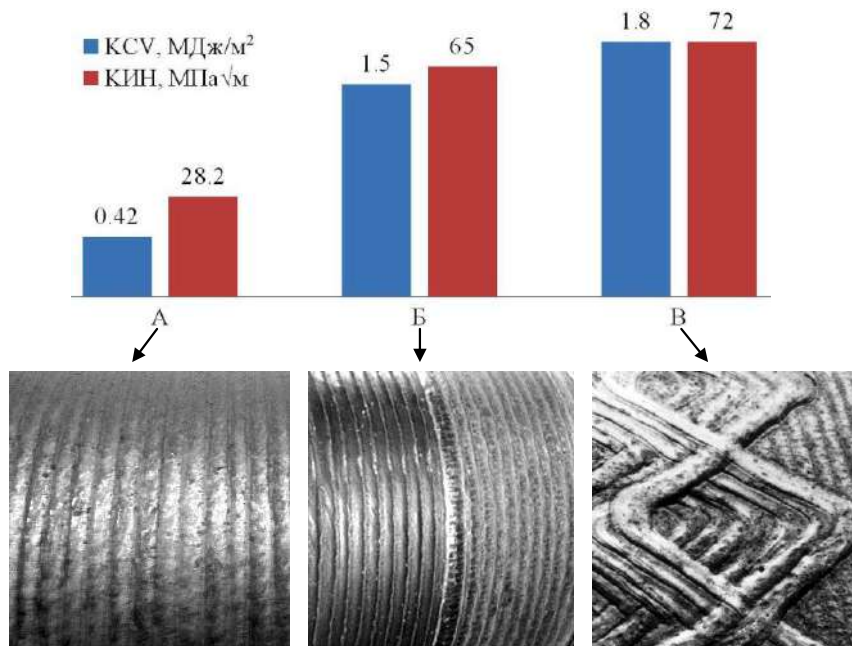


Рис. 6 – Характеристики динамічної тріщиностійкості композицій – ударна в'язкість (KCV) і коефіцієнт інтенсивності напружень (KIH): А – 18Х6ГМФС; Б, В – 18Х6ГМФС+12ГС+18Х6ГМФС

Висновки

1. Запобігти поширенню кільцевих тріщин при зміцненні валків гарячої прокатки дозволяє технологія наплавлення швами з непрямолінійною траєкторією укладання. Для тріщин, що розповсюджуються в таких швах, характерно взаємне перетинання, галуження і уповільнення.
2. Багатошарові композиції з шарів, які формуються з однорідних або різнорідних швів змінного складу і властивостей, що наплавляються на валки гарячої прокатки, характеризуються підвищеними значеннями ударної в'язкості і коефіцієнта інтенсивності напружень.
3. Розроблена і освоєна модифікована схема управління процесом наплавлення дозволяє узгодити зміну вектора швидкості наплавлення, а також хімічного складу по довжині шва.

Перелік використаних джерел:

1. Formation of the Mechanical Properties and Fracture Resistance Characteristics of Sandwich Composites Based on the 09G2S Steel and the EP678 High-Strength Steel of Various Dispersion / S.V. Gladkovsky [et al.] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2017. – Issue 6. – Pp. 71-90. – Mode of access: DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.071-090.
2. Structure and fatigue crack resistance of multilayer materials produced by explosive welding / I.A. Bataev [et al.] // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 287-290. – Pp. 108-111. – Mode of access: DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.287-290.108.
3. Особенности технологии наплавки для увеличения ресурса роликов машин непрерывного литья заготовок / Л.К. Лещинский [и др.] // *Сварочное производство*. – 2019. – № 12. – С. 46-50.
4. Лещинский Л.К. Слоистые наплавленные и упрочнённые композиции / Л.К. Лещинский, С.С. Самотугин. – Мариуполь : Новый мир, 2005. – 392 с.
5. Повышение трещиностойкости бандажированных опорных валков / С.В. Щетинин [и др.] // *Захист металургійних машин від поломок : Зб. наук. праць / ПДТУ*. – Мариуполь, 2010. – Вип. 12. – С. 226-230.
6. Пат. 92559 Україна, МПК В 23 К 9/04. Спосіб виготовлення прокатних валків / Л.К. Лещинський, К.К. Степнов, В.М. Матвієнко, В.О. Мазур, Ю.О. Степнова. – № u201402043; заявл. 28.02.2014; опубл. 26.08.2014, Бюл. № 16. – 5 с.
7. Иванов В.П. Моделирование технологии наплавления зносостойкого шару змінного хімічного складу / В.П. Иванов, Л.К. Лещинський, С.В. Щербаков // *Автоматичне зварювання*. – 2019. – № 11. – С. 40-45. – Режим доступу: DOI: 10.15407/as2019.11.06.
8. О химической неоднородности металла, наплавленного электродной лентой / Л.К. Лещинский [и др.] // *Сварочное производство*. – 1971. – № 1. – С. 28-29.
9. А. с. 1371727 СССР, МКИ В 21 В 28/02. Способ эксплуатации прокатного валка / А.И. Трайно, В.В. Ветер, Е.В. Юсупова, А.Д. Белянский, З.П. Каретный. – № 4080880/23-02; заявл. 27.06.86; опубл. 07.02.88, Бюл. № 5.
10. Гулаков С.В. Наплавка рабочего слоя с регламентированным распределением свойств / С.В. Гулаков, Б.И. Носовский. – Мариуполь : Издательство ПГТУ, 2005. – 170 с.
11. Шевченко О.И. Закономерности изменения свойств и структуры покрытий системы Ni-Cr-B-C-Si при наплавке и термической обработке / О.И. Шевченко // *Сварочное производство*. – 2002. – № 9. – С. 19-23.
12. Повышение прочностных характеристик спиральношовных труб конструкционного назначения / А.С. Письменный [и др.] // *Автоматическая сварка*. – 2012. – № 3. – С. 40-44.

References:

1. Gladkovsky S.V., Kuteneva S.V., Kamantsev I.S., Galeev R.M., Dvoynikov D.A. Formation of the Mechanical Properties and Fracture Resistance Characteristics of Sandwich Composites Based on the 09G2S Steel and the EP678 High-Strength Steel of Various Dispersion. *Diagnostics, Resources and Mechanics of materials and structures*, 2017, iss. 6, pp. 71-90. doi: 10.17804/2410-9908.2017.6.071-090.
2. Bataev I.A., Bataev A.A., Mali V.I., Burov V.G., Golovin E.D., Smirnov A., Prikhodko E.A. Structure and fatigue crack resistance of multilayer materials produced by explosive welding. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 287-290, pp. 108-111. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.287-290.108.
3. Leshchinskiy L.K., Matvienko V.N., Ivanov V.P., Vozyanov E.I., Karaulanov O.V. Osobennosti tehnologii naplavki dlja uvelichenija resursa rolikov mashin nepreryvnogo lit'ja zagotovok [Features of the deposition technology for the rollers resource increasing of the machines for continuous blanks casting]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, 2019, no. 12, pp. 46-50. (Rus.)
4. Leshchinskiy L.K., Samotugin S.S. Sloistye naplavlennye i uprochnjonnje kompozicii [Laminated deposited and hardened compositions]. Mariupol', Novyj mir Publ., 2005. 392 p. (Rus.)
5. Shhetinin S.V., Shhetinina V.I., Stepnov K.K., Zavarika N.G. Povyshenie treshhino-stojkosti bandazhированных опорных валков [Increasing the fracture toughness of shrouded backup rolls]. *Zahist metalurgijnih mashin vid polomok – Protection of metallurgical machines from breakdowns*, 2010, vol. 12, pp. 226-230. (Rus.)
6. Leshchinskiy L.K., Stepnov K.K., Matvienko V.N., Mazur V.O., Stepnova Iu.O. Sposib виготовлення-

- ja prokatnih valkiv* [A method of manufacturing rolling rolls]. Patent UA, no. 92559, 2014. (Ukr.)
7. Ivanov V.P., Leshhins'kij L.K., Shherbakov S.V. Modeljuvannja tehnologii naplavlennja znosostijkogo sharu zminnogo himichnogo skladu [Modeling the technology of deposition of a layer of variable chemical composition]. *Avtomatichne zvarjuvannja – Automatic Welding*, 2019, no. 11, pp. 40-45. doi: 10.15407/as2019.11.06. (Ukr.)
 8. Leshhinskij L.K., Lavrik P.F., Tarasov V.V., Macuka V.H. O himicheskoi neodnorodnosti metalla, naplavlennogo jelektrodnoj lentoi [About the chemical inhomogeneity of the metal deposited with the electrode strip]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, 1971, no. 1, pp. 28-29. (Rus.)
 9. Trajno A.I., Veter V.V., Jusupova E.V., Belianskii A.D., Karenyi Z.P. *Sposob jekspluatacii prokatnogo valka* [Method of operating the rolling roll]. Certificate of authorship USSR, no. 1371727, 1988. (Rus.)
 10. Gulakov S.V., Nosovskij B.I. *Naplavka rabocheho sloja s reglamentirovannym raspredeleniem svoystv* [Surfacing of a working layer with a regulated distribution of properties]. Mariupol', PGTU Publ., 2005. 170 p. (Rus.)
 11. Shevchenko O.I. Zakonomernosti izmenenija svoystv i struktury pokrytij sistemy Ni-Cr-B-C-Si pri naplavke i termicheskoi obrabotke [Regularities of changes in the properties and structure of coatings of the Ni-Cr-B-C-Si system during surfacing and heat treatment]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, 2002, no. 9, pp. 19-23. (Rus.)
 12. Pis'mennyi A.S., Prokof'ev A.S., Gubatiuk R.S., Pis'mennyi A.A., Polukhin V.V., Iukhimenko R.F., Gavrik A.R. Povyshenie prochnostnykh harakteristik spiral'nozhovnykh trub konstrukcionnogo naznachenija [Increase of strength characteristics of spirally-welded pipes for construction purposes]. *Avtomaticheskaja svarka – Automatic Welding*, 2012, no. 3, pp. 40-44. (Rus.)

Рецензент: С.В. Щетинін
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 18.10.2020

УДК 621.791.753.042

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226128

© Щетинін С.В.¹, Щетиніна В.І.², Никитенко П.В.³,
Елсаєд Халед⁴, Коваль О.В.⁵

УДАРНА В'ЯЗКІСТЬ ПРИ ОДНОСТОРОННЬОМУ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТРУБ ДЛЯ ГАЗО- І НАФТОПРОВІДНИХ МАГІСТРАЛЕЙ

Встановлені закономірності регулювання енергетичної характеристики зварювальної дуги, суми приелектродних падінь напруги і градієнта потенціалу в стовпі при різних способах зварювання. Розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, який забезпечує за рахунок аргону зниження суми приелектродних падінь напруги, градієнта потенціалу і напруги дуги, зменшення погонної енергії, тепловкладення, зварювальних напруг, подрібнення мікроструктури, саморегулювання дуги, стабільність процесу, підвищення якості і ударної в'язкості зварних з'єднань.

Ключові слова: ударна в'язкість зварних з'єднань, енергетична характеристика зварювальної дуги, погонна енергія, зварювальні напруги, здрібнення мікроструктури, одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей.

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

² д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

³ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

⁴ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

⁵ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

S.V. Shchetinin, V.I. Shchetinina, P.V. Nikitenko, Elsaed Khaled, O.V. Koval. Impact toughness in one-sided high-speed welding of the pipes for gas and oil pipelines. One-sided high-speed pipes welding for gas and oil pipelines, which are made of 10G2S1, 09G2S high-strength steels and are operated at high pressures and low temperatures, is limited with the difficulties to ensure the process stability, the welded joints and impact toughness. Therefore, the process development of one-sided high-speed pipes welding for gas and oil pipelines, which provides increase in the arc self-regulation, in the process stability, in the welded joints quality and in the impact toughness, is an important scientific and technical problem. An effective way to increase the welded joints impact toughness is high-speed welding at low heat input, which secures decrease in heat input into the base metal and in welding stresses, increase in the crystallization rate of the weld pool liquid metal and interatomic bonds, the microstructure refinement, the interatomic distance reduction. Energy minimum ensures process stability and welded joints impact toughness maximum. It has been found that at argon-arc welding, the static and the arc energy characteristics change, the near-electrode voltage drops sum decreases, as well as the arc column potential gradient, arc voltage, heat input, welding stresses, the interatomic distance; while interatomic bonds, arc self-regulation, stability process and welded joints impact toughness increase; the microstructure is refined. Argon-arc one-sided high-speed pipes welding for gas and oil pipelines process has been developed, which due to argon use, provides decrease in near-electrode voltage drops sum, in potential gradient and arc voltage, in heat input and heat energy, ensures welding stresses reduction, and welding baths liquid metal crystallization rate increase, microstructure grinding, increase in arc self-regulation, process stability, the quality increase as well as increase in welded joints impact toughness by 2-2,5 times.

Keywords: welded joints impact toughness, welding arc energy characteristics, heat input, welding stresses, microstructure grinding, argon-arc one-sided high-speed pipes welding for gas and oil pipelines.

Постановка проблеми. Одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, які виготовляються з високоміцних сталей типу 10Г2С1, 09Г2С, експлуатуються в умовах високих тисків і низьких температур, обмежено труднощами забезпечення стабільності процесу, формування і ударної в'язкості зварних з'єднань, особливо при низьких температурах. Тому розробка процесу одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, який забезпечує підвищення саморегулювання дуги, стабільності процесу, якості та ударної в'язкості зварних з'єднань, є важливою науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні визначається стабільністю процесу, тому для попередження витікання рідкого металу з ванни і утворення підрізів необхідно посилити процес саморегулювання дуги, особливо при зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей, коли зростає магнітне дуття [1-11]. Стабільність процесу порушується внаслідок відхилення дуги під дією поперечного магнітного поля зварювального струму, що протікає по трубі. Під дією електромагнітної сили дуга відхиляється в сторону меншого магнітного поля до природного обриву так, що дугу неможливо закрити флюсом. При цьому напруга зростає, струм падає. Електрод подається, закорочується на виріб і знову збуджується дуга. При закороченні на виріб струм зростає, напруга зменшується. Процес періодично повторюється. В результаті зміни режиму порушується формування швів, які стають нерівномірними по ширині і глибині проплавлення. Порушення стабільності процесу при зварюванні труб загальновідомо, проте процеси у дузі досліджено недостатньо [1-11].

Мета статті – вивчення природи регулювання енергетичної характеристики і розробка процесу одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, що забезпечує стабільність процесу, підвищення якості та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Виклад основного матеріалу. Процеси, які відбуваються в зварювальній ванні, залежать від дуги, яка розплавляє електроди і флюс. При зварюванні дуга визначає тепловкладен-

ня в основний метал, розподіл температури, магнітне поле, рух рідкого металу в ванні і формування швів. Тому дослідженням процесів в дузі приділяється велика увага [3]. При односторонньому зварюванні дуга занурюється в основний метал, посилюється охолодження, яке призводить до порушення стабільності процесу, яке визначається енергетичною характеристикою дуги.

Дуга – це електричний потужнострумний розряд в газах, який характеризується низькою напругою, високою щільністю струму у поверхні катода і високою концентрацією часток в катодній області [6]. У дузі розрізняють три області: катодну, анодну і стовп. Катодне падіння рухається по катоду. Стовп грає роль простого газового провідника, що з'єднує катодну пляму з анодом. Головна роль належить катоду [6], який забезпечує регенерацію зарядів. Допоміжна роль стовпа дуги підтверджується тим, що при зменшенні відстані між електродами ці частини розряду зникають, тоді як катодна пляма залишається поки існує дуговий розряд.

Під дією власного магнітного поля катодна пляма рухається по катоду [6]. При зварюванні плавленням переважає автоелектронна емісія, що підтверджується відсутністю зниження температури катода при підвищенні його емісійної здатності і отриманими І.Г. Кесаєвим високими значеннями щільності струму 10^{11} А/м^2 [6].

Кількість енергії, що виділяється в кожній з областей, визначається умовами існування дугового розряду:

$$q = IU_K + IU_A + IEL_D, \text{ Дж/с}, \quad (1)$$

де I – величина зварювального струму, А; U_K, U_A – катодне і анодне падіння напруги відповідно, В; E – градієнт потенціалу стовпа, В/м; L_D – довжина дуги, м.

Розподіл енергії в дузі визначає стабільність процесу, формування швів і ударну в'язкість зварних з'єднань. Електрод і основний метал розплавляються енергією, що виділена на катоді і аноді, яка визначається сумою приелектродних падінь напруги. Градієнт потенціалу стовпа дуги залежить від радіусу стовпа і питомої електричної провідності [3]:

$$E = \frac{I}{\pi R^2 \gamma}, \text{ В/м}, \quad (2)$$

де R – радіус стовпа, м; γ – питома електрична провідність, Ом^{-1} .

Найбільш повно енергетичні характеристики дуг, які впливають на розплавлення, перенесення електродного металу і формування швів, вивчені під час зварювання під флюсом Г.І. Лєсковим [7], за методикою якого визначали статичну характеристику дуги.

Дослідження впливу способу зварювання на статичну характеристику $U = f(ld)$ (рис.) проводили на спеціальній установці, яка забезпечує підйом електроду на задану відстань за допомогою потужної пружини. При цьому знімали на осцилограмі величину струму і напругу на дузі. Величина струму була 280-300 А, діаметр електрода $2 \cdot 10^{-3}$ м. Електрод закорочували на пластину, включали електросхему, осцилограф і високошвидкісну кінозйомку кінокамерою СКС-1М, яка фіксувала збудження дуги, підйом електрода на задану відстань за допомогою установки. Дослідження проводили під флюсом АН-348АМ, в аргоні, в середовищі вуглекислового газу, гелії на постійному струмі прямої полярності. В якості джерела живлення для підвищення стабільності малопотужних дуг застосовували два послідовно з'єднаних випрямляча, що забезпечують напругу холостого ходу $U_{xx} = 150 \text{ В}$.

Побудову статичних характеристик $U = f(ld)$ (рис.) виробляли шляхом вимірювання напруги по осцилограмі при заданій відстані між електродами. Зі збільшенням довжини дуги напруга зростає. Суму приелектродних падінь напруги і градієнта потенціалу в стовпі визначали шляхом вимірювання напруги при заданій відстані між електродами. Змінюючи відстань між електродами і вимірюючи напругу на дузі, шляхом екстраполяції залежності $U = f(ld)$ до нульового значення $ld = 0$ визначали суму приелектродних падінь напруги. Перехідні процеси в дузі протікають швидко $< 10^{-4}$ с, тому атмосфера дуги стає рівноважною до розплавлення електродів і зміни відстані між ними. Тому цей метод застосовано для вимірювання енергетичної характеристики дуги.

Встановлено (рис.), що при зварюванні під флюсом АН-348АМ сума приелектродних падінь напруги максимальна $U_{K+A} = 21$ В, в середовищі вуглекислого газу $U_{K+A} = 19$ В, в аргоні $U_{K+A} = 17$ В, в гелії $U_{K+A} = 11,5$ В. Градієнт потенціалу в стовпі дуги також максимальний при зварюванні під флюсом $E = 4,3$ В/мм, в середовищі вуглекислого газу $E = 2,8$ В/мм, в аргоні $E = 2,5$ В/мм, в гелії $E = 2,4$ В/мм. З підвищенням суми приелектродних падінь напруги та градієнту потенціалу стабільність процесу знижується. Тому для підвищення стабільності процесу, якості та ударної в'язкості зварних з'єднань найбільш доцільно використовувати зварювання в аргоні та гелії. З урахуванням високої ціни гелію для підвищення стабільності процесу необхідно проводити зварювання в аргоні, ціна якого значно нижче.

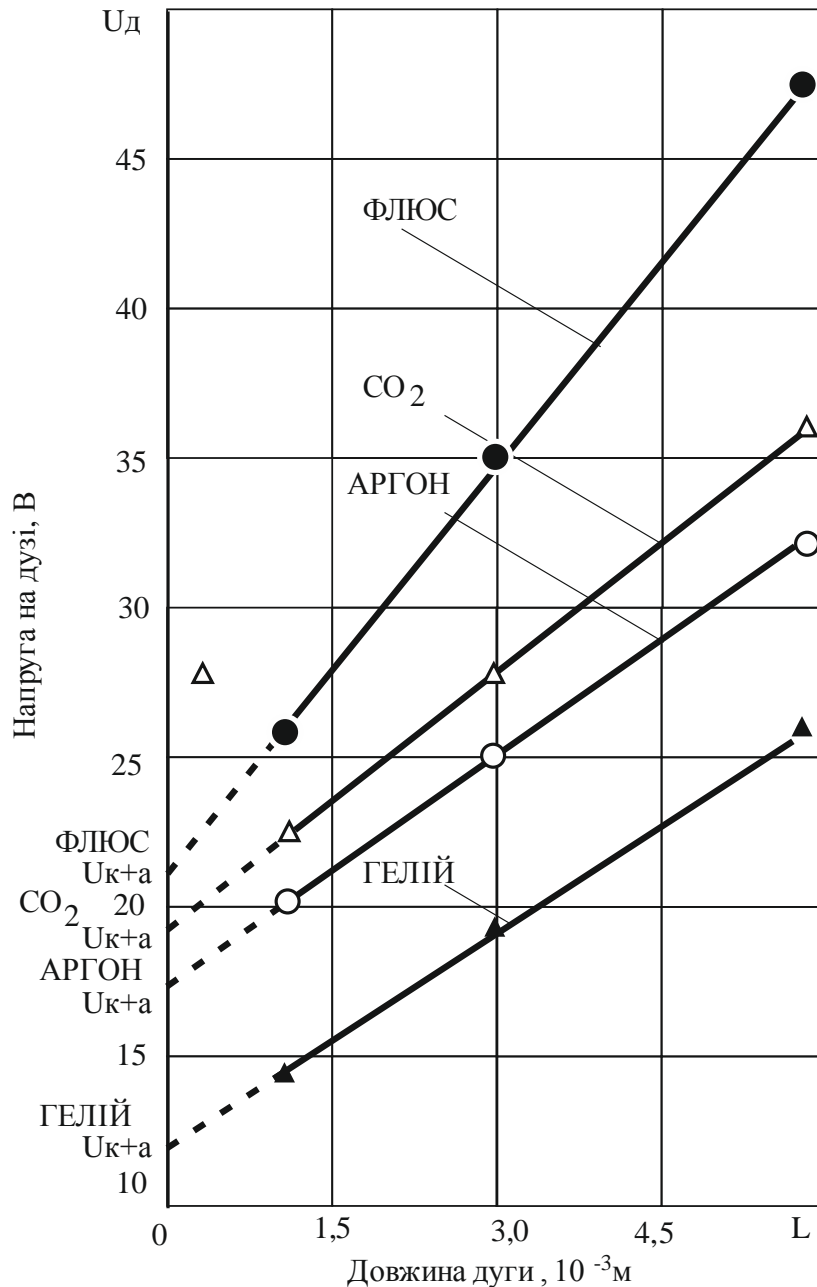


Рисунок – Енергетична характеристика зварювальної дуги

Процес зварювання в аргоні характеризується високою щільністю струму 100-120 А/мм², так як використовується електрод малих діаметрів, низьким значенням суми приелектродних падінь і градієнта потенціалу в дузі. Аргон – нейтральний газ, що попереджує вигорання легуючих елементів. Аргон знижує поверхневий натяг, забезпечує струменевий переніс крапель і

стабільність процесу, значно знижує розбрикування. Для попередження утворення водневих пор використовують суміш аргону 88% з вуглекислим газом 12%. Ціна аргону нижче, ніж вуглекислого газу.

Ефективним способом підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань є одностороннє високошвидкісне зварювання на низькій погонній енергії, що забезпечує зниження тепловкладення і зварювальних напруг, мінімальне порушення рівноваги в металі, здрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані та підвищення міжатомних зв'язків.

При аргонодуговому односторонньому високошвидкісному зварюванні зниження погонної енергії забезпечується за рахунок зниження суми приелектродних падінь напруги, градієнта потенціалу стовпа, напруги на дузі, зменшення діаметра електрода, підвищення щільності струму і ефективності тепловкладення. Зниження погонної енергії забезпечує зменшення зварювальних напруг, зростання швидкості кристалізації рідкого металу зварювальної ванни, здрібнення мікроструктури, підвищення міжатомних зв'язків і ударної в'язкості зварних з'єднань.

На основі встановлених закономірностей регулювання енергетичної характеристики дуги розроблено процес аргонодугового одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, який забезпечує стабільність процесу, якісне формування швів і підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань в 2-2,5 рази.

Розроблений процес аргонодугового одностороннього високошвидкісного зварювання і встановлені закономірності регулювання енергетичної характеристики дуги можуть бути використані при односторонньому високошвидкісному зварюванні котлів залізничних цистерн.

Подальші дослідження в даному напрямку є перспективними, так як дозволять розробити нові процеси одностороннього високошвидкісного зварювання, що забезпечують підвищення якості та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Висновки

1. Одностороннє зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, які виготовляються з високоміцних сталей типу 10Г2С1, 09Г2С і експлуатуються в умовах високих тисків і низьких температур, обмежено труднощами забезпечення стабільності процесу, якості і ударної в'язкості зварних з'єднань.

2. Ефективним способом підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань є зниження погонної енергії, що забезпечує зменшення тепловкладення, зварювальних напруг, подрібнення мікроструктури, зниження міжатомної відстані та зростання міжатомних зв'язків. Мінімум енергії – максимум ударної в'язкості зварних з'єднань.

3. Встановлено, що при аргонодуговому зварюванні змінюється енергетична характеристика дуги, знижується сума приелектродних падінь напруги, градієнт потенціалу в стовпі дуги, напруга на дузі, знижується погонна енергія, зварювальні напруги, зростає швидкість кристалізації рідкого металу зварювальної ванни, здрібнюється мікроструктура, підвищуються міжатомні зв'язки, саморегулювання дуги, стабільність процесу та ударна в'язкість зварних з'єднань.

4. Розроблено процес аргонодугового одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, який забезпечує за рахунок аргону зниження суми приелектродних падінь напруги, градієнта потенціалу і напруги дуги, зменшення погонної енергії, тепловкладення, зварювальних напруг, зростання швидкості кристалізації рідкого металу зварювальної ванни, подрібнення мікроструктури, саморегулювання дуги, стабільність процесу, підвищення якості і ударної в'язкості зварних з'єднань в 2-2,5 рази.

Перелік використаних джерел:

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. – М. : Наука, 1992. – 536 с.
2. Кривцун И.В. Комбинированные лазерно-дуговые процессы обработки материалов и устройства для их реализации : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.10 / Кривцун Игорь Витальевич; НАН Украины; Институт электросварки им. Е.О.Патона. – К., 2002. – 393 с.
3. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток / В.Л. Грановский. – М. : Наука, 1971. – 543 с.

4. Финкельбург В. Электрические дуги и термическая плазма / В.Финкельбург, Г. Меккер. – М. : Иностранная литература, 1961. – 369 с.
5. Кривцун И.В. Особенности токопереноса в анодной области дугового разряда / И.В. Кривцун, И.М. Парнета // Автоматическая сварка. – 1993. – № 3. – С. 28-30.
6. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги / И.Г. Кесаев. – М. : Наука, 1968. – 244 с.
7. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга / Г.И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 334 с.
8. Потапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом / А.Г. Потапьевский. – М. : Машиностроение, 1974. – 239 с.
9. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В.П. Черныш, В.Д. Кузнецов, А.Н. Брисман, Г.М. Шеленков. – К. : Техника, 1983. – 127 с.
10. Рижов Р.М. Магнітне керування якістю зварних з'єднань / Р.М. Рижов, В.Д. Кузнецов. – К. : Екотехнологія, 2010. – 288 с.
11. Черныш В.П. Зависимость параметров управляющего магнитного воздействия от энерговложения встык при дуговой сварке / В.П. Черныш, Р.Н. Рыжов //Автоматическая сварка. – 1998. – № 5. – С. 49-51.

References:

1. Raizer Yu.P. *Fizika gazovogo razriada* [Gas discharge physics]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 536 p. (Rus.)
2. Krivtsun I.V. *Kombinirovannye lazerno-dugovye protsessy obrabotki materialov i ustroistva dlia ikh realizatsii*. Diss. dokt. Techn. nauk [Combined laser-arc processes for processing materials and attachments for their implementation. Doct. tech. sci. diss.]. Kiev, 2002, 393 p. (Rus.)
3. Granovskiy V.L. *Elektricheskii tok v gaze. Ustanovivshiisia tok* [Electric current in gas. Steady-state current]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 543 p.
4. Finkelburg V., Mekker G. *Elektricheskie dugi i termicheskaiia plazma* [Electric arcs and thermal plasma]. Moscow, Inostrannaia literature Publ., 1961. 369 p. (Rus.)
5. Krivtsun I.V., Parneta I.M. Osobennosti tokoperenosa v anodnoi oblasti dugovogo razriada [Features of current transfer in the anodic area of the arc discharge]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 1993, no. 3, pp. 28-30. (Rus.)
6. Kesaev I.G. *Katodnye protsessy elektricheskoi dugi* [Cathodic processes of electric arc]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 244 p. (Rus.)
7. Leskov G.I. *Elektricheskaiia svarochnaia duga* [Electric welding arc]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 334 p. (Rus.)
8. Potapievsky A.G. *Svarka v zashchitnikh gazakh plaviashchimsia elektrodom* [Welding in protective gases with a consumable electrode]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 239 p. (Rus.)
9. Chernysh V.P., Kuznetsov V.D., Briskman A.N., Shelenkov G.M. *Svarka s elektromagnitnym peremeshivaniem* [Welding with electromagnetic stirring]. Kiev, Tekhnika Publ., 1983. 127 p. (Rus.)
10. Rzhov R.M., Kuznetsov V.D. *Magnitne keruvannia iakistiu zvarnikh z'ednan'* [Magnetic quality control of welded joints]. Kiev, Ekotekhnologiiia Publ., 2010. 288 p. (Ukr.)
11. Chernysh V.P., Rzhov R.N. Zavisimost' parametrov upravliaiushchego magnitnogo vozdeistviia ot energovlozheniia vстыk pri dugovoi svarke [Dependence of the parameters of the controlling magnetic effect on the butt-in energy input during arc welding]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 1998, no. 5, pp. 49-51. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самотугін
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 23.09.2020

© Щетинін С.В.¹, Щетиніна В.І.², Коваль О.В.³,
Никитенко П.В.⁴, Елсаед Халед⁵

ПІДВИЩЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ПРИ АРГОНОДУГОВОМУ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ НАПЛАВЛЕННІ НА НИЗЬКІЙ ПОГОННІЙ ЕНЕРГІЇ

Встановлено закономірності впливу концентрації дуги і енергії на магнітне поле зварювального струму і тріщиностійкість валків. Зі зменшенням діаметра електрода індукція магнітного поля зварювального струму, електромагнітна сила і магнітний тиск зростають, що приводить до збільшення пінч-ефекту, здрібненню мікроструктури і підвищенню тріщиностійкості. Розроблено процес аргонодугового високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, який забезпечує концентрацію дуги і енергії, зниження зварювальних напруг, здрібнення мікроструктури, попередження утворення тріщин, підвищення тріщиностійкості та зносостійкості валків.

Ключові слова: пінч-ефект, концентрація дуги і енергії, діаметр електрода, магнітне поле, зварювальні напруги, тріщиностійкість, аргонодугове високошвидкісне наплавлення на низькій погонній енергії.

S.V. Shchetinin, V.I. Shchetinina, O.V. Koval, P.V. Nikitenko, Elsaed Khaled. Crack resistance increase in argon arc high-speed welding at low heat input. The rolling mills are operated under high specific pressures, therefore the rolls are produced from high carbon steel 90HF, prone to hot and cold cracking. Therefore, crack resistance and wear resistance increase is an important scientific and technical problem. An effective way to increase crack resistance is arc and energy concentration, which increase the surfacing process. Arc concentration due to electrode diameter decrease provides increase in magnetic field induction, electromagnetic pressure of compression, pinch effect, the weld pool liquid metal crystallization speed, crack resistance and wear resistance. It also provides droplets and microstructure grinding, welding stresses reduction. It has been established that with the carbon content increase, the heat input decreases, thus ensuring heat input decrease, welding stresses reduction, liquid metal crystallization rate increase, microstructure grinding, the interatomic compression pressure and deposited metal crack resistance increase. The argon-arc high-speed surfacing at low heat input of roll necks with chromium-nickel wire, which provides arc and energy concentration, heat input and welding stresses reduction, crystallization rate increase, microstructure grinding, interatomic distance reduction, the pinch effect and interatomic pressures of compression enhancement, rolls crack resistance, wear resistance and durability increase, has been developed.

Keywords: pinch-effect, arc and energy concentration, electrode diameter, welding stresses, crack resistance, argon arc high-speed surfacing at low heat input.

Постановка проблеми. Валки прокатних станів, які експлуатуються в умовах високих питомих тисків, виготовляються з високовуглецевої сталі 90ХФ, схильної до утворення тріщин, що в значному ступені визначають зносостійкість. Тому підвищення тріщиностійкості та зносостійкості є важливою науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тріщиностійкість в значній мірі залежить від вмісту вуглецю в металі. З підвищенням вмісту вуглецю тріщиностійкість металу знижується,

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

² д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

³ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

⁴ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

⁵ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

що пов'язують з утворенням мартенситу, який характеризується високою твердістю, низькою пластичністю та великим об'ємом, приводить до значного зросту зварювальних напруг і утворення тріщин. Існують дві теорії утворення холодних тріщин – гартівна і воднева теорія, які пов'язують утворення тріщин з мартенситом. Гарячі тріщини, що утворюються при кристалізації, пов'язують з утворенням легкоплавкої евтектики FeS в температурному інтервалі крихкості, коли зварювальні напруги стають більше межі міцності. Загальновідомо, що при зменшенні погонної енергії, внаслідок зростання швидкості охолодження, підвищується вірогідність утворення холодних тріщин [1]. Зі зростанням ступеню легування зварювальних проволоч, зменшенням їх діаметра і використанням в якості захисного газу суміші на основі аргону підвищується негативний вплив водню і підвищених швидкостей охолодження зони термічного впливу з'єднань на їх опірність утворенню холодних тріщин. Однак М.М. Прохоров [1] відзначає, що значне зниження погонної енергії зварювання і відповідне зростання швидкості охолодження можуть призвести до зниження вірогідності утворення холодних тріщин. Дані впливу концентрації дуги і енергії на магнітне поле зварювального струму і тріщиностійкість наплавленого металу при високошвидкісному аргонодуговому наплавленні на низькій погонній енергії [1-11] відсутні.

Мета статті – вивчення механізму підвищення тріщиностійкості наплавленого металу за рахунок магнітного поля зварювального струму і розробка процесу аргонодугового високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії шийок валків.

Виклад основного матеріалу. При електродуговому зварюванні створюється електромагнітне поле зварювального струму, яке визначає процес зварювання. Магнітне поле при протіканні струму по провіднику вивчено Р.М. Уайтом [5]. Наявність сильного магнітного поля при зварюванні в області активної плями підтверджується тим, що дуга діє як насос, який всмоктує з навколишнього середовища повітря, що є діаманетиком, і втягує його в неоднорідне магнітне поле, розігріває і викидає в сторону виробів у вигляді потужних плазмових потоків зі швидкістю до 10^3 м/с [6]. Потужні плазмові потоки створюють тиск зварювальної дуги, який залежить від руху активної плями по торцю електрода. Однак магнітне поле зварювального струму досліджено недостатньо.

Для дослідження впливу концентрації дуги, швидкості наплавлення і погонної енергії на тріщиностійкість розроблена методика дослідження впливу діаметра дроту на магнітне поле зварювального струму, яка полягає в наступному. По зварювальному дроту різних діаметрів $(1,6; 2,8 \text{ і } 3,6) \cdot 10^{-3}$ м пропускається постійний струм величиною 300 А, і проводяться виміри індукції магнітного поля на поверхні дроту. Вимірювання виконувалися тесламетром EM4305.

В результаті встановлено, що зі зменшенням діаметра дроту індукція магнітного поля зростає відповідно з законом Біо-Савара, згідно якому індукція прямо пропорційна величині струму і обернено пропорційна відстані від провідника зі струмом (рис.):

$$B = \mu \frac{I}{2\pi R}, \text{ Т,} \quad (1)$$

де μ – магнітна проникність середовища, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; I – величина струму, А; R – відстань від провідника зі струмом, м.

На осі дроту індукція дорівнює нулю, при наближенні до поверхні зростає і досягає максимального значення на поверхні дроту. При зменшенні діаметра дроту від $3,6 \cdot 10^{-3}$ м до $1,6 \cdot 10^{-3}$ м максимальне значення індукції магнітного поля зварювального струму збільшилось з 0,033 Т до 0,075 Т. При видаленні від поверхні дроту індукція магнітного поля на початку різко, а потім менше, значно зменшується. При переході від однієї до іншої поверхні дуги індукція змінює напрямок на протилежне відповідно до напрямку силових ліній магнітного поля.

Експериментальні дані добре узгоджуються з розрахунковими значеннями, що підтверджує можливість використання розрахункових значень для визначення індукції магнітного поля зварювальної дуги.

Пропорційно індукції змінюється електромагнітна сила [6]:

$$F = IBL, \text{ Н,} \quad (2)$$

де B – індукція магнітного поля, Т; L – довжина дуги, м.

В квадратичній залежності від індукції змінюється магнітний тиск [7], який прямо пропорційний квадрату індукції магнітного поля і обернено пропорційний магнітній проникності середовища:

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{B^2}{2\mu}, \text{ Па.} \quad (3)$$

Магнітний тиск визначає пінч-ефект, який залежить від діаметра зварювального дроту та площі, по якій переміщується дуга, концентрацію дуги и тепловкладення.

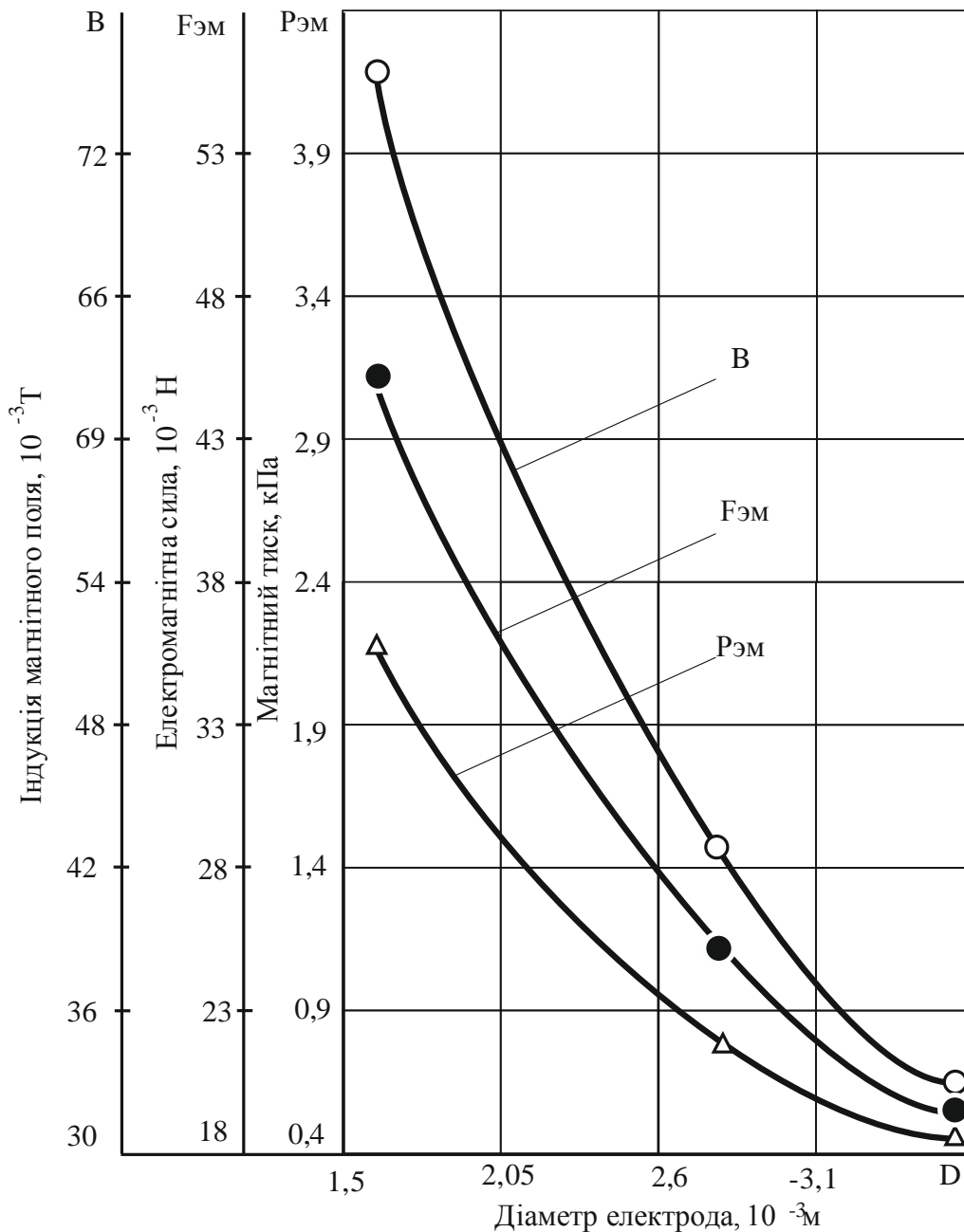


Рисунок – Залежність магнітного поля зварювальної дуги від діаметра електрода, величина струму 300 А

Пропорційно індукції зі зменшенням діаметра дроту зростає електромагнітна сила з 0,02 Н до 0,045 Н і підвищується з 0,43 кПа до 2, 24 кПа магнітний тиск, який визначає пінч-ефект і діаметр дуги (рис.).

З підвищенням пінч-ефекту посилюється електромагнітний тиск і відрив краплі з торця електрода, перенесення крапель стає дрібнокрапельним і струменевим. Перенесення крапель визначає товщину шару і швидкість кристалізації рідкого металу зварювальної ванни. Процес кристалізації рідкого металу періодичний, періодичність якого визначається перенесенням крапель. З посиленням пінч-ефекту і зменшенням розміру крапель товщина кристалізаційного шару знижується і тріщиностійкість наплавленого металу підвищується.

Ефективним способом підвищення тріщиностійкості є високошвидкісне наплавлення на низькій погонній енергії, що забезпечує зниження зварювальних напруг, подрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, зростання міжатомних зв'язків, природа яких електромагнітна.

Наплавлення в захисних газах є одним з найбільш ефективних процесів. Аргонодугове наплавлення характеризується низьким значенням суми приелектродних падінь напруги і градієнта потенціалу в стовпі дуги, високою щільністю струму, струменевим перенесенням металу, стабільністю процесу і якістю формування зварних швів. Аргонодугове наплавлення проводиться в суміші газів аргону і вуглекислого газу, що забезпечує відсутність пор за рахунок зв'язування водню киснем вуглецевого газу.

На основі встановлених закономірностей розроблено процес аргонодугового високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, який забезпечує зниження тепловкладення, зварювальних напруг, здрібнення мікроструктури, попередження утворення гарячих і холод-тріщин, підвищення тріщиностійкості та зносостійкості валків.

Встановлені закономірності впливу діаметра електрода на магнітне поле зварювального струму та розроблений процес аргонодугового високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії можуть бути використані при наплавленні робочих та опорних валків.

Подальше дослідження в даному напрямку є перспективним, так як дозволяє розробити нові процеси, що забезпечують підвищення тріщиностійкості та зносостійкості валків.

Висновки

1. Ефективним способом підвищення тріщиностійкості є концентрація дуги і енергії, яка підвищує ефективність процесу наплавлення. Концентрація дуги за рахунок зменшення діаметра електрода забезпечує зростання індукції магнітного поля, електромагнітного тиску стиснення, пінч-ефекту, подрібнення крапель і мікроструктури, зниження зварювальних напруг, підвищення швидкості кристалізації рідкого металу зварювальної ванни, тріщиностійкості і зносостійкості наплавленого металу.

2. Встановлено, що з підвищенням концентрації погонна енергія знижується, що забезпечує зменшення тепловкладення, зварювальних напруг, збільшення швидкості кристалізації рідкого металу, подрібнення мікроструктури, підвищення міжатомного тиску стиснення і тріщиностійкості наплавленого металу.

3. Ефективним способом зниження погонної енергії є аргонодугове наплавлення, при якому зменшуються діаметр електрода, зварювальний струм, тепловкладення, зварювальні напруги, здрібнюється мікроструктура і підвищується тріщиностійкість наплавленого металу. Мінімум енергії – максимум якості.

4. Розроблено процес високошвидкісного аргонодугового наплавлення на низькій погонній енергії шийок валків хромонікелевим дротом, який забезпечує концентрацію дуги і енергії, зниження тепловкладення і зварювальних напруг, збільшення швидкості кристалізації, подрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, посилення пінч-ефекту і міжатомних тисків стиснення, підвищення тріщиностійкості, зносостійкості і довговічності валків.

Перелік використаних джерел:

1. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металле при сварке : в 2 т. Т. 2. Внутренние напряжения, деформации и фазовые превращения / Н.Н. Прохоров. – М. : Металлургия, 1976. – 600 с.
2. Шоршоров М.Х. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке / М.Х. Шоршоров, В.В. Белов. – М. : Наука, 1972. – 228 с.
3. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов / И.А. Рябцев. – К. : Экотехнология,

2004. – 160 с.

4. Финкель В.М. Физика разрушения / В.М. Финкель. – М. : Metallurgiya, 1970. – 376 с.
5. Уайт Р.М. Квантовая теория магнетизма / Р.М. Уайт. – М. : Мир, 1972. – 306 с.
6. Финкельбург В. Электрические дуги и термическая плазма / В. Финкельбург, Г. Меккер. – М. : Иностранная литература, 1961. – 369 с.
7. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М. : Наука, 1969. – 824 с.
8. Николаев Г.А. Прочность сварных соединений и деформации конструкций / Г.А. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – М. : Высшая школа, 1982. – 272 с.
9. Винокуров В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В.А. Винокуров, А.Г. Григорьянц. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.
10. Влияние погонной энергии на образование отколов при наплавке высокоуглеродистой стали аустенитными проволоками / В.К. Каленский, Я.П. Черняк, В.Г. Васильев, Т.Г. Соломийчук // Автоматическая сварка. – 2001. – № 11. – С. 11-14.
11. Сулова Е.А. Влияние технологических факторов на склонность к образованию трещин / Е.А. Сулова, В.А. Игнатов, А.С. Зубченко // Сварочное производство. – 1990. – № 5. – С. 35-36.

References:

1. Prokhorov N.N. *Fizicheskie protsessy v metalle pri svarke. Tom 2: Vnutrennie napriazheniia, deformatsii i fazovye prevrashcheniia* [Physical processes in the metal during welding. Vol. 2: Internal stresses, deformations and phase transformations]. Moscow, Metallurgiiia Publ., 1976. 600 p. (Rus.)
2. Shorshorov M.H., Belov V.V. *Fazovye prevrashcheniia i izmeneniia svoistv stali pri svarke* [Phase transformations and changes in properties of the steel during welding]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 228 p. (Rus.)
3. Ryabtsev I.A. *Naplavka detalei mashin i mekhanizmov* [Surfacing of machine parts and mechanisms]. Kiev, Ekotekhnologiiia Publ., 2004. 160 p. (Rus.)
4. Finkel V.M. *Fizika razrusheniia* [Destruction Physics]. Moscow, Metallurgiiia Publ., 1970. 376 p. (Rus.)
5. White R.M. *Kvantovaia teoriia magnetizma* [Quantum theory of magnetism]. Moscow, Mir Publ., 1972. 306 p. (Rus.)
6. Finkelburg V., Mekker G. *Elektricheskie dugi i termicheskaia plazma* [Electric arcs and thermal plasma]. Moscow, Inostrannaia literature Publ., 1961. 369 p. (Rus.)
7. Abramovich G.N. *Prikladnaia gazovaia dinamika* [Applied Gas Dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 824 p. (Rus.)
8. Nikolaev G.A., Kurkin S.A., Vinokourov V.A. *Prochnost' svarnykh soedinenii i deformatsii konstruktssii* [Strength of welded joints and structural deformations]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1982. 272 p. (Rus.)
9. Vinokurov V.A., Grigoryants A.G. *Teoriia svarochnykh deformatsii i napriazhenii* [Theory of welding deformations and stresses]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 280 p. (Rus.)
10. Kalensky V.K., Chernyak J.P., Vasilyev V.G., Solomiychuk T.G. *Vliianie pogonnoi energii na obrazovanie otkolov pri naplavke vysokouglerodistoi stali austenitnymi provolokami* [Effect of heat input on the formation of splits in high steel deposition austenitic wires]. *Avtomaticheskaiia svarka – Automatic welding*, 2001, no. 11, pp. 11-14. (Rus.)
11. Suslova E.A., Ignatov V.A., Zubchenko A.S. *Vliianie tekhnologicheskikh faktorov na sklonnost' k obrazovaniiu treshchin* [Influence of technological factors on the crack susceptibility]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 1990, no. 5, pp. 35-36. (Rus.)

Рецензент: С.С. Самотугін
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 23.09.2020

УДК 669.187.56

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226182

© Білоник І.М.¹, Береговенко М.М.², Білоник Д.І.³, Капустян О.Є.⁴,
Смакограй А.Є.⁵, Шумикін С.О.⁶**ВИБІР МАТЕРІАЛУ І СПОСОБУ ЗМІЦНЕННЯ УДАРНОЇ ЧАСТИНИ
МОЛОТКІВ МЕХАНІЗМУ СТРУШУВАННЯ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРІВ**

У статті представлені дані про зміцнення молотків ударного механізму струшування осаджувальних і коронуючих електродів електрофільтрів електрошлаковим наплавленням. Огляд і аналіз публікацій у сфері газоочищення дозволив виявити сформовані тенденції до підвищення ефективності передачі ударного імпульсу механізму струшування електрофільтру шляхом зниження енерговитрат і збереження високої ефективності ударного імпульсу. Оскільки ефективність роботи ударного механізму струшування електрофільтру має обернену залежність від площі контакту бойка і хвилеводу, їх пластична деформація в процесі експлуатації призводить до зменшення амплітуди і збільшення тривалості ударного імпульсу, що негативно позначається на роботі механізму струшування електрофільтрів. Визнано необхідним прагнення забезпечувати точковий контакт в ударних механізмах. Проведено аналіз матеріалів, які можна доцільно рекомендувати для виготовлення ударної частини молотка. Представлений аналіз показників твердості та хімічного складу зносостійких матеріалів, які працюють в умовах ударного впливу і володіють задовільною зварюваністю з низьковуглецевими сталями. Показано, що використання нелегованих сталей вимагає застосування термічної обробки і також призводить до погіршення зварюваності. Економічно доцільними матеріалами для зміцнення молотка є електроди вітчизняного виробництва, які не містять дорогих легуючих елементів. Запропонована і аналітично обґрунтована система легування молотка ударного механізму з метою максимального підвищення коефіцієнта корисної дії електрофільтру при збільшенні експлуатаційної надійності молотків і зниженні їх вартості шляхом електрошлакового наплавлення порошковим електродом ударної частини на хвостовик.

Ключові слова: удар, твердість, зміцнення, електрошлакове наплавлення, молоток, порошковий електрод.

I.M. Bilonik, M.M. Berehovenko, D.I. Bilonik, O.Ye. Kapustian, A.H. Smakohrai, S.O. Shumikin. Selection of a material and a hardening method for the impact part of the hammers of the electrostatic precipitators shaking mechanism. The article presents data on the hardening of the hammers of the percussive mechanism of shaking the receiving and corona electrodes of electrostatic precipitators by electroslag surfacing. The review and analysis of publications in the field of gas purification made it possible to reveal the current trends towards an increase in the efficiency of impact impulse transmission of the electrostatic precipitator shaking mechanism by reducing energy consumption and maintaining a high efficiency of the impact impulse. Since the efficiency of the percussive mechanism for shaking the electrostatic precipitator is inversely related to the contact area of the striker and the waveguide, their plastic deformation during operation results

¹ канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-3873-5307, bilonikelena@gmail.com

² директор ТОВ КаЗБеГ, м. Кривий Ріг, aek@zntu.edu.ua

³ аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0003-3274-0604, bilonikelena@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-8979-8076, aek@zntu.edu.ua

⁵ головний енергетик, ТОВ КаЗБеГ, м. Кривий Ріг, aek@zntu.edu.ua

⁶ канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0003-3407-2507, Shusa1958@ukr.net

in a decrease in the amplitude and an increase in the impact impulse duration, which negatively affects the operation of the shaking mechanism of the electrostatic precipitators. The quest for ensuring point contact in percussive mechanisms has been recognized as necessary. The analysis of the materials recommended for the manufacture of the impact part of the hammer has been carried out. An analysis of the hardness and chemical composition indicators of wear-resistant materials from low-carbon steel operating under shock conditions and possessing satisfactory weldability has been presented. It has been shown that the use of unalloyed steel requires the use of heat treatment and results in a deterioration in weldability as well. As far as economy is concerned the home produced electrodes for hardening the hammer are the most advisable as they do not contain expensive alloying elements. An analytically substantiated system for alloying the hammer of the percussive mechanism has been proposed with the aim of maximizing the efficiency of the electrostatic precipitator while increasing the operational reliability of the hammers and reducing their cost by electroslag surfacing with a powder electrode of the impact part on the shank.

Keywords: *impact, hardness, hardening, electroslag surfacing, hammer, powder electrode.*

Постановка проблеми. В електричних осаджувальних фільтрах одним із основних вузлів є ударна система струшування осаджувальних електродів. Дана система складається з електромеханічного приводу, який обертає вал, на якому з певним кроком і кутом повороту розташовані молотки. При обертанні валу молотки за чергою, досягаючи критичної точки, по круговій траєкторії під власною вагою з прискоренням вільного падіння вдаряють об ковадла балок струшування. При цьому ударний імпульс передається через балки струшування на осаджувальні електроди і тим самим очищує їх від зібраного пилу. Аналогічно працює ударний механізм струшування коронуючих електродів [1].

Ефективність роботи ударного механізму струшування електрофільтру залежить не тільки від оптимальних енергокінематичних параметрів ударного впливу молотків на ковадлу балок струшування. Як показано в роботах [2-4], для всіх ударних механізмів потрібно забезпечувати максимальний коефіцієнт передачі енергії удару від бойка до хвилеводу. Ця вимога реалізується, якщо взаємодія контактуючих бойка і хвилеводу відбувається на мінімальній площі (точковий контакт). Зі збільшенням площі контакту коефіцієнт передачі енергії знижується [2, 5]. Слід також зазначити, що зі збільшенням площі контакту бойка і хвилеводу, які співударяються, змінюються параметри ударного імпульсу – зменшується амплітуда і збільшується тривалість. При цьому ефективність впливу ударного імпульсу на оброблюваний об'єкт знижується.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На рисунку 1 представлені молотки ударного механізму до експлуатації і після напрацювання 250×10^3 ударних циклів. Матеріал молотків: Сталь 20, 160...170 НВ. Як видно, первісна контактна поверхня молотка (рис. 1, а) зазнала пластичну деформацію і її площа істотно зросла (рис. 1, б).

Грунтуючись на класичних положеннях теорії удару [3, 5, 6], були розраховані коефіцієнти передачі енергії для представленого випадку (рис. 1). Новий молоток: площа контакту близько 10 мм^2 , коефіцієнт передачі енергії 0,9987. Молоток після напрацювання 250×10^3 ударних циклів: площа контакту близько 3500 мм^2 , коефіцієнт передачі енергії 0,8891. Визначимо енергетичні втрати, зумовлені збільшенням площі контакту. Даний молоток (рис. 1, б), згідно [7], повинен допрацювати до повного циклу експлуатації електрофільтру ще близько $(300...350) \times 10^3$ ударних циклів. Кінетична енергія одного ударного імпульсу (наприклад, для механізму фільтра ПДГС) становить 75 Дж [8]. Для нового молотка передана енергія одним імпульсом буде 74,90 Дж, для зношеного – 66,68 Дж. Величина втрати для одного удару становить 8,22 Дж. За цикл роботи $(300...350) \times 10^3$, який залишився до повного циклу експлуатації, втрати енергії на один молоток, в середньому, будуть 2671,5 кДж. Так як у фільтрах застосовують зазвичай 200-300 молотків, то загальні втрати, в середньому, складуть 801,45 МДж (0,234 МВт).

Крім того, як було зазначено вище, зі збільшенням площі контакту молотка з ковадлом балки струшування, які співударяються, ефективність дії ударного імпульсу знижується. Це негативно позначається на очищенні як осаджувальних, так і коронуючих електродів.

Мета дослідження – підвищення ефективності роботи механізму струшування електро-

фільтру шляхом формування ударної частини молотка матеріалом, який володіє підвищеною стійкістю до пластичної деформації в умовах дії ударних навантажень та забезпечує мінімальну і незмінну площу ударного контакту молотка з ковадлом балки струшування протягом усього циклу експлуатації.

Для цього необхідно:

- 1) провести аналіз матеріалів, які можна рекомендувати для виготовлення ударної частини молотка;
- 2) вибрати матеріал і спосіб зміцнення ударної частини молотків;
- 3) виготовити дослідні зразки молотків із зміцненою ударною частиною;
- 4) дослідити структуру і властивості металу зміцненої частини молотка;
- 5) провести випробування молотків із зміцненою ударною частиною;
- 6) дати рекомендації для промислового застосування молотків із зміцненою ударною частиною.

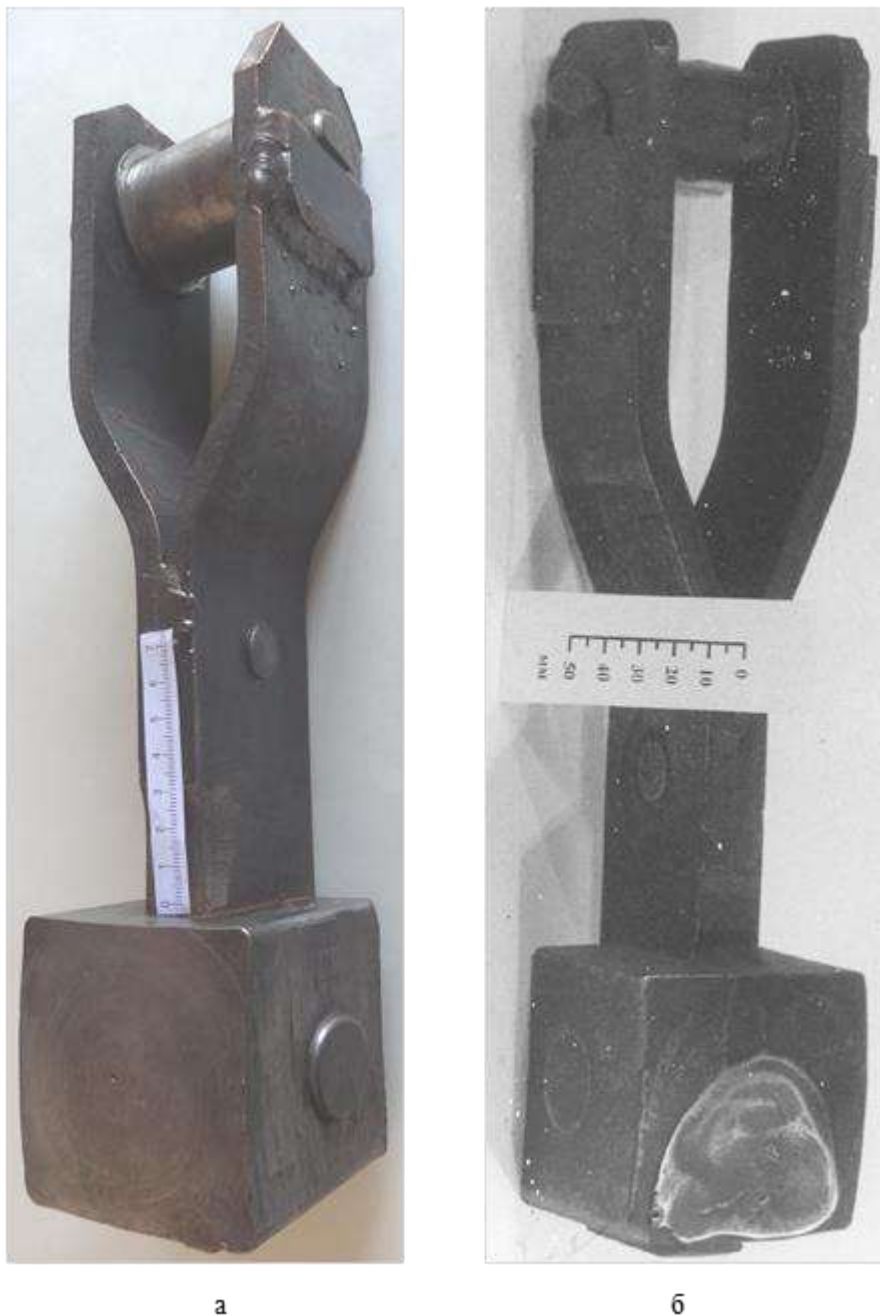


Рис. 1 – Молоток до експлуатації (а) і після напрацювання 250×10^3 циклів (б)

Виклад основного матеріалу. Для зміцнення ударної частини молотків рекомендуються матеріали, які володіють твердістю 30-35 HRC, гарною зварюваністю і зносостійкістю в умовах дії ударних навантажень і тертя метал по металу [8, 9].

До таких матеріалів можна віднести сталі з вмістом вуглецю 0,20-0,45% – Сталі 20, 30, 35, 45. Однак, для даних сталей отримати зазначену твердість можна тільки термічною обробкою, і також слід врахувати, що підвищення вмісту вуглецю погіршує зварюваність.

Розглянемо зносостійкі матеріали, які працюють в умовах ударного впливу і володіють задовільною зварюваністю з низьковуглецевими сталями. Таким вимогам, наприклад, відповідають матеріали для наплавлення фірми Lincoln Electric і, зокрема, Wearshield ABR, а також Wearshield BU-30, які добре чинять опір ударним навантаженням і помірному абразивному впливу.

Для наплавлення, що зміцнює ударну частину молотка, можна рекомендувати матеріали фірми Esab. Такі, як ОК Weartrode 50 або Weartrode 45, або Weartrode 35. Наплавлений метал добре зарекомендував себе при дії ударних навантажень і абразивному зносі. Провідним українським виробником зносостійких наплавочних матеріалів є фірма ТОВ «ТМ ВЕЛТЕК». Для наплавлення, що зміцнює ударну частину молотка, можна застосувати матеріали ВЕЛТЕК-Н290, ВЕЛТЕК-Н350-PM або ВЕЛТЕК-Н370-PM (табл.).

Таблиця

Хімічний склад і твердість наплавленого металу [10-12]

Марка	Хімічний склад наплавленого металу, мас. %						Твердість, HRC
	C	Mn	Si	Cr	Mo	інші	
Wearshield ABR [10]	0,2	1,1	0,75	6,5	0,40	-	28-53
Wearshield BU-30 [10]	0,16	0,87	1,14	1,49	0,58	-	32-38
ОК Weartrode 35 [11]	0,09	0,9	0,8	3,0	-	-	32
ОК Weartrode 45 [11]	0,3	2,0	0,8	1,3	-	-	45
ОК Weartrode 50 [11]	0,46	0,4	0,5	6,0	0,5	-	>45
ВЕЛТЕК-Н290 [12]	0,1	0,6	0,5	0,5	0,5	0,3 Ni	24-30
ВЕЛТЕК-Н350-PM [12]	0,2	1,2	0,8	1,1	0,4	-	34-44
ВЕЛТЕК-Н370-PM [12]	0,15	0,6	0,8	3,0	1,2	0,4 V	30-42
ОЗН-300М	0,10	3,0	1,3	-	-	-	30-35

Слід зазначити, що всі вище розглянуті матеріали хоча і забезпечують необхідну твердість 280-320 НВ, але їх застосування вимагає додаткової термічної обробки або вони містять дорогі легуючі елементи, такі як хром, молібден, нікель (Wearshield ABR, Велтек-Н290).

Більш економічним матеріалом для наплавлення є дріт Нп-85 (ДСТУ 10543-82). Незважаючи на те, що наплавлений метал такими дротами має необхідну твердість 260-340 НВ, його застосування обмежено для експлуатації в умовах ударних навантажень.

Відомий матеріал для наплавлення ОЗН-300М, який не містить дорогих легуючих елементів і має гарну зварюваність, рекомендований для наплавлення деталей з вуглецевих і низьколегованих сталей, які працюють в умовах дії інтенсивних ударних навантажень і тертя метал по металу. Даний матеріал володіє підвищеною стабільністю показників твердості і зносостійкості в широкому діапазоні швидкостей охолодження, що дозволяє застосовувати різні технології наплавлення при збереженні якісних показників. Перераховані вище характеристики стали підставою для зміцнення ударної частини молотків даним матеріалом.

Для проведення даної роботи вибрали молоток, конструкція якого представлена на рисунку 2. При виготовленні даних молотків за стандартною технологією застосовують Сталь 20.

З аналізу технологічності виготовлення молотка (рис. 2) доцільно операцію зміцнення ударної частини об'єднати з формуванням ударної частини електрошлаковим приплавленням (або ж вертикального ЕШН). При цьому, на хвостовик зі Сталі 20 (180×60×12 мм) наплавляють ударну частину (діаметром 105 мм і товщиною 50 мм). Схема процесу приведена на рисунку 3.

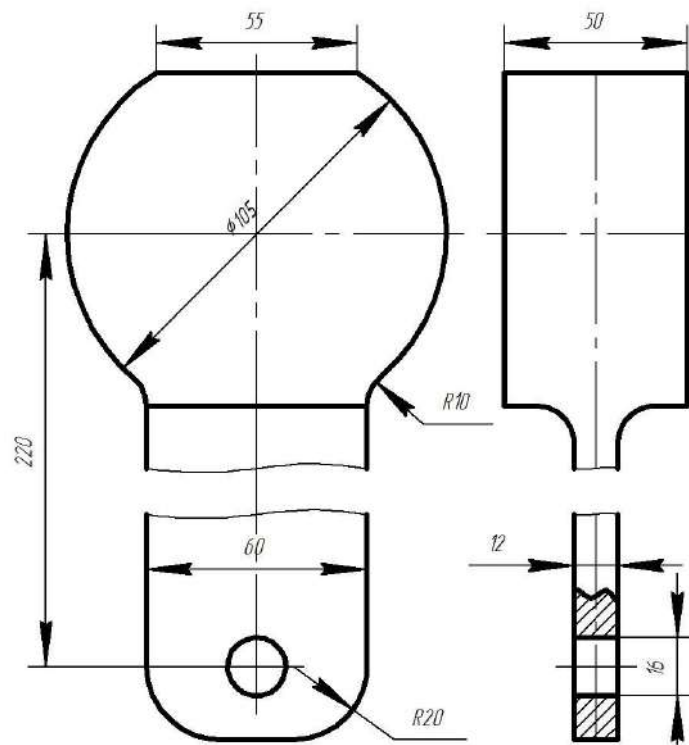


Рис. 2 – Конструкція молотка, який пропонується для зміцнення ЕШН ударної частини

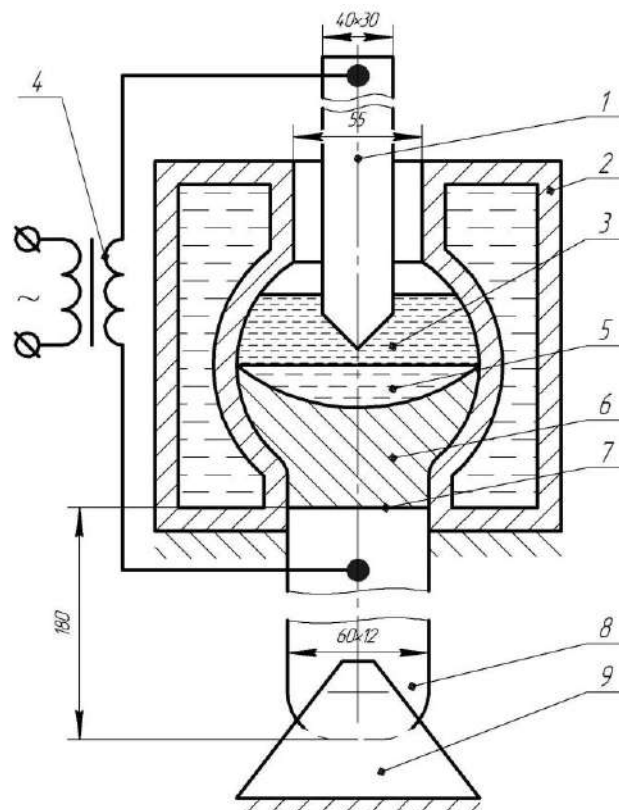


Рис. 3 – Схема процесу ЕШН: 1 – електрод, який витрачається; 2 – кристалізатор; 3 – шлакова ванна; 4 – джерело живлення; 5 – металева ванна; 6 – наплавлений метал ударної частини, який закристалізувався; 7 – зона сплавлення ударної частини з хвостовиком; 8 – хвостовик; 9 – фіксатор

Важливою перевагою литого електрошлакового металу є підвищена чистота за неметалевими включеннями, сіркою і фосфором, а також монолітність і висока щільність. Ці властивості забезпечують підвищену контактну витривалість [13], що збільшує опір зносу і пластичній деформації при ударній дії.

Необхідний хімічний склад наплавленого металу при ЕШН можна отримати наступним чином [14]:

1. Використовувати прокат сталей необхідного або близького до нього хімічного складу і при потребі ввести за допомогою дозаторів легуючі добавки на поверхню шлакової ванни. При цьому способі відбувається значний угар легуючих елементів.

2. Ввести легуючі добавки за допомогою лігатурного електрода суцільного перетину. Цей спосіб дає найкращі результати по розчиненню і засвоєнню легуючих елементів в металевій ванні. Однак, для отримання лігатурного електрода необхідно мати металургійний комплекс (плавильний агрегат, установка напівбезперервного лиття). Також немінучі втрати високолегованого металу при виготовленні лігатурного електрода.

3. В якості електрода, який витрачається, застосувати порошкову стрічку або коробчастий порошковий електрод, заповнений шихтою з лігатури або феросплавів. При даному випадку забезпечується точне дозування легуючих компонентів, висока однорідність хімічного складу наплавленого металу. Цей спосіб дозволяє отримувати широку гаму хімічних складів наплавленого металу [14].

Тому для ЕШН ударної частини молотків застосували коробчасті порошкові електроди, конструкція яких представлена на рисунку 4.

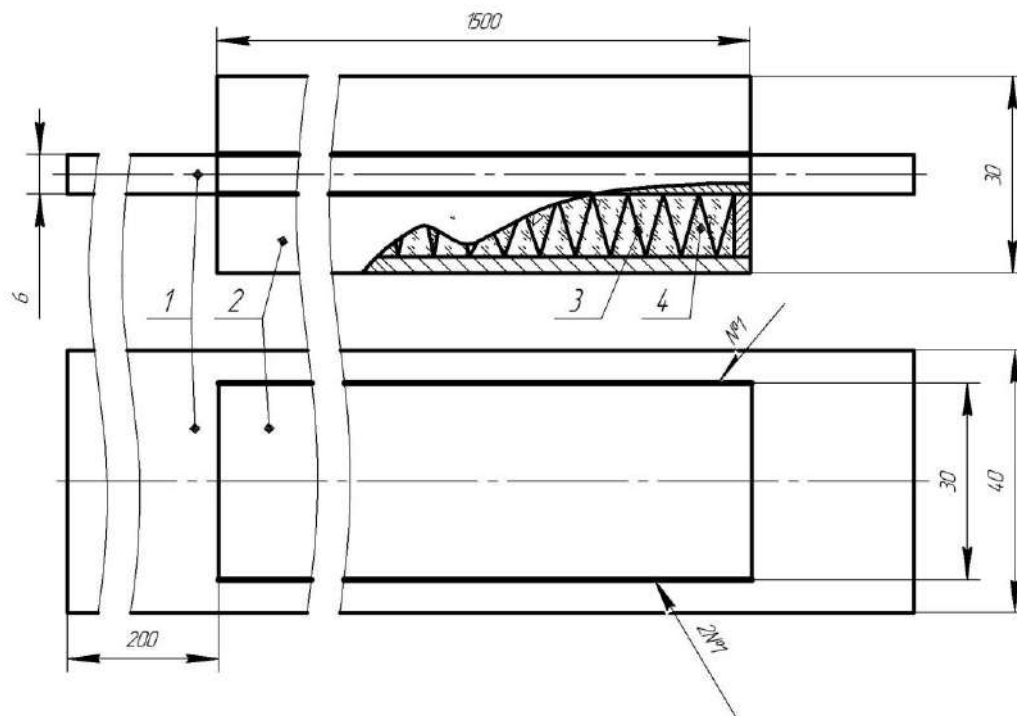


Рис. 4 – Порошковий електрод, який витрачається, для ЕШН: 1 – сердечник; 2 – коробчаста оболонка; 3 – металева вставка; 4 – шихта

Висновки

1. Встановлено: при експлуатації молотків, виготовлених із Сталі 20, відбувається пластична деформація і значне збільшення площі контактної частини, що призводить до підвищених енерговитрат у механізмі струшування електрофільтру.

2. В результаті аналізу матеріалів, які володіють підвищеною стійкістю до пластичної деформації, гарною зварюваністю і не містять дорогих легуючих елементів, запропоновано ударну частину молотків наплавляти металом наступного хімічного складу, %: 0,10 C; 3,00 Mn; 1,30 Si; 0,02 S; 0,03 P.

3. Обґрунтовано доцільність застосування електрошлакового процесу з використанням порошкового коробчастого електрода, який витрачається, для наплавлення ударної частини молотка.

Перелік використаних джерел:

1. Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов : справ. изд. / Г.М.-А. Алиев. – М. : Металлургия, 1986. – 544 с.
2. Билоник И.М. Определение силовых параметров взаимодействия бойка с наковальней в механизме встряхивания электрофильтра / И.М. Билоник, П.К. Штанько, А.С. Петрашев, А.А. Шумилов // Надежность и долговечность механизмов, элементов конструкций и биомеханических систем: тез. докл. XIV Междунар. науч.-техн. конф. – Севастополь, 2006. – С. 101-105.
3. Алимов О.Д. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах / О.Д. Алимов, В.К. Манжосов, В.Э. Еремьянц. – М. : Наука, 1985. – 354 с.
4. Манжосов В.К. Моделирование продольных ударов в стержневых системах : монография / В.К. Манжосов, В.В. Слепухин. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 208 с.
5. Зукас Дж. Динамика удара. Механика деформируемого твердого тела / Дж. Зукас. – М. : Мир, 1985. – 206 с.
6. Пановка Я.Г. Введение в теорию механического удара / Я.Г. Пановка. – М. : Наука, 1977. – 224 с.
7. Типовая инструкция по эксплуатации электрофильтров: РД 34.27.504-91. – М., 1993. – 44 с.
8. Чекалов Л.В. Практическая экотехника: электрическая и механическая очистка газов / Л.В. Чекалов. – Семибратово : Кондор-Эко, 2008. – 156 с.
9. Полевой С.Н. Упрочнение машиностроительных материалов: справочник / С.Н. Полевой, В.Д. Евдокимов. – М. : Машиностроение, 1994. – 496 с.
10. Lincoln Electric: Hardfacing products [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.lincolnelectric.com/en-us/consumables/hardfacing/Pages/hardfacing.aspx>.
11. Hardfacing electrodes [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.esabasia.com/asia/en/products/filler-metals/covered-stick-electrodes-smaw/hardfacing-electrodes/index.cfm>.
12. Порошковые дробы для наплавления производства ТОВ «ТМ ВЕЛТЕК» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://weldtech-group.com/ukr/surfacing>.
13. Электрошлаковый металл / под. ред. Б.Е. Патона, Б.И. Медовара. – К. : Наукова думка, 1981. – 680 с.
14. Калинин Н.А. Исследование характера оплавления электродного торца при электрошлаковой наплавке порошковым электродом / Н.А. Калинин, И.М. Билоник, П.К. Штанько, А.А. Шумилов // Вісник СевНТУ. – 2011. – Вип. 120. – С. 247-252. – (Серія : Механіка, енергетика, екологія).

References:

1. Alyev H. M.-A. *Tekhnika pyleulavlivaniia i ochistki promyshlennykh gazov* [Dust collection and cleaning technology of industrial gas]. Moscow, Metallurgii Publ., 1986. 544 p. (Rus.)
2. Bylonyk Y.M., Shtanko P.K., Petrashev A.S., Shumylov A.A. *Opredelenie silovykh parametrov vzaimodeistviia boika s nakovalnei v mekhanizme vstriakhivaniia elektrofiltra. Tezisy doklada XIV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhniceskoi konferentsii «Nadezhnost i dolgovechnost mekhanizmov, elementov konstrukticii i biomekhanicheskikh sistem»* [Abstracts of the 14th International Scientific and Technical Conference «Reliability and durability of mechanisms, structural elements and biomechanical systems»]. Sevastopol, 2006, pp. 101-105. (Rus.)
3. Alymov O.D., Manzhosov V.K., Eremiants V.E. *Udar. Rasprostranenie voln deformatsii v udarnykh sistemakh* [Hit. Propagation of deformation waves in shock systems]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 354 p. (Rus.)
4. Manzhosov V.K., Slepukhyn V.V. *Modelirovanie prodolnykh udarov v sterzhnevyykh sistemakh* [Simulation of longitudinal impacts in rod systems]. Ulianovsk, UIGTU Publ., 2011. 208 p. (Rus.)
5. Zukas Dzh. *Dinamika udara. Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Impact dynamics. Deformable Solid Mechanics]. Moscow, Mir Publ., 1985. 206 p. (Rus.)
6. Panovka Ya.H. *Vvedenie v teoriyu mekhanicheskogo udara* [Introduction to the theory of mechani-

- cal shock]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 224 p. (Rus.)
7. *РД 34.27.504-91. Типова інструкція по експлуатації електрофільтрів* [Typical operating instructions for electrostatic precipitators]. Moscow, 1993. 44 p. (Rus.)
 8. Chekalov L.V. *Prakticheskaia ekotekhnika: elektricheskaia i mekhanicheskaia ochistka gazov* [Practical eco-technology: electrical and mechanical gas cleaning]. Semibratovo, Kondor-Eko Publ., 2008. 156 p. (Rus.)
 9. Polevoi S.N., Evdokymov V.D. *Uprochnenie mashinostroitelnykh materialov* [Strengthening engineering materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1994. 496 p. (Rus.)
 10. *Lincoln Electric: Hardfacing products* Available at: <https://www.lincolnelectric.com/en-us/consumables/hardfacing/Pages/hardfacing.aspx> (accessed 12 September 2020).
 11. *Hardfacing electrodes* Available at: <https://www.esabasia.com/asia/en/products/filler-metals/covered-stick-electrodes-smaw/hardfacing-electrodes/index.cfm> (accessed 15 September 2020).
 12. *Poroshkovi droty dlia naplavlennia vyrobnytstva TOV «TM Veltek»* (Flux-cored wires for surfacing produced by ООО «TM Veltek») Available at: <https://weldtech-group.com/ukr/surfacing> (accessed 14 September 2020).
 13. Paton B.Ye., Medovar B.Y. *Elektroshlakovy metall* [Electroslag metal]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981. 680 p. (Rus.)
 14. Kalynyn N.A., Bylonyk Y.M., Shtanko P.K., Shumylov A.A. Issledovanie kharaktera oplavleniia elektrodnogo tortca pri elektroshlakovoi naplavke poroshkovym elektrodom [Investigation of electrode end fusion nature during electroslag surfacing with a powder electrode]. *Visnyk SevNTU. Serii: Mekhanika, enerhetyka, ekolohiia – Bulletin of SevNTU. Series: Mechanics, Energy, Ecology*, 2011, vol. 120, pp. 247-252. (Rus.)

Рецензент: О.А. Мітяєв

д-р техн. наук, проф., НУ «Запорізька політехніка»

Стаття надійшла 18.10.2020

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 622.781:622.788.3

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226183

© Чупринов Є.В.¹, Журавльов Ф.М.², Лялюк В.П.³,
Кассім Д.О.⁴, Шмельцер К.О.⁵**ОФЛЮСОВАНІ ЛОКАЛЬНІ СПЕКИ – ОГРУДКОВАНА ЗАЛІЗОРУДНА
МОНОСИРОВИНА ДЛЯ СУЧАСНОЇ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ**

Розроблено і випробувано технології отримання нових видів огрудкованого залізорудного матеріалу і моносировини для доменної плавки, що володіють кращими металургійними характеристиками агломерату і окатишів та мають в своєму складі підвищений вміст заліза і залишковий вуглець. Використання цього матеріалу в доменному виробництві дозволить істотно полішити техніко-економічні показники виплавки чавуну.

Ключові слова: агломерат, окатиші, локальні спеки, моносировина, залишковий вуглець.

E.V. Chuprinov, F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, D.O. Kassim, K.O. Shmeltser. Fluxed local cakes - lumped mono-raw materials for modern blast furnace. The technology of obtaining fluxed local cakes from iron ore concentrates of different degree of separation has been developed and tested. It has been shown that from one concentrate with different content of SiO₂ (1-10%) it is possible to produce fluxed local cakes consisting of a mixture of different basic raw pellets: low-basic – high-temperature and high-basic – low-temperature. Taking into account the positive effect of increasing the iron content in iron ore raw materials on the productivity of the blast furnace and the specific consumption of coke, a method for the production of fluxed local cakes with higher iron content than it is in the sinter and pellets, has been developed. The method is used for the production of fluxed local cakes with a high content of residual carbon due to the use of less scarce and cheap varieties of solid fuels instead of expensive and scarce metallurgical coke. Technological possibilities, indicators of production and metallurgical characteristics of fluxed local cakes have been analyzed. It has been shown that it is technologically possible to obtain a complex fluxed lumpy material with all these metallurgical characteristics, that is local cakes with high iron content and residual carbon. The technology for obtaining such material, which rationally and simultaneously used the above elements of technologies with some technological simplifications has been developed and tested. At the last stage the technology of obtaining mono-raw materials in the form of fluxed local cakes with rolling of a certain thickness shell from high-temperature charge on pieces of anthracite and metallized pellets to prevent their oxidation, which significantly reduces the oxidation of carbon in solid fuels and metallization, was developed.

¹ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-8605-3434, itcupa@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг

³ д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-7258-2079, vitalij.lyalyuk@gmail.com

⁴ д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-1750-1237

⁵ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-6830-8747

Keywords: *agglomerate, metallized pellets, local cakes, mono-raw materials, residual carbon.*

Постановка проблеми. Традиційні способи вдосконалення технології доменної плавки для підвищення продуктивності печі і зниження питомої витрати коксу в значній мірі вичерпані. Найбільш значимі з них були: збільшення обсягу доменних печей; вдування в фурми печей природного і коксового газів, мазуту, ПВП; збагачення дуття киснем; нагрів дуття до максимально необхідної температури; підвищення тиску газу на колошнику; заміна частини металургійного коксу кусковим антрацитом; автоматизація технології виплавки чавуну; поліпшення металургійних характеристик коксу і залізородного огрудкованого матеріалу та інші менш значущі чинники. Всі зазначені способи вдосконалення технології доменної плавки практично реалізовані в доменному виробництві за винятком одного – створення огрудкованої залізородної моносировини з необхідними для доменної плавки показниками комплексу металургійних характеристик [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними традиційними огрудкованими залізородними матеріалами в доменній плавці є офлюсований (основністю 0,1-1,8 одиниць) агломерат і неофлюсований або офлюсований (основністю 0,1-1,25 од.) окатиші. Кожен з цих матеріалів має позитивні і негативні, стосовно до використання в доменній плавці, характеристики в комплексі їх металургійних властивостей [2]. Принциповою відмінністю в технологіях виробництва агломерату та окатишів, що впливає на їх металургійні характеристики, є склад шихти і наявність в кінцевій структурі кількості продуктів, що утворилися при охолодженні різної кількості розплаву (30-60% при спіканні агломерату і 4-20% при обпаленні окатишів) в процесі термозміцнення.

Багатьма дослідниками розроблялися технології, що дозволяють поліпшити металургійні характеристики агломерату і обпалених окатишів, зокрема у роботах [3, 4]. Однак досягти металургійних характеристик, котрі б повністю відповідали вимогам доменної плавки, а також забезпечити оптимальні технологічні параметри їх промислового виробництва на працюючих потужностях, не представлялося можливим.

Для ефективної роботи доменної печі потрібен однорідний за хімічним складом і крупністю повністю офлюсований ($\text{CaO/SiO}_2 = 1,2-1,5$ од. для різних умов плавки) огрудкований (розміром 10-60 мм) залізородний матеріал з максимально високим економічно доцільним вмістом заліза, бажано з максимально допустимим для виробництва матеріалу вмістом залишкового вуглецю, мінімальним вмістом кремнезему і шкідливих домішок, а також з необхідними корисними добавками. Крім того, цей огрудкований залізородний матеріал повинен володіти всіма позитивними металургійними характеристиками агломерату та окатишів як в процесі механічних навантажень при складуванні, перевантажень і транспортування, так і в процесі фізико-хімічних перетворень при відновленні в доменній печі. Крім того, цей матеріал не повинен мати негативних металургійних характеристик агломерату та окатишів [5].

Мета статті – розробка технології отримання огрудкованої залізородної моносировини для сучасної доменної плавки.

Виклад основного матеріалу. Технологія отримання такого огрудкованого матеріалу розроблялася на основі формування шару сирих окатишів, що складається з двох шихт: з однієї шихти виготовляються окатиші з відносно високою (вище 1500°C) температурою плавлення, кількість яких в суміші має становити від 60 до 95%; з іншої шихти виготовляються окатиші з відносно низькою (нижче 1250°C) температурою плавлення, кількість яких в суміші має становити від 40 до 5%. Окатиші з високою температурою плавлення служать каркасом, що формує міцність окусованого матеріалу. Окатиші з низькою температурою плавлення є джерелом утворення розплаву, що рівномірно розподіляється в певних обсягах високотемпературних окатишів та скріплює їх після охолодження і формує шматки заданих розмірів [6, 7].

Всі технологічні випробування проводили з використанням напівпромислової установки, в яку входили бункера з дозаторами компонентів шихти, змішувач і огрудкувач шихти, футерована обпалювальна чаша корисними діаметром 300 мм і висотою 500 мм, з розробленою універсальною схемою газопотоків теплоносія, що дозволяє обробляти шар матеріалу з заданими температурою і вмістом в ньому кисню (рис.).

На першому етапі розробки нового продукту випробувана технологія отримання офлюсованих локальних спеків із залізорудних концентратів різного ступеня збагачення. Окаатиші з високою температурою плавлення отримували або з концентрату, що містить 1-10% SiO_2 і офлюсованого магнієвмісним вапняком до основності 0,1-0,7 од., або з концентрату, що містить 1-5% SiO_2 і офлюсованого магнієвмісним вапняком до необхідної основності готового продукту $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,2-1,5$ од. [6]. Окаатиші з низькою температурою плавлення отримували або з концентрату, що містить 1-10% SiO_2 і офлюсованого вапняком до основності $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 4,3-8,7$ од., що забезпечує задану основність всього огрудкованого матеріалу, або з концентрату, що містить 6-10% SiO_2 і офлюсованого вапняком до основності готового продукту $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,2-1,5$ од. Необхідну основність, крупність і міцність локальних спеків отримували шляхом вибору певного співвідношення високотемпературних і низькотемпературних (відповідно, 71-95% і 29-5%) сирих окаатишів в суміші перед їх термозміцненням. Крупність високотемпературних сирих окаатишів була 14-20 мм, а низькотемпературних – 8-14 мм. Суміш низько- і високотемпературних сирих окаатишів завантажувалася в агрегат для термообробки згідно наступного режиму: сушка – 350-450°C, нагрівання – 600-1200°C, високотемпературне обпалення – 1250-1350°C і охолодження – до 100-130°C. Швидкості нагріву до максимальної температури обпалення і охолодження до 100-130°C становили до 100°C/хв. Таким чином, з одного концентрату з різним вмістом SiO_2 (1-10%) можна виробляти офлюсовані локальні спеки з суміші різноосновних сирих окаатишів: низькоосновних – високотемпературних і високоосновних – низькотемпературних.

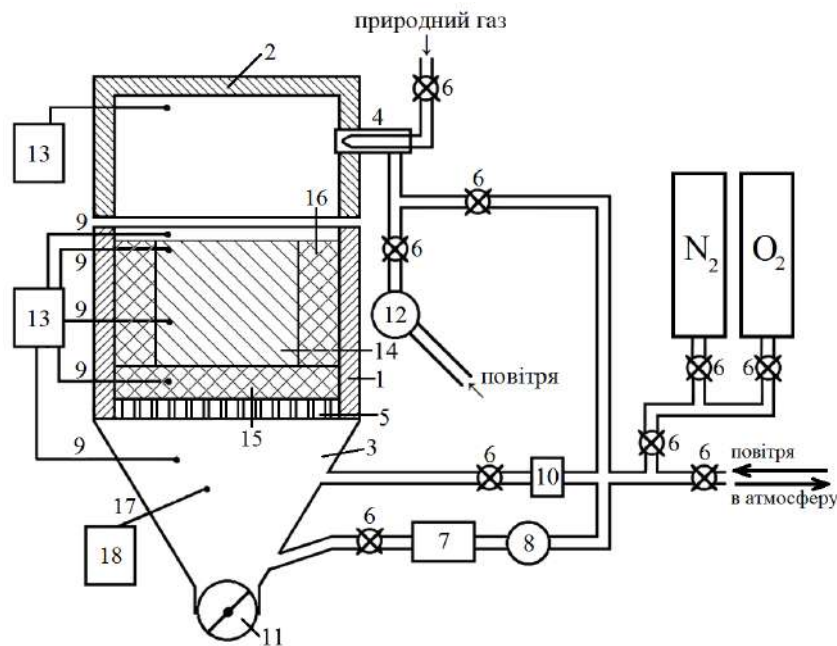


Рисунок – Технологічна схема установки для обпалення окаатишів: 1 – чаша для обпалення окаатишів; 2 – горн чаші; 3 – вакуум-камера чаші; 4 – пальник для спалювання газу; 5 – колосникова решітка чаші; 6 – запірні газова арматура; 7 – апарат для тонкої очистки та охолодження відпрацьованого газу, що відсмоктується; 8 – вакуум-насос; 9 – термопари для вимірювання температури; 10 – вентилятор для подачі в вакуум-камеру холодних повітря або відпрацьованих газів; 11 – затвор вакуум-камери для випуску твердих частинок; 12 – вентилятор повітря для пальника; 13 – потенціометр для вимірювання температури; 14 – шар окаатишів і локальних спеків, що обпалюються; 15 – донна постіль; 16 – бортова постіль; 17 – патрубок для відбору газу з вакуум-камери; 18 – вимірювач розрідження/тиску в вакуум-камері і газоаналізатор

Технологічні параметри та металургійні характеристики отриманих офлюсованих локальних спеків 1 показали, що при приблизно однаковій з виробництвом агломерату та окаатиша-

ми питомій продуктивності агрегатів і основності готового продукту, питома витрата енергоресурсів (теплоти і електроенергії) у виробництві локальних спеків 1 нижча ніж у агломерату і однакова з окатишами (табл. 1). Вміст заліза в локальних спеках 1 вище ніж в агломераті і однаковий з окатишами при однаковій основності. Гранулометричний склад готового продукту краще, а вміст дріб'язку нижче ніж у агломераті. Барабанна міцність в початковому стані і міцність при відновленні у локальних спеків 1 порівнянна з окатишами і вище ніж у агломерату. Показники газопроникності і усадки шару під час відновлення у локальних спеків 1 порівнянні з агломератом і краще ніж у окатишів. Середня кінцева ступінь відновлення всіх вивчених огрудкованих залізородних матеріалів (агломерат, окатиші, локальні спеки 1) практично однакова. Кут природного укосу у локальних спеків 1 аналогічний агломерату і коксу і вище ніж у окатишів.

Таблиця 1

Технологічні показники виробництва і металургійні характеристики промислових і розроблених огрудкованих залізородних матеріалів

Показники	Промислові офлюсовані агломерати в різних країнах	Промислові неофлюсовані і офлюсовані окатиші в різних країнах	Спеки 1. З концентратів з різним вмістом кремнезему, різною і однаковою основністю	Спеки 2. З підвищеним вмістом заліза без оболонки з високотемпературної шихти на металізованих окатишах
Питома продуктивність, т/(м ² ·год)	1,1-1,4 ¹	0,8-1,2 ²	0,9-1,2 ²	1,0-1,3 ²
Питома витрата теплоти, МДж/т	1947-2452	367-840	427-760	392-743
Питома витрата електроенергії, кВт·год/т	43,1-71,3	38,7-69,5	40,7-63,1	36,2-60,4
Вміст, %: Fe _{заг.}	51,2-64,1 ³	61,5-65,8 ³	63,5-64,8 ³	63,4-74,7 ³
FeO	9,1-15,6 ³	1,3-5,4 ³	7,6-15,2 ³	2,1-3,8 ³
SiO ₂	3,7-10,4	0,9-7,7	7,1-4,3	2,2-4,2
вуглецю	0	0	0	0
Основність (CaO/SiO ₂) готового продукту, од.	1,2-1,8	0,03-1,25	0,8-1,5	1,25-1,5
Вміст класів, %:				
60-100 мм	23,7-35,6	0	0	0
20-60 мм	34,3-55,9	0	82,4-73,5	85,3-72,4
5-20 мм	12,3-7,8	94,8-98,2	15,8-24,2	12,6-24,4
0-5 мм	20,4-8,1	5,2-1,8	1,8-2,3	2,1-3,2
Міцність на стиснення, кН/ок (ДСТУ ISO 4700:2005)	–	1,8-3,8	–	–
Міцність в барабані, % (ДСТУ ISO 3271:2005):				
на удар (+5 мм)	57,4-93,1	92,4-97,1	94,6-97,1	93,1-96,7
стиранність (0-0,5 мм)	13,6-2,6	5,8-1,1	3,2-2,6	3,8-2,9
Міцність при відновленні, % (ДСТУ 3202-95):				
міцність (+5 мм)	37,8-62,2	53,5-95,8	86,5-83,7	73,1-92,8
стиранність (0-0,5 мм)	10,4-9,8	4,7-2,1	6,3-4,8	4,3-3,6
Газопроникність і усадка шару при відновленні, (ДСТУ 3205-95):				
усадка шару, %	15-18	12-67	18,3-25,7	14-26
перепад тиску, Па	68-71	108-154	66-87	58-73
Кінцевий ступінь відновлення, % (ДСТУ 3204-95)	65,1-96,0	72,8-91,4	71,3-94,6	87,2-93,4
Кут природного укосу, град.	38-41	23-32	37-41	36-41

Продовження таблиці 1

Показники	Спеки 3. З підвищеним вмістом залишкового вуглецю ⁴	Спеки 4. З підвищеним вмістом заліза і залишкового вуглецю без оболонки з шихти	Спеки 5. З підвищеним вмістом заліза і залишкового вуглецю з оболонкою з шихти ⁴
Питома продуктивність, т/(м ² ·год)	1,0-1,5 ²	1,1-1,67 ²	1,1-1,7 ²
Питома витрата теплоти, МДж/т	402-816	391-728	393-725
Питома витрата електроенергії, кВт·год/т	39,1-58,7	37,4-59,5	37,2-59,3
Вміст, %: Fe _{заг.}	63,3-64,2 ³	63,5-74,8 ³	65,3-75,6 ³
FeO	3,8-5,7 ³	8,4-15,7 ³	7,6-13,2 ³
SiO ₂	6,3-3,8	2,3-4,1	2,1-4,3
вуглецю	1,8-3,5	1,6-2,5	1,9-3,8
Основність (CaO/SiO ₂) готового продукту, од.	1,25-1,5	1,25-1,5	1,25-1,5
Вміст класів, %:			
60-100 мм	0	0	0
20-60 мм	80,7-75,2	83,9-71,8	84,5-74,1
5-20 мм	16,8-21,5	13,9-24,8	13,1-22,7
0-5 мм	2,5-3,3	2,2-3,4	2,4-3,2
Міцність на стиснення, кН/ок (ДСТУ ISO 4700:2005)	–	–	–
Міцність в барабані, % (ДСТУ ISO 3271:2005):			
на удар (+5 мм)	91,3-93,2	96,0-96,5	95,8-96,6
стиранність (0-0,5 мм)	4,2-2,5	3,2-2,7	2,8-3,1
Міцність при відновленні, % (ДСТУ 3202-95):			
міцність (+5 мм)	79,5-94,6	90,7-93,1	89,9-93,2
стиранність (0-0,5 мм)	4,9-3,0	6,2-4,1	6,3-3,9
Газопроникність і усадка шару при відновленні, (ДСТУ 3205-95):			
усадка шару, %	16-21	13-19	14-19
перепад тиску, Па	62-73	60-72	61-70
Кінцевий ступінь відновлення, % (ДСТУ 3204-95)	90,1-93,3	85,3-87,1	85,8-87,4
Кут природного укусу, град.	38-41	36-42	37-42

¹ – робоча площа агломашини включає тільки зону спікання, без зони охолодження;

² – робоча площа обпалювальної машини включає зони сушки, нагріву, випалу і охолодження;

³ – вміст заліза в залізовмісній частині огрудкованого матеріалу;

⁴ – оболонка з високотемпературної шихти накочується на шматочки антрациту і металізовані окатиші.

На другому етапі випробувань, враховуючи позитивний вплив збільшення вмісту заліза в залізородній сировині на продуктивність доменної печі і питому витрату коксу, розроблений спосіб виробництва офлюсованих локальних спеків з підвищеним, ніж в агломераті і окатишах, вмістом заліза. Суть методу полягала в роздільному дозуванні компонентів в дві шихти з відповідно високою і низькою температурами їх плавлення. Високотемпературна частина шихти складалася з металізованих окатишів або металізованої кускової руди зі ступенем металізації від 5% до 95% і розміром 10-20 мм при їх масовій кількості в суміші з другою частиною шихти (низькотемпературними сирими окатишами), рівній 60-80%. Температура плавлення цієї частини шихти становить понад 1500°C. Використання металізованих залізовмісних матеріалів

дозволяє підвищити вміст заліза в офлюсованому огрудкованому матеріалі без залежності від вмісту заліза в вихідному залізовмісному (залізородному концентраті, руді) матеріалі, а ступінь їх металізації і кількість в суміші визначається економічною доцільністю процесу виробництва чавуну.

Шихта для отримання сирих офлюсованих окатишів з низькою температурою плавлення складалася з тонкоподрібнених залізородного концентрату, флюсу, сполучної добавки і, при необхідності, твердого палива. Основність (CaO/SiO_2) в цій частині шихти підтримували понад 2,1 од., використовуючи в якості флюсу вапняк та враховуючи основність металізованих окатишів, що забезпечує задану основність всього одержуваного огрудкованого матеріалу (1,2-1,5 од.), необхідну для доменної плавки. З цієї шихти отримували сирі окатиші, причому крупність цих сирих окатишів з низькою температурою плавлення була 8-14 мм, а їх масова кількість в суміші з металізованими окатишами становила 40-20%. Температура плавлення цієї частини шихти в окислювальній або безокисній атмосфері становила 1140-1180°C. Перед термозміцненням високотемпературні (металізовані) і низькотемпературні сирі окатиші змішували, завантажували у обпалювальну чашу і піддавали термозміцненню за описаним вище режимом. Причому, при нагріванні, високотемпературному обпаленні і охолодженні готового продукту для оберігання від окислення металізованих окатишів використовувався газоподібний забаластований теплоносій з мінімальним вмістом кисню, що отримується в обпалювальній чаші, із спеціально реконструйованою для цієї мети схемою газопотоків теплоносія (див. рис.).

Таким чином, результати випробувань показали, що розроблені офлюсовані локальні спеки 2 володіють кращими металургійними характеристиками агломерату та окатишів (див. табл. 1) і мають при цьому більш високий вміст заліза, що задовольняє сучасним вимогам доменної плавки [6, 7].

При аналізі змін показників плавки часто користуються зведеннями нормованих коефіцієнтів підрахунку витрати коксу і продуктивності печі, складеними за різними даними. Недоліком таких зведень є невзаємопов'язаність коефіцієнтів, що призводить до погрешностей в їх абсолютних значеннях і повторному обліку окремих компонентів ефектів при перерахунку відповідно до різних факторів. Для правильного обліку чинників при аналізі показників доменної плавки необхідно використовувати спеціальні прийоми, які є складовою частиною методики, представленої в роботі [8]. Методика призначена для аналізу змін питомої витрати коксу і продуктивності доменних печей під впливом змін технологічних параметрів доменної плавки. Такий аналіз виконується при зіставленні періодів роботи доменних печей з різними значеннями технологічних параметрів доменної плавки, що визначають величини питомої витрати коксу і продуктивності (пофакторний аналіз). В основі цього аналізу лежать кількісні співвідношення між зміненими параметрами (факторами) і питомою витратою коксу (продуктивністю доменних печей), які визначаються емпірично або аналітично. Характер його визначається загальними принципами взаємозв'язку параметрів доменної плавки, виходячи з яких, оцінка величини впливу кожного параметра на витрату коксу і продуктивність повинна проводитися в залежності від абсолютного значення величини параметра (чим вона вища, тим менше величина впливу), поєднання з іншими параметрами (одні підсилюють, інші – послаблюють вплив), загальної рівня досконалості процесу (чим він вищий, тим менше величина впливу всіх параметрів).

Результати розрахунку показників доменної плавки згідно описаної вище методики при використанні цієї сировини (табл. 2, спеки 2) показали збільшення продуктивності доменної печі в порівнянні з базовим періодом на 20,1% і зниження питомої витрати коксу на 72 кг/т.

На третьому етапі випробувань, враховуючи позитивний вплив вмісту залишкового вуглецю в залізородній сировині на зниження питомої витрати коксу в доменній плавці, розроблений спосіб виробництва офлюсованих локальних спеків з підвищеним вмістом в них залишкового вуглецю за рахунок використання менш дефіцитних і дешевих сортів твердого палива замість дорогого і дефіцитного металургійного коксу.

Високотемпературна технологія отримання огрудкованого залізородного матеріалу з максимально можливою кількістю всередині нього залишкового вуглецю може бути здійснена при неодмінному дотриманні двох основних технологічних умов: ефективному накопчуванні гідрофільних тонкоподрібнених компонентів шихти на гідрофобну поверхню шматочків твердого палива, що є зародками, із забезпеченням необхідної міцності отриманих сирих окатишів,

а також мінімальним вигоранням вуглецю цього твердого палива в процесі термічного зміцнення і охолодження огрудкованого матеріалу в газовій атмосфері з різним окислювальним потенціалом. Сутність цієї технології, як і попередніх, полягає в роздільному дозуванні компонентів в дві шихти, відповідно, з високою і низькою температурами їх плавлення. В якості твердого палива використовувався антрацит, як найменш реакційне з природного вугілля. Виділена фракція антрациту (0-10 мм) оброблялася водним розчином лігносульфонату натрію в кількості 2,4-15,1 кг/т сухого антрациту за розробленою технологією [11] для додання антрациту гідрофільної здатності.

Таблиця 2

Розрахункові технологічні показники роботи доменної печі об'ємом 5000 м³ при використанні в шихті офлюсованих локальних спеків різного складу

Показники	Періоди ¹					
	Б ²	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
Локальні спеки		1	2	3	4	5
Продуктивність, т/доб.	9826					
Приведена продуктивність, т/доб.	9826	11624	12587	11546	12607	12862
Витрата коксу, кг/т чав.	426,8					
Приведена витрата коксу, кг/т чав.	426,8	380	355	352	331	315
Вміст вуглецю в локальних спеках ³ , %	0	0	0	2,65	2,05	2,85
Витрата залишкового вуглецю в локальних спеках, кг/т чав.	0	0	0	43,1	33,3	46,4
Вміст заліза у всій шихті ⁴ , %	55,0	64,15	69,05	63,75	69,15	70,45
Витрата, кг/т: агломерат АЦ №1	134,4	0	0	0	0	0
агломерат АЦ №2	1192	0	0	0	0	0
окатиші ПівніГЗК	300,3	0	0	0	0	0
локальні спеки	0	1626,7	1626,7	1626,7	1626,7	1626,7
вапняк	0	0	0	0	0	0

¹ – Б – базовий період, P₁-P₅ – розрахункові періоди роботи доменної печі (приведення за методикою [8]) з використанням спеків 1-5 відповідно; ² – кращий період роботи печі з 2000 р. до впровадження на печі технології ПВП в 2016 р. [9] (повністю показники роботи печі наведені в [10]); ³ – середні дані за вмістом вуглецю в локальних спеках з табл. 1; ⁴ – середні дані за вмістом заліза в локальних спеках з табл. 1.

В ході дослідження готувалось дві шихти для отримання сирих окатишів з високою і низькою температурами плавлення згідно описаних вище технологій. Шихта для отримання сирих окатишів з високою температурою плавлення складалася з залізородного концентрату, магнієвмісного флюсу, сполучної добавки, і була низькоосновною, якщо використовувався один концентрат, або із заданою основністю готового продукту і багатим (1-5% SiO₂) концентратом, якщо використовувалося два концентрати. Ця шихта змішувалася з антрацитом виділеної крупності (0-10 мм), попередньо обробленого реагентом, і піддавалася огрудкуванню. Шихта для отримання сирих окатишів з низькою температурою плавлення складалася з залізородного концентрату, вапняку, сполучної добавки і була високоосновною, якщо використовувався один концентрат, або із заданою основністю готового продукту і бідним (6-10% SiO₂) концентратом, якщо використовувалося два концентрати. З кожної шихти отримували сирі окатиші необхідної крупності: з високою температурою плавлення діаметром 14-20 мм, а з низькою температурою плавлення діаметром 8-14 мм. Обидва види сирих окатишів змішувалися, уникаючи їх руйнування. Співвідношення кількості високотемпературних і низькотемпературних окатишів в суміші (відповідно, 60-85% і 40-15%) і їх основність забезпечували отримання у всього огрудкованого продукту задану основність з необхідною кількістю розплаву, для формування заданого гранулометричного складу локальних спеків.

Суміш сирих окатишів завантажувалася шаром висотою 300 мм в обпалювальну чашу (див. рис.) і піддавалася термообробці, що включає сушку, нагрів, високотемпературне обпа-

лення і охолодження. У процесі термообробки суміші окатишів змінювали швидкості нагріву (від 100 до 500°C/хв.) і охолодження (від 100 до 600°C/хв.), а також вміст кисню в теплоносії. Тривалість високотемпературного обпалення в усіх дослідах була постійною. Випробування показали, що при однаковому вмісті закатаного всередину високотемпературних окатишів вуглецю збільшення швидкості нагріву висушених окатишів і швидкості охолодження отриманих спеків в зазначених межах призводить до зниження ступеня вигорання вуглецю в процесі термообробки з 43,5% до 10,3%, причому найбільше зниження спостерігалось при зростанні швидкостей нагріву і охолодження від 100 до 300-350°C/хв. При подальшому збільшенні швидкостей нагріву і охолодження до 500-600°C/хв. ступінь вигорання вуглецю в спеках зменшувалася не настільки значно. При використанні в період нагрівання та охолодження теплоносія зі зменшеним вмістом кисню характер зниження ступеня вигорання вуглецю при збільшенні швидкості нагріву і охолодження практично не змінювався, однак абсолютні значення були істотно нижче (з 25,6 до 5,1%).

Порівняльні результати випробувань визначення металургійних характеристик різних огрудкованих матеріалів показали, що в отриманих офлюсованих локальних спеках 3 із залишковим вуглецем вміст заліза вище, ніж в промисловому агломераті і приблизно на тому ж рівні, що в промислових окатишах (див. табл. 1). Проведений розрахунок показників роботи доменної печі з використанням в шихті локальних спеків із залишковим вуглецем показав зниження питомої витрати коксу на 75 кг/т і збільшення продуктивності на 17,5% в порівнянні з базовим періодом роботи доменної печі (див. табл. 2, спеки 3).

Продовжуючи розробку нової залізородної моносіровини для доменної плавки і проаналізувавши технологічні можливості, показники отримання і металургійні характеристики описаних вище офлюсованих локальних спеків 1-3, автори прийшли до висновку, що технологічно можливо отримати комплексний офлюсований огрудкований матеріал з усіма зазначеними металургійними характеристиками – це локальні спеки 4 з підвищеним вмістом заліза і залишковим вуглецем. Виходячи з цього, була розроблена і випробувана технологія отримання такого матеріалу, в якому раціонально і одночасно використані представлені вище елементи технологій з деякими технологічними спрощеннями.

В якості високотемпературної частини шихти для отримання локальних спеків використовували спільне введення металізованих окатишів, металізованих руд або їх сумішей зі ступенем металізації 5-95% крупністю 10-20 мм в кількості 50-80%, а також тверде паливо (антрацит) розміром 0-12 мм в кількості 15-3%, без накочування на перші і другі оболонки з високотемпературної шихти для запобігання їх від окислення. В якості низькотемпературної частини шихти використовувалися застосовані раніше сирі високоофлюсовані окатиші з низькою температурою плавлення розміром 8-14 мм в кількості 35-17%. Отримані складові шихти змішувалися, після чого суміш піддавалася термообробці газоподібним теплоносієм з окислювальним або слабоокислювальним потенціалом з наступними температурами: сушка – 350-450°C, нагрівання до максимальної температури з різними швидкостями, обпалення при температурі 1250-1350°C і охолодження з різними швидкостями до температури 100-130°C.

Питома продуктивність обпалювального агрегату і питомі витрати енергоресурсів (теплоти і електроенергії) при виробництві огрудкованої моносіровини 4 залишилися практично ідентичними при виробництві описаних вище локальних спеків (див. табл. 1). Результати розрахунку показників доменної плавки при використанні в її шихті огрудкованої офлюсованої моносіровини з підвищеним вмістом заліза і вуглецю при відсутності оболонки з високотемпературної шихти на металізованих окатишах і твердому паливі показали збільшення продуктивності печі на 28,3% і зниження питомої витрати коксу на 96 кг/т (табл. 2, спеки 4).

Додаткові численні випробування локальних спеків 4 показали, що при відсутності накочування високотемпературної шихти на металізовані окатиші та тверде паливо їх захист тільки розплавом низькотемпературних окатишів не дозволяє істотно знизити ступінь окислення металізованих окатишів і ступінь вигорання вуглецю з оброблюваного матеріалу при всіх швидкостях нагріву в окислювальному теплоносії. Слід зазначити, що ступінь окислення металізованих окатишів в процесі термообробки через неточності оперативного контролю використовуваних їх вихідних технологічних значень (крупності, ступеня металізації, співвідношення з твердим паливом) однозначно визначити було складніше. Однак, можна з певною вірогідністю

передбачити аналогічний вплив накочування оболонки на ступінь окислення металізованого матеріалу в процесі його термообробки.

На наступному етапі розробки моносіровини для доменної плавки і в зв'язку з необхідністю істотного зниження ступеня окислення вуглецю твердого палива і металізованих окатишів в процесі термозміцнення попередньої моносіровини 4 через неповний захист низькотемпературним розплавом їх поверхні розроблена технологія отримання моносіровини у вигляді офлюсованих локальних спеків 5 з накочуванням оболонки певної товщини з високотемпературної шихти на шматочки антрациту і металізовані окатиші для запобігання їх від окислення.

Сутність технології полягала в підготовці трьох компонентів, що вводяться в шихту для отримання локальних спеків: двох компонентів шихти з високою і одного з низькою температурами плавлення. Високотемпературними компонентами шихти (з температурою плавлення вище 1500°C) були металізовані окатиші і руди або їх суміш зі ступенем металізації 5-95% крупністю 0-18 мм і тверде паливо (антрацит) розміром 0-18 мм, попередньо оброблене реагентом для підвищення гідрофільності його поверхні в співвідношенні між ними 10-90% металізованого матеріалу і 90-10% антрациту в залежності від заданих вмістів заліза і вуглецю в готовому продукті. На їх поверхню накочувалась оболонка товщиною 8-4 мм з низькоосновної високотемпературної шихти, офлюсованої магнієвмісним флюсом, до досягнення крупності сирих окатишів 8-25 мм.

Низькотемпературні окатиші крупністю 8-14 мм виготовлялися з концентрату будь-якого ступеня збагачення і офлюсовувались вапняком до високого ступеня, що забезпечує задану основність локальних спеків. Високо- і низькотемпературні сири окатиші змішувалися при утриманні в суміші, відповідно, суми перших 55-88%, а других – 45-12%.

З огляду на надзвичайну складність підтримки в газопотоках конвеєрних обпалювальних машин низького вмісту кисню в теплоносії суміш високотемпературних і низькотемпературних сирих окатишів піддавалася термообробці в звичайному, використовуваному в даний час окислювальному теплоносії і тепловому режимі, що включає сушку при температурі 350-450°C, нагрівання до максимальної температури зі швидкістю від 100°C/хв до 500°C/хв, обпалення при максимальній (1300-1350°C) температурі і охолодження повітрям зі швидкістю від 100°C/хв до 600°C/хв.

Мета істотного зниження окислення металізованих окатишів і вуглецю твердого палива в процесі термообробки при отриманні офлюсованих локальних спеків була досягнута за рахунок накочування на їх поверхню оболонки з високотемпературної шихти товщиною 8-4 мм. Окислення дрібних (0-1,5 мм) частинок твердого палива, що знаходяться в оболонці, або металізованих окатишів, які не є зародками окатишів, знижує вміст кисню в теплоносії, який дифундує всередину окатишів. Так, ступінь вигорання вуглецю при збільшенні швидкості нагріву і охолодження від 100 до 500-600°C/хв в окислювальній атмосфері знижувалася з 35,8 до 12,6%, тоді як за відсутності оболонки ступінь вигорання вуглецю знижувалася з 61,7 до 37,3%. Таким чином, вміст заліза і вуглецю в локальних спеках 5 цієї моносіровини становив, відповідно, 65,3-75,6% і 1,9-3,8%, тобто вище, ніж у всіх розроблених раніше спеках (див. табл. 1).

Результати розрахунку показників доменної плавки при використанні цієї огрудкованої моносіровини (табл. 2, спеки 5) показали збільшення продуктивності печі на 30,9% і зниження питомої витрати коксу з 427 до 315 кг/т в порівнянні з базовим періодом роботи доменної печі об'ємом 5000 м³.

Висновки

Розроблена технологія виробництва огрудкованої залізородної моносіровини для доменної плавки, що володіє кращим комплексом металургійних характеристик агломератів і окатишів та має в своєму складі одночасно підвищений вміст заліза і залишковий вуглець. Причому, цей матеріал може вироблятися в діючих цехах з виробництва обпалених окатишів при мінімальних витратах на реконструкцію технологічної схеми, основного технологічного обладнання; зміни технології одержання і термозміцнення. Використання нової залізородної моносіровини в доменному виробництві дозволить істотно поліпшити техніко-економічні показники виплавки чавуну. Однак, слід враховувати комплексну економічну доцільність виробництва і виплавки чавуну з цієї огрудкованої моносіровини з заданим вмістом заліза.

Перелік використаних джерел:

1. Теория и технология подготовки шихтовых материалов для доменной и бездомной металлургии железа : учебник / Ф.М. Журавлев, В.П. Лялюк, Н.И. Ступник, В.С. Моркун, Е.В. Чупринов, Д.А. Кассим. – Кривой Рог : Издатель Чернявский Д.А., 2020. – 663 с.
2. Сравнительная характеристика металлургических свойств агломерата и окатышей разных предприятий / И.Ф. Дворниченко [и др.] // Сталь. – 1986. – № 10. – С. 21-23.
3. Влияние основности силикатной связки на прочность железорудных окатышей при восстановлении / Ф.М. Журавлев [и др.] // Metallurg. – 1977. – № 8. – С. 8-11.
4. Федоров С.А. Улучшение металлургических свойств окускованного железорудного сырья путем интенсификации процесса обжига / С.А. Федоров, Н.Н. Бережной // Бюллетень Черная металлургия. – 1976. – № 6. – С. 33-35.
5. Головний напрямок інноваційного вдосконалення доменної технології – використання одного виду залізородної сировини, що поєднує кращі властивості агломерату та окатишів / Д.О. Кассім, В.П. Лялюк, Ф.М. Журавльов, І.А. Ляхова, Є.В. Чупринов // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2018. – Вип. 36. – С. 7-15. – (Серія : Технічні науки). – Режим доступу: [DOI: 10.31498/2225-6733.36.2018.142462](https://doi.org/10.31498/2225-6733.36.2018.142462).
6. Improved Iron-Ore Sinter for Blast Furnaces / F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, D.A. Kassim, I.A. Lyakhova, E.V. Chuprinov // Steel in Translation. – 2015. – № 4. – Pp. 270-274. – Mode of access: [DOI: 10.3103/S0967091215040154](https://doi.org/10.3103/S0967091215040154).
7. Improved Iron-Ore Pellets for Blast Furnaces / F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, N.I. Stupnik, E.V. Chuprinov, I.A. Lyakhova // Steel in Translation. – 2016. – № 12. – Pp. 860-867. – Mode of access: [DOI: 10.3103/S0967091216120135](https://doi.org/10.3103/S0967091216120135).
8. Товаровский И.Г. Эволюция доменной плавки / И.Г. Товаровский, В.П. Лялюк. – Днепропетровск : Пороги. – 2001. – 424 с.
9. Возможности нормализации газодинамического режима доменной плавки при вдувании пуг / В.П. Лялюк, А.К. Тараканов, Д.А. Кассим, И.И. Кучер // Сталь. – 2020. – № 7. – С. 8-12.
10. Определение траектории потока газа при вдувании в доменную печь пылеугольного топлива / В.П. Лялюк [и др.] // Сталь. – 2017. – № 4. – С. 2-6.
11. Технология получения сырых окатышей с закатанным внутрь твердым топливом / Ф.М. Журавльов, В.П. Лялюк, И.А. Ляхова, Д.А. Кассим, Е.В. Чупринов // Гірничий вісник Криворізького національного університету. – 2014. – № 98. – С. 162-165.

References:

1. Zhuravlev F.M., Lyalyuk V.P., Stupnik N.I., Morkun V.S., Chuprinov E.V., Kassim D.A. *Teoriya i tekhnologiya podgotovki shikhtovykh materialov dlya domennoy i bezdomennoy metallurgii zheleza: uchebnik* [Theory and technology of preparation of charge materials for blast-furnace and blast-furnace metallurgy of iron: textbook]. Krivoy Rog, Izdatel Chernyavskiy D.A. Publ., 2020. 663 p. (Rus.)
2. Dvorchenko I.F., Zhuravlev F.M., Astaf'ev V.D., Koshel' A.M. *Sravnitel'naya kharakteristika metallurgicheskikh svoystv aglomerata i okatyshey raznykh predpriyatiy* [Comparative characteristics of metallurgical properties of sinter and pellets from different enterprises]. *Stal' – Steel*, 1986, no. 10, pp. 21-23. (Rus.)
3. Zhuravlev F.M., Malysheva T.Ya., Merlin A.V. *Vliyaniye osnovnosti silikatnoy svyazki na prochnost zhelezorudnykh okatyshey pri vosstanovlenii* [Influence of the basicity of the silicate bond on the strength of iron ore pellets during reduction]. *Metallurg – Metallurg*, 1977, no. 8, pp. 8-11. (Rus.)
4. Fedorov S.A., Berezhnoy N.N. *Uluchsheniye metallurgicheskikh svoystv okuskovannogo zhelezorudnogo syria putem intensifikatsii protsessa obzhiga* [Improving the metallurgical properties of agglomerated iron ore raw materials by intensifying the roasting process]. *Biulleten' Chernaia metallurgiya – Bulletin Ferrous metallurgy*, 1976, no. 6, pp. 33-35. (Rus.)
5. Kassim D.O., Lyalyuk V.P., Zhuravlov F.M., Lyakhova I.A., Chuprinov Ye.V. *Golovniy napryamok innovatsiynogo vdoskonalennya domennoy tekhnologii – vikoristannya odnogo vidu zalizorudnoy sirovini, shcho poednuє krashchi vlastivosti aglomeratu ta okatishiv* [Main direction of the innovative improving of the blast furnace technologies – use of one type of iron raw materi-

- al, combining the best properties of agglomerate and pellets]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2018, iss. 36, pp. 7-15. doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142462. (Ukr.)
6. Zhuravlev F.M., Lyalyuk V.P., Kassim D.A., Lyakhova I.A., Chuprinov E.V. Improved Iron-Ore Sinter for Blast Furnaces. *Steel in Translation*, 2015, no. 4, pp. 270-274. doi: 10.3103/s0967091215040154.
 7. Zhuravlev F.M., Lyalyuk V.P., Stupnik N.I., Chuprinov E.V., Lyakhova I.A. Improved Iron-Ore Pellets for Blast Furnaces. *Steel in Translation*, 2016, no. 12, pp. 860-867. doi: 10.3103/S0967091216120135.
 8. Tovarovskiy I.G., Lyalyuk V.P. *Evolyutsiya domennoy plavki* [Blast furnace evolution]. Dnepropetrovsk, Porogi Publ., 2001. 424 p. (Rus.)
 9. Lyalyuk V.P., Tarakanov A.K., Kassim D.A., Kucher I.I. Vozmozhnosti normalizatsii gazo-dinamicheskogo rezhima domennoy plavki pri vduvanii PUT [Possibilities of normalizing the gas-dynamic regime of blast-furnace smelting during pulverized coal injection]. *Stal' – Steel*, 2020, no. 7, pp. 8-12.
 10. Lyalyuk V.P., Tarakanov A.K., Kassim D.A. Opredele niye trayektorii potoka gaza pri vduvanii v domennuyu pech pyleugolnogo topliva [Determination of the gas flow path when pulverized coal fuel is injected into a blast furnace]. *Stal' – Steel*, 2017, no. 4, pp. 2-6. (Rus.)
 11. Zhuravlev F.M., Lyalyuk V.P., Lyakhova I.A., Kassim D.A., Chuprinov E.V. Tekhnologiya polucheniya syrykh okatyshey s zakatannym vnutr tverdym toplivom [Technology of obtaining raw pellets with solid fuel rolled inside]. *Girnichii visnik Krivoriz'kogo natsional'nogo universitetu – Mining journal of Kryvyi Rih National University*, 2014, no. 98, pp. 162-165. (Rus.)

Рецензент О.Д. Учитель
д-р техн. наук, проф., ННТИ ДУЕТ

Стаття надійшла 15.10.2020

УДК 669.184

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226184

© Радько Н.Г.¹, Чупринов Є.В.², Лялюк В.П.³,
Коренко М.Г.⁴, Кривенко В.В.⁵

УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ ПО РОЗРАХУНКОВІЙ ТЕМПЕРАТУРІ РЕАКЦІЙНОЇ ЗОНИ

Отримано новий параметр киснево-конвертерного процесу (температура випромінювання поверхні реакційної зони), що дозволяє здійснювати контроль плавки протягом всієї її тривалості. В основі алгоритму, який розраховує цей параметр, лежить вимір потужності теплового потоку, що отримує охолоджуюча вода.

Ключові слова: виплавка сталі, технологічний процес, випромінювання, реакційна зона, окислення.

¹ ст. викладач, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг

² канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0001-7258-2079, vitalij.lyalyuk@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0002-4582-1756

⁵ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0001-7822-6358

N.G. Rad'ko, E.V. Chuprinov, V.P. Lyalyuk, M.G. Korenko, V.V. Krivenko. Control of the converter melting technological process through the calculated temperature of the reaction zone. The article presents calculations of the current temperature of the metal reaction zone and determines its dependence on time at blowing. It has been shown that changes in the temperature of the reaction zone temperature at melting characterize the processes occurring in the bath of the converter. Analysis of the obtained dependence in real time makes it possible to quickly predict the end of oxidation [Si] and [Mn] and the content of [C] in the melt. Besides, the thermal energy of radiation makes it possible in different periods of melting to forecast and to adjust the amount flow of oxygen injected at melting, the necessity to adjust the position of the oxygen lance relative to the metal, and, what is the most important, to predict the completion of blowing. The automation systems implementing the developed model have been offered. It has been shown that it includes sensors of temperature, water and oxygen flow rate and pressure, lance position, means of communication with ACS TP converter melting, control and workstation control, as well as a set of algorithms and programs. An algorithm for calculating the current temperature of the reaction zone during melting has been developed, the algorithm taking the melt as an energy emitter. It has been established that the temperature of the reaction zone reflects through its change in different periods of melting the technological processes in the converter: the temperature of the steel melt, the intensity of the Fe oxidation in the reaction zone, [Si] and [Mn] oxidation processes, endothermic processes strengthening due to Fe oxides in slag, etc. The presented calculations and proposed possibilities of influencing the gas-blowing mode to reduce the supply of oxygen to the melt make it possible for the technologists to achieve the required reduction of steel oxidation and to reduce the deoxidizer costs when casting steel or to predict the substitution of oxygen for air without impairing bath mixing.

Keywords: steel smelting, technological process, radiation, reaction zone, oxidation.

Постановка проблеми. В даний час технологічний процес закінчення конвертерної плавки коригується сумарною витратою кисню, а також даними, що були отримані при «повалці» конвертера з метою взяття проби металу на вміст вуглецю і виміру його температури. Кількість таких «повалок» конвертера може досягти двох, трьох і більше, що негативно позначається на продуктивності конвертера, призводить до втрати температури металу і шлаку, загушення шлаку та загрожує іншими розладами конвертерної плавки [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досвід промислово розвинених країн, зокрема Японії [2], показує, що потрапляння плавки в задане цільове вікно за хімічним аналізом і температурою відбувається у 99,8% випадках без здійснення «повалок» конвертера і коригуючих «додувок». Розроблені та запропоновані механізми контролю киснево-конвертерної плавки за рахунок вивчення динаміки процесів, що відбуваються у розплаві, потребують вдосконалення та подальших досліджень [3], а особливе місце в дослідженнях цих процесів повинно відводитись вуглецю, як елементу, окиснення котрого є визначальним для масообмінних процесів [4]. Окрім того, застосування сучасної обчислювальної техніки створює передумови для оперативного управління технологічним процесом на базі отримуваних вимірювань [5-7].

Таким чином, впровадження методів контролю та механізмів управління киснево-конвертерним процесом без вартісних капітальних вкладень є важливим та актуальним питанням.

Мета статті – розробка нових методів контролю та управління технологічним процесом киснево-конвертерної плавки на основі температури реакційної зони.

Виклад основного матеріалу. Прогнозувати настання часу закінчення продувки киснем конвертерної плавки і стежити за ходом протікання її основних процесів можливо на підставі розрахунку в реальному масштабі часу (по ходу плавки) температури розплаву (реакційної зони). Температуру розплаву (реакційної зони) нескладно оперативно визначати з рівнянь балансу тепла, що випромінюється півсферою реакційної зони на водоохолоджувану кисневу фурму, і теплоти, відведеної від кисневої фурми водою.

Для розрахунку температури розплаву необхідна вхідна інформація: про температуру води, її витрату і тиск на вході і виході кисневої фурми; температуру, витраті і тиск кисню, що

вдувається. У математичну модель розрахунку температури розплаву вводиться інформація про стан кисневої фурми, вихідну сировину, марку сталі, що виплавляється, а також хімічні аналізи проб металу і прямого виміру температури при «повалці» конвертера.

За допомогою математичної моделі розраховується поточна температура (по ходу плавки) реакційної зони ($T_{p.з.}$) металу і будується залежність $T_{p.з.}$ від часу. Зміни температури реакційної зони по ходу плавки характеризують процеси, що протікають у ванні конвертера. Аналіз отриманої залежності в реальному масштабі часу дозволяє оперативно прогнозувати закінчення окислення [Si] і [Mn], вміст [C] в розплаві. Крім цього по тепловій енергії випромінювання в різні періоди плавки здійснюється прогноз на коригування витрати кисню, що вдувається по ходу плавки, необхідність регулювання положення кисневої фурми щодо металу, а також, що найважливіше, можна з високим ступенем вірогідності прогнозувати закінчення продувки.

До складу технологічних засобів системи автоматизації, що реалізують розроблену модель, входять датчики температури, витрати і тиску води та кисню, положення фурми, засоби зв'язку з АСУ ТП конверторної плавки, контроль і АРМ управління, а також комплекс алгоритмів і програм. Алгоритм розрахунку поточної температури реакційної зони ($T_{p.з.}$) по ходу плавки заснований на розгляді розплаву як випромінювача енергії. Так, під час продування розплаву в конвертері технічним киснем через багатосоплову фурму поверхня розплаву сталі представляє собою сферу випромінювання з високою температурою (температурою реакційної зони ($T_{p.з.}$)). Ця температура аналітично пов'язана з температурою металу (T_m).

Потік електромагнітного випромінювання від сфери реакційної зони через простір розжарених газів (коефіцієнт чорноти 0,8-0,9) падає на поверхню водоохолоджуємої фурми (через фурму вдувається технічний кисень, причому витрата, тиск, температура, і вміст O_2 в ньому може змінюватися, а також змінюється і положення фурми в різні періоди плавки).

Енергія випромінювання від поверхні реакційної зони підпорядковується закону Стефана-Больцмана:

$$E = \varepsilon \cdot C \cdot (T/100)^4, \text{ Вт/см}^2, \quad (1)$$

де ε – коефіцієнт чорноти (0,8-0,9); C – коефіцієнт випромінювання абсолютного тіла $5,68 \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{K}^4$; T – температура випромінюючої поверхні, К.

Потужність (P) випромінювання, що падає на кисневу фурму площею поверхні (S_ϕ), буде:

$$P = E \cdot S_\phi = S_\phi \cdot \varepsilon \cdot C \cdot (T/100)^4, \text{ Вт.} \quad (2)$$

Потужність енергії, що набувається водою (P_v), котра охолоджує фурму, від потоку енергії, що випромінюється поверхнею реакційної зони, можна оцінити за формулою:

$$P_v = V \cdot (\rho_2 \cdot h_2 - \rho_1 \cdot h_1), \text{ кВт}, \quad (3)$$

де V – об'єм води, що охолоджує фурму в одиницю часу, м^3 ; ρ_2 – щільність води при температурі T_2 на виході з фурми, кг/м^3 ; ρ_1 – щільність води при температурі T_1 на вході в фурму, кг/м^3 ; h_1 – питома теплоємність води при температурі T_1 на вході в фурму, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{K})$; h_2 – питома теплоємність води при температурі T_2 на виході з фурми, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{K})$.

Наведені значення параметрів води обчислюються за даними вимірів температур T_1 і T_2 , тиску і витрати води. Охолоджуючий вплив кисню, що продувається через фурму, враховується коефіцієнтом k_1 , а вплив відстані від фурми до поверхні реакційної зони – коефіцієнтом k_2 (положення фурми). В результаті потужність енергії, що набувається охолоджуючою водою з урахуванням впливу продувки кисню через фурму і її положення щодо поверхні реакційної зони (вимірюється витрата кисню, його тиск і температура, а також відстань фурми до поверхні розплаву) буде:

$$P_v = k_1 \cdot k_2 \cdot V \cdot (\rho_2 \cdot h_2 - \rho_1 \cdot h_1) \cdot 10^3, \text{ Вт.} \quad (4)$$

Потужність потоку, що падає на поверхню фурми, порівнюємо з потужністю одержуваної охолоджуючої фурму водою:

$$P = P_v = S_\phi \cdot \varepsilon \cdot C \cdot (T/100)^4 = k_1 \cdot k_2 \cdot V \cdot (\rho_2 \cdot h_2 - \rho_1 \cdot h_1) \cdot 10^3, \text{ Вт}, \quad (5)$$

звідки

$$(T_{p.з.}/100)^4 = (k_1 \cdot k_2 \cdot V \cdot (\rho_2 \cdot h_2 - \rho_1 \cdot h_1) \cdot 10^3) / S_\phi \cdot \varepsilon \cdot C, \quad (6)$$

тоді температура реакційної зони складе:

$$T_{p.z.} = \sqrt[4]{10^{11} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot V \cdot (\rho_2 \cdot h_2 - \rho_1 \cdot h_1) / S_{\phi} \cdot \varepsilon \cdot C}, K. \quad (8)$$

Таким чином, вимірюючи потужність теплового потоку, що отримується охолоджуючою водою, і виконавши добавку поправочних коефіцієнтів на витрату кисню і положення фурми, можна розрахувати поточну температуру випромінюючої поверхні реакційної зони за допомогою алгоритму, реалізованого на обчислювальній техніці, що дозволяє мати новий параметр процесу протягом всієї тривалості плавки.

Зв'язки $T_{p.z.}$ з технологічними параметрами конвертерної плавки були встановлені в киснево-конвертерному цеху «АрселорМіттал Кривий Ріг». Встановили, що температура реакційної зони $T_{p.z.}$ відображає своєю зміною в різні періоди плавки технологічні процеси в конвертері (рис.).



Рисунок – Зміна температури випромінюючої поверхні реакційної зони в різні періоди плавки в конвертері: 1 – інтенсивне окислення Fe при слабкому перемішуванні; 2 – початок активного окислення [Mn], [Si]; 3 – ендотермічні процеси окислів Fe в шлаці; 4 – уповільнення росту температури через активне перемішування ванни; 5 – падіння температури через зменшення вмісту вуглецю в металі; 6 – погіршення перемішування; 7 – зростання температури на 2-3°C в хвилину; 8 – стабілізація температури

Зокрема:

- температуру розплаву сталі T_p і перепаду температур $T = T_{p.z.} - T_p$;
- перший максимум T відображає інтенсивне протікання реакції окислення Fe в реакційній зоні при слабкому тепловідводі через погане перемішування ванни і малу швидкість окислення $[C] - V_c$;
- наступний підйом T пов'язаний з активним окисленням [Si] і [Mn], що окислюються більш активно, ніж [C], причому в міру зниження їх вмісту перегрів ванни слабшає;
- завершення окислення [Si] і [Mn] створює передумови менш активному [C] з'єднуватися з O_2 при сприятливих зовнішніх умовах (висока температура), а також до більш інтенсивного перемішування ванни і відведення теплоти, знижуючи T ;
- після посилення ендотермічних процесів за рахунок окислів Fe в шлаці відбувається новий підйом T ;

– після зниження концентрації $[C]$ його швидкість окислення V_c падає, зменшується перемішування ванни монооксидом вуглецю, що утворюється, і спостерігається зростання $T_{p.з.}$ із темпом $2-3^\circ\text{C}$ в хвилину з остаточною її стабілізацією; далі T_p зростає, а T падає при сталості $T_{p.з.}$;

– перепад температур $T = T_{p.з.} - T_p$ дозволяє прогнозувати зміну вмісту $[C]$ в розплаві, починаючи з його другого максимуму (є експериментальні залежності, які необхідно адаптувати до умов цеху і емпіричні залежності, наприклад: $(T/100)^2 = 10 \cdot (5 + 4[C] - [C]^2)$).

Необхідно відзначити, що після другого максимуму T відбувається накопичення O_2 в розплаві і при окисленні $[C]$ існують періоди, коли кількість утвореного оксиду вуглецю перевищує стехіометрично можливе, виходячи з витрат кисню в ванну, що пояснюється надмірним окисленням розплаву.

Висновки

1. Представлені обчислення та запропоновані можливості впливу на газодуттєвий режим для скорочення подачі кисню в розплав дозволяють технологам досягати необхідних показників зниження окислення сталі і зменшити витрати розкислювачів при розливанні сталі або використовуватися для передбачення заміни частини кисню повітрям, не погіршуючи перемішування ванни.

2. Застосування математичної моделі і системи автоматичного управління плавкою на основі оперативного контролю зміни температура реакційної зони дозволить скоротити час на «повалку» кисневого конвертера при отриманні сталі з заданими характеристиками, а також скоротити тривалість плавки на 2-3 хв (до 4%).

Перелік використаних джерел:

1. Технология производства стали в современных конверторных цехах / С.В. Колпаков, Р.В. Старов, В.В. Смоктий; под ред. С.В. Колпаков. – М. : Машиностроение, 1991. – 463 с.
2. Behavior of jet from top-lance in BOF / K. Naito [et al.] // *ShenNittetsu Giho*. – 2012. – № 394. – Pp. 33-41.
3. Богушевський В.С. Контроль динаміки ванни по ходу продувки як складова системи керування конвертерною плавкою / В.С. Богушевський, К.В. Єгоров // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2013. – № 1. – С. 51-56.
4. Богушевський В.С. Обезуглероживание стали как основной параметр оптимального управления ККП / В.С. Богушевский, С.Г. Мельник, С.В. Жук // *Металл и литьё Украины*. – 2014. – № 2. – С. 14-16.
5. Компьютерная модель расчета шихтовки и продувки конвертерной плавки / В.С. Богушевский, Г.Г. Грабовский, В.М. Михайлов [и др.] // *Сталь*. – 2006. – № 1. – С. 18-21.
6. Сущенко А.В. Сравнительный анализ методик расчета материального и теплового балансов кислородно-конвертерной плавки / А.В. Сущенко, И.А. Фейерэizen // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. – 2013. – Вип. 27. – С. 17-28. – (Серія : Технічні науки).
7. Аналіз причин додувок у конвертерному виробництві сталі та шляхи їх усунення / Н.Г. Радько, Є.В. Чупринов, В.П. Лялюк, М.Г. Коренко, В.В. Кривенко // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. – 2020. – Вип. 40. – С. 88-95. – (Серія : Технічні науки). – Режим доступу : [DOI: 10.31498/2225-6733.40.2020.216183](https://doi.org/10.31498/2225-6733.40.2020.216183).

References:

1. Kolpakov S.V., Sarov R.V., Smoktii V.V. *Tehnologiya proizvodstva stali v sovremennykh konvertornykh cehah* [Steel production technology in modern converter shops]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 463 p. (Rus.)
2. Naito K., Asayara N., Kaizawa A., Ogawa Y. Behavior of jet from top-lance in BOF. *Shen-Nittetsu Giho*, 2012, no. 394, pp. 33-41.
3. Bogushevskij V.S., Yegorov K.V. Kontrol dinamiki vannii po hoduu prodovki yak skladova sistemi keruvannya konverternoyu plavkoyu [Control of bath dynamics during purge as a component of converter melting control system]. *Naukovi visti Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu Ukraini «Kiivs'kii politekhnichnii institut» – KPI Science News*, 2013, no. 1, pp. 51-56. (Ukr.)
4. Bogushevskij V.S., Melnik S.G., Zhuk S.V. Obезuglerozhivanie stali kak osnovnoy parametru op-

- timalnogo upravleniya KKP [Steel decarburization as the main parameter of optimal control of oxygen-converter smelting]. *Metall i lit'e Ukrainy – Metal and casting of Ukraine*, 2014, no. 2, pp. 14-16. (Rus.)
5. Bogushevskij V.S., Grabovskij G.G., Mihajlov V.M. Kompyuternaya model rascheta shihtovki i produvki konverternoj plavki [Computer model for calculating the charge and purge converter smelting]. *Stal' – Steel*, 2006, no. 1, pp. 18-21. (Rus.)
 6. Sushenko A.V., Fejerejzen I.A. Sravnitelnyj analiz metodik rascheta materialnogo i teplovogo balansov kislorodno-konverternoj plavki [Comparative analysis of methods for calculation of material and thermal balances of oxygen-converter melting]. *Visnik Priazovs'kogo derzhavnogo tehnichnogo universitetu. Serija : Tehnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2013, no. 27, pp. 17-28. (Rus.)
 7. Rad'ko N.G., Chuprinov E.V., Lyalyuk V.P., Korenko M.G., Krivenko V.V. Analiz prichin doduvok u konverternomu virobnicztvi stali ta shlyakhi yikh usunennya [Analysis of the causes of additional blowings in converter steel production and ways of their elimination]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Serija: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2020, iss. 40, pp. 88-95. **doi: 10.31498/2225-6733.40.2020.216183.** (Ukr.)

Рецензент: Д.О. Кассім
д-р техн. наук, проф., ННТІ ДУЕТ

Стаття надійшла 13.11.2020

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

УДК 621.314.26

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226185

© Поднебенна С.К.¹, Бурлака В.В.², Корольов І.С.³**РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ
ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗКОЛЕКТОРНОГО ДВИГУНА
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

У статті розглянуті переваги безколекторних двигунів постійного струму (БДПС). У порівнянні зі звичайними двигунами постійного струму коефіцієнт корисної дії БДПС може сягати 93-95%. Це обумовлює їх використання у системах електротранспорту: електромобілях, електровелосипедах та ін. Запропоновано включити вивчення БДПС до освітнього процесу, для чого пропонується розробка та створення лабораторного стенду для дослідження механічних та регулювальних характеристик БДПС. У статті розглянутий принцип роботи безколекторних двигунів постійного струму, методи керування інвертором напруги. Розроблено три варіанти лабораторного стенду для досліджень безколекторних двигунів постійного струму. Стенд містить два двигуни БДПС зі збудженням від постійних магнітів типу CG48V 1000W 50, ротори яких з'єднані між собою. Один з двигунів – випробуваний, другий виконує роль електромагнітного гальма. Вали двигунів з'єднані між собою. Така кінематика дозволяє вимірювати момент, який створюється досліджуванним двигуном. Живлення двигунів здійснюється від незалежних регульованих джерел живлення змінного струму – контролерів, які з'єднані по шині постійного струму напругою 48 В, яка утворена акумуляторною батареєю АКБ, живлення якої здійснюється від зарядного пристрою, який живиться від однофазної мережі 220 В 50 Гц. Для вимірювання швидкості обертання використовується цифровий частотомір (тахометр). Розроблена методика проведення досліджень – зняття механічних та регулювальних характеристик БДПС з наступним їх аналізом. Використання розробленого стенду дозволить впровадити сучасне обладнання в освітній процес та забезпечити підвищення якості освіти.

Ключові слова: безколекторний двигун постійного струму, інвертор напруги, лабораторний стенд.

S.K. Podnebenna, V.V. Burlaka, I.S. Korolov. Development of a laboratory bench for determining the characteristics of a brushless dc motor. The article discusses the advantages of brushless direct current motors (BLDC). Compared with conventional DC motors, the efficiency of the BLDC motor can reach 93-95%. This determines their use in electric transport systems: electric vehicles, electric bicycles, etc. It is proposed to include the study of BLDC in the educational process, for which it is proposed to develop and create a laboratory bench for the study of mechanical and control characteristics of BLDC. The article discusses the principle of operation of brushless DC motors, methods of controlling a voltage inverter driving such a motor. Three versions of a laboratory bench for researching

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-0878-1492, podsvet@gmail.com

² д-р техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-8507-4070, vladimirvburlaka@gmail.com

³ студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, whiteandblackmrl@gmail.com

brushless DC motors have been developed. The bench contains two BLDC motors with excitation from permanent magnets of the CG48V 1000W 50 type, the shafts of which are interconnected. One of the motors is a test subject, the other acts as an electromagnetic brake. The motor shafts are rigidly fixed to each other. This kinematics allows us to measure the torque developed by the motor under study. The motors are powered from independent regulated AC power supplies – controllers, which are connected to a common 48 V DC bus supported by the lithium battery. The battery is charged from the dedicated charger, which is powered from a single-phase 220 V 50 Hz grid. A digital frequency meter (tachometer) is used to measure the rotational speed. A research methodology has been developed for the investigation of the mechanical and control characteristics of BLDC with their subsequent analysis. The use of the developed bench will allow to introduce modern equipment into the educational process and ensure an improvement in the quality of education.

Keywords: brushless DC motor, voltage source inverter, laboratory bench.

Постановка проблеми. Розробка та впровадження нового сучасного обладнання в навчальний процес є невід'ємною частиною розвитку освітніх програм та спеціалізацій, забезпечення якості навчального процесу. Серед сучасного обладнання у напрямку систем керуваного електроприводу поширення набули безколекторні двигуни постійного струму (БДПС) [1, 2]. До перспективного напрямку використання БДПС відноситься їх застосування у системах автономного електротранспорту: електросамокатів, електромобілів тощо. Практичне визначення характеристик таких двигунів є корисним з точки зору проектування таких систем та аналізу їх роботи. У цьому світлі розробка лабораторного стенду для визначення характеристик безколекторного двигуна постійного струму є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням принципів роботи безколекторних двигунів постійного струму присвячено багато сучасних публікацій [1, 2]. Широкому використанню БДПС сприяють його особливості: у порівнянні зі звичайними двигунами БДПС мають такі переваги, як великий ККД, висока швидкодія, можливість зміни частоти обертання, відсутність щіток, малі шуми як у звуковому, так і високочастотному діапазонах, надійність, здатність протистояти перевантаженням по моменту, відмінне співвідношення габаритів і потужності. Безколекторний двигун відрізняється великим ККД. Він може досягати 93-95%. Висока надійність механічної частини безколекторного двигуна (БД) пояснюється тим, що в ньому використовуються шарикопідшипники і відсутні щітки.

Мета статті – розробка лабораторного стенду для визначення характеристик безколекторного двигуна постійного струму.

Виклад основного матеріалу. БДПС складається з ротора з постійними магнітами і статора з обмотками. Розрізняють два типи двигунів: *inrunner*, у яких магніти ротора знаходяться всередині статора з обмотками, і *outrunner*, у яких магніти розташовані зовні і обертаються навколо нерухомого статора з обмотками. Найбільш поширені датчики положення – ті, що працюють на основі ефекту Холла. Датчики реагують на магнітне поле, їх розташовують, як правило, на статорі таким чином, щоб на них впливали магніти ротора. Кут між датчиками повинен бути 120 градусів [1-2].

Для обертання двигуна БДПС обмотки статора повинні отримувати напругу в певному порядку. Важливо розуміти положення ротора, щоб знати, яка обмотка буде під напругою після послідовності подачі живлення. Положення ротора розраховується за допомогою датчиків на основі ефекту Холла, вбудованих у статор на некеруваному кінці двигуна. На кожні 60 електричних градусів обертання один із датчиків Холла змінює стан. Щоб закінчити електричний цикл, потрібно шість кроків. У синхронному режимі, з кожними 60 електричними градусами, перемикання фазного струму має бути оновлене. Однак один електричний цикл може не відповідати повному механічному оберту ротора. Кількість електричних циклів, що повторюються для завершення механічного обертання, визначається парами полюсів ротора. Для кожної пари полюсів ротора завершується один електричний цикл.

Для керування БДПС використовується трифазний мостовий інвертор. Є шість ключів, і ці ключі слід перемикаати залежно від входів датчика Холла. Для вмикання та вимикання перемикачів використовуються методи широтно-імпульсної модуляції (рис. 1).

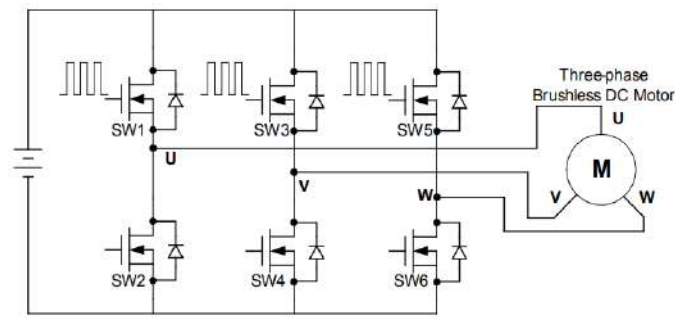


Рис. 1 – Підключення БДПС [1]

Замикаючи ключ SW1, подаємо «+» на фазу А, а замикаючи SW6, подаємо «-» на фазу С. Таким чином, струм потече від «+» батареї через фази А і С. Для забезпечення зворотного напрямку відкриваємо SW5 і SW2. У цьому випадку струм потече від «+» батареї через фази С і А в зворотному напрямку. При роботі двигуна одночасно повинен бути відкритий тільки один верхній і один нижній ключ. При зміні стану потрібно відразу вимкнути пару ключів, витримати час, необхідний для закриття ключів, і тільки після цього включити іншу пару ключів [1, 2].

На рис. 2 показана послідовність комутації трифазної схеми драйвера двигуна BLDC для обертання проти годинникової стрілки. Три датчика Холла – «а», «b» і «с» – встановлені на статорі з інтервалом 120°, в той час як трифазні обмотки утворюють зірку. Для кожного кроку одна клемма двигуна працює з високим рівнем, інша клемма двигуна працює з низьким рівнем, а третій вивід залишається плаваючим.

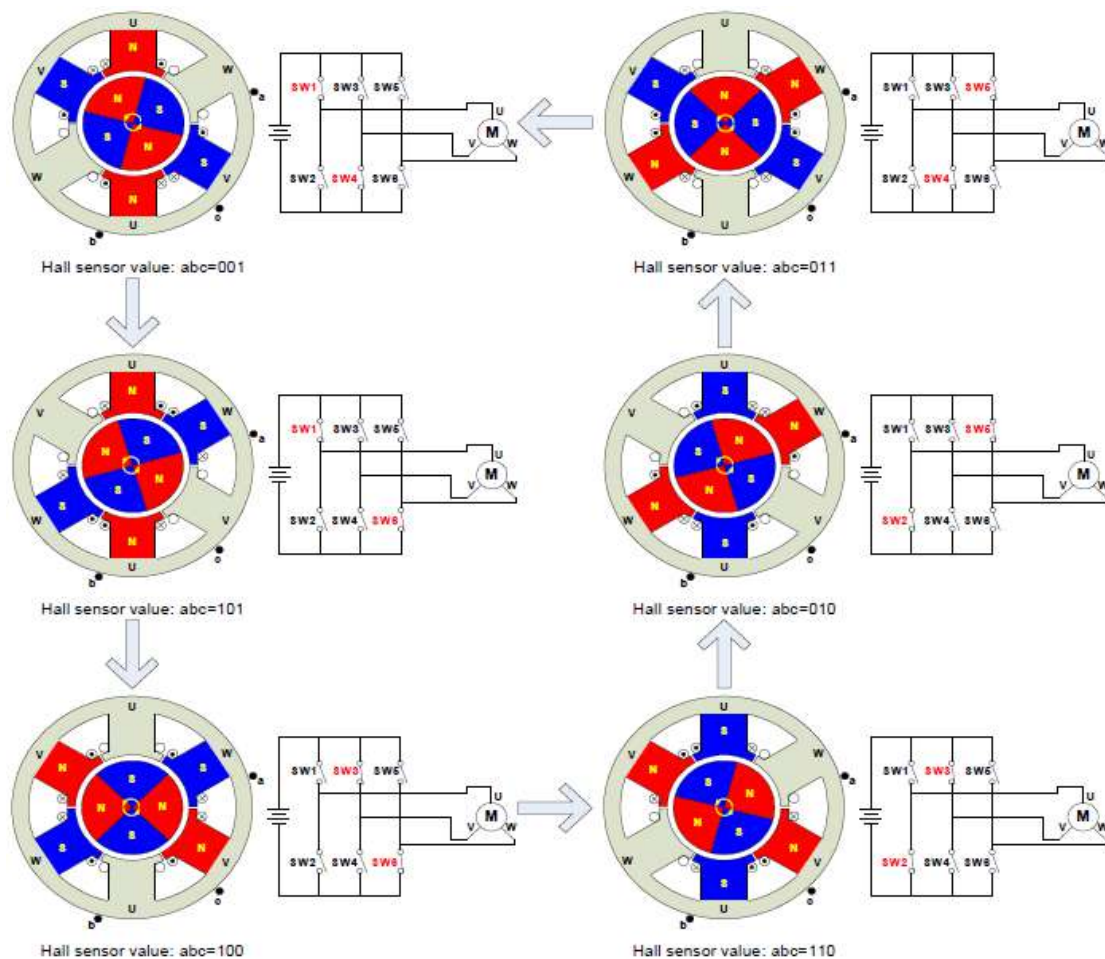


Рис. 2 – Схема включення ключів безколекторного двигуна [1]

Лабораторна установка для дослідження двигунів постійного струму містить два однакових безколекторних двигуна постійного струму зі збудженням від постійних магнітів типу CG48V 1000W 50, ротори яких з'єднані між собою (рис. 3). Один з двигунів – випробуваний, другий виконує роль електромагнітного гальма. Він закріплений за вісь ротора. Така кінематика дозволяє вимірювати момент, який долається досліджуваным двигуном. Живлення двигунів здійснюється від незалежних регульованих джерел живлення постійного струму – контролерів K1, K2, які з'єднані по шині постійного струму напругою 48 В, яка створена акумуляторною батареєю АКБ, живлення якої здійснюється від зарядного пристрою, який живиться від однофазної мережі 220 В 50 Гц. Для вимірювання швидкості обертання використовується цифровий частотомір, шкала якого проградуїрована в одиницях швидкості (тахометр).

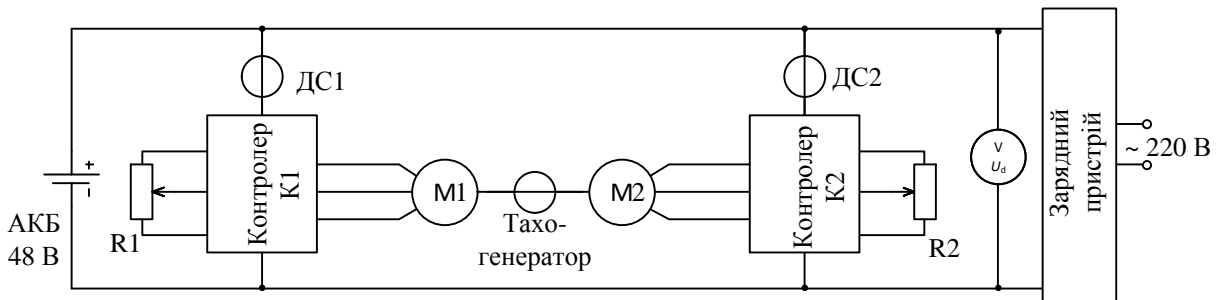


Рис. 3 – Схема лабораторного станду

Використане обладнання: безколекторні двигуни M1, M2 типу CG48V 1000W 50; контролери K1, K2 Вольта 48-60V1000W; акумуляторні батареї 48V 12.5 А-год; зарядний пристрій 48 V 10 А; універсальний цифровий блок приладів; амперметри, вольтметри електромагнітної системи – для вимірювання діючих значень струмів та напруг; потенціометри, змінні опори.

Можливі наступні варіанти навантаження двигуна, який виконує роль електромагнітного гальма (рис. 4, 5). Тут він працює в генераторному режимі і навантажений на опори R2.

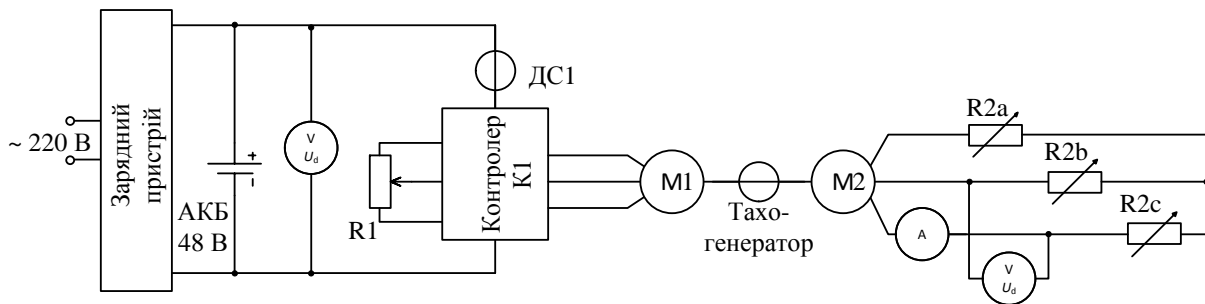


Рис. 4 – Схема лабораторного станду (модифікація 2)

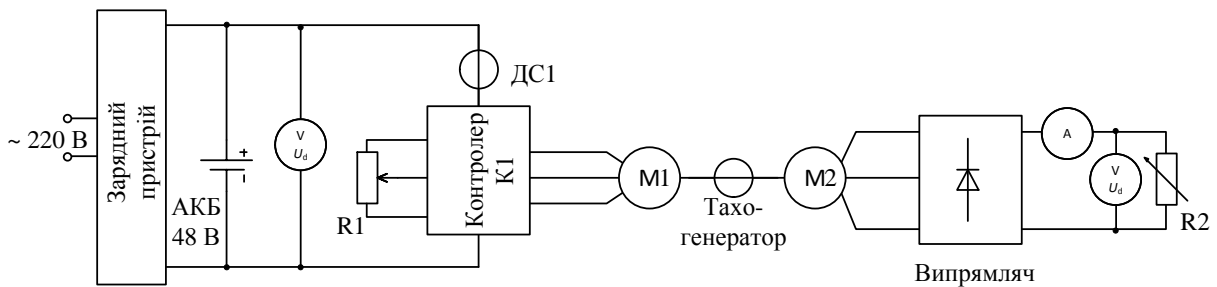


Рис. 5 – Схема лабораторного станду (модифікація 3)

Для стенду № 1 (рис. 3) розроблений порядок виконання лабораторної роботи (з використанням [3, 4]).

1. Ознайомитися з конструкціями та характеристиками двигунів, наявними в лабораторії. Ознайомитися з конструкцією стенду та схемою (рис. 3).

2. Зняти сімейство механічних характеристик двигуна. Характеристики доцільно починаючи знімати із точки холостого ходу (обмотка двигуна-гальма знеструмлена).

Зміна навантаження на двигун здійснюється шляхом зміни струму керування у двигуні-гальмі. При цьому полярності напруг повинні бути підібрані таким чином, щоб двигуни оберталися в протилежні сторони. Для кожної точки характеристики необхідно робити вимірювання споживаного випробовуваним двигуном струму.

3. Зняти сімейство регульовальних характеристик двигуна для трьох значень моменту на валу. Сталість моменту при цьому необхідно підтримувати шляхом зміни струму у двигуні-гальмі.

4. Скласти звіт. У звіті повинні бути представлені електричні схеми проведення дослідів, необхідні таблиці, графіки експериментальних механічних і регульовальних характеристик, розрахункові графіки залежностей споживаної і корисної потужності двигуна як функції швидкості обертання, висновки по роботі.

Висновки

Проведений аналіз безколекторних двигунів постійного струму, розроблений та створений лабораторний стенд для дослідження механічних та регульовальних характеристик безколекторного двигуна постійного струму (БДПС).

Розроблений стенд дозволяє проводити аналіз механічних та регульовальних характеристик БДПС.

Перелік використаних джерел:

1. AN047 Brushless DC motor fundamentals Application Note. – 2014. – 19 p. – Mode of access: https://www.monolithicpower.com/pub/media/document/Brushless_DC_Motor_Fundamentals.pdf.
2. Speed Torque characteristics of Brushless DC motor in either direction on load using ARM controller / M.V. Ramesh, J. Amarnath, S. Kamakshaiah, B. Jawaharlal, Gorantla S. Rao // *Journal of Energy Technologies and Policy*. – 2011. – Vol. 2, no.1. – Pp. 37-48.
3. Степанковський Ю.В. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Перетворюючі пристрої» («Електричні мікромашини») / Ю.В. Степанковський. – К. : НТУУ «КПІ», 2013. – 74 с.
4. Степанковский Ю.В. Преобразующие устройства приборов. Т. 1. Электродвигатели (силовые микромашины) / Ю.В. Степанковский. – К. : Корнійчук, 2002. – 207 с.

References:

1. AN047 Brushless DC motor fundamentals Application Note. 2014. – 19 p Available at: https://www.monolithicpower.com/pub/media/document/Brushless_DC_Motor_Fundamentals.pdf (accessed 15 August 2020).
2. Ramesh M.V., Amarnath J., Kamakshaiah S., Jawaharlal B., Rao Gorantla S. Speed Torque characteristics of Brushless DC motor in either direction on load using ARM controller. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 2011, vol. 2, no. 1, pp. 37-48.
3. Stepankovs'kii Iu.V. *Metodichni vkazivki do laboratornikh robot z distsiplini «Peretvoriuiuchi pristroi» («Elektrichni mikromashini»)* [Methodical instructions for laboratory work in the discipline «Transforming devices» («Electric micromachines»)]. Kiev, NTUU «KPI» Publ., 2013. 74 p. (Ukr.)
4. Stepankovs'kii Iu.V. *Preobrazuiushchie ustroistva priborov. Tom 1. Elektrodvigateli (silovye mikromashiny)* [Instrument converting devices. Vol. 1. Electric motors (power micromachines)]. Kiev, Korniiichuk Publ., 2002. 207 p. (Rus.)

Рецензент: С.В. Гулаков
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 19.10.2020

СТАН ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ КАР'ЄРНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

У статті досліджено стан електромеханічного обладнання та проведено аналіз режимів роботи тягових електроприводів кар'єрних електровозів на основі статистичних даних промислових підприємств. Розглянуто формування кар'єрного залізничного транспорту України тяговими агрегатами залежно від обсягів видобутку та експлуатації гірничо-транспортного устаткування, роботу якого продемонстровано на прикладі Полтавського гірничо-збагачувального комбінату. Проаналізовано вплив зміни електричних параметрів обмоток та умов зчеплення коліс з рейковим полотном на аварійність і працездатність багатодвигунового тягового електропривода постійного струму з двигунами послідовного збудження. Зроблено висновки щодо виявлення можливих відмов тягових електричних двигунів магістральних і кар'єрних електровозів. Сформульовано завдання подальших досліджень режимів роботи тягового електропривода електровозів: створення математичних моделей та обґрунтування методів їх аналізу, розроблення заходів контролю електричних параметрів тягових двигунів, їх керування при зміні умов зчеплення для забезпечення підвищення експлуатаційних показників.

Ключові слова: тяговий електропривод, кар'єрний електровоз, стан електромеханічного обладнання, режими роботи.

A.M. Artemenko, O.P. Chornyi, O.K. Danyleiko. State of electromechanical equipment and analysis of operating conditions of the traction electric drive of open-pit electric locomotives. The paper investigates the state of electromechanical equipment and analyzes the operating conditions of traction electric drives of quarry electric locomotives on the basis of statistical data from industrial enterprises. The work considered various types of rolling stock: locomotives, diesel locomotives and traction units. The analysis of modern achievements and publications on the use of electric locomotive transport in quarries has been carried out. The issues of power supply of electric locomotives in open pits have been analyzed. It has been concluded that the traction electric drive is the most loaded part of the electric locomotive; it being the reason for most of all failures. Failures of the traction electric drive occur both due to the operating conditions and due to the quality of the repair. An assessment of the impact of the rail track profile, the voltage changes in the switching network, workload and traffic intensity on the operating conditions of traction electric motors has been formulated. The formation of open-pit railway transport in Ukraine with the help of traction units, depending on the production volume and operation of mining and transport equipment, has been considered, the work of the Poltava mining and processing plant being the illustration. The influence of changes in the windings electrical parameters and the wheels adhesion to the railroad bed on the accident rate and performance of a multi-motor traction DC electric drive with sequential excitation motors has been analyzed. The conclusions on identifying possible failures of traction electric motors of mainline and open-pit electric locomotives have been drawn. The tasks of further studies of the operating conditions of the traction electric drive of electric locomotives have been formulated, they are: the creation of mathematical models and the substantiation of methods for their analysis, the development of measures for monitoring

¹ ст. викладач, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, a.m.artemenko@gmail.com

² д-р техн. наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0001-8270-3284, aleksei.chornyi@gmail.com

³ ст. викладач, ДВНЗ «Криворізький національний університет», м. Кривий Ріг, danyleiko@knu.edu.ua

the electrical parameters of traction motors, their control with changing adhesion conditions to ensure an increase in performance.

Keywords: *traction electric drive, quarry electric locomotive, state of electromechanical equipment, operating conditions.*

Постановка проблеми. На великих залізничних, вугільних і азбестових рудниках України одним з основних видів технологічного транспорту залишається залізничний. Багаторічний досвід застосування електровозного транспорту в кар'єрах показує його високу ефективність за умови використання в бажаних гірничотехнічних умовах експлуатації. Сучасні досягнення та новітні розробки вчених в галузі управління електромеханічними системами (ЕМС), і, зокрема, електроприводами промислових електровозів не дозволяють отримати необхідні результати, так як стан рейкових шляхів механічного обладнання і тягових електродвигунів у край незадовільний. Необхідно відзначити, що перераховані чинники безпосередньо пов'язані між собою, тому вирішити проблему якісного ремонту електродвигунів без поліпшення стану шляхів неможливо.

Такі дефекти рейкового полотна, як розрив, виїмка, вищербленість, відображаються на стані поверхонь колісних пар. Зниження діаметра колеса в окремих випадках становить 10-12 мм, а вищербленості, що з'являються, спричиняють аналогічні пошкодження поверхні рейки, а іноді й зміни геометрії головки рейки.

Поява цих дефектів призводить до просковзування, додатково пошкоджуючи рейкове полотно і колеса в місці контакту. Зменшення діаметра колеса зумовлює обертання колісних пар з різною швидкістю, що приводить до безперервного просковзування поверхні колеса по поверхні рейки. При цьому відбувається нерівномірний розподіл навантаження між тяговими двигунами. Двигуни з більшим навантаженням перегріваються і швидко виходять з ладу. Їх ремонт здійснюється на спеціалізованих ремонтних підприємствах, що забезпечують, відповідно до стандартів, відхилення в вихідних параметрах до 10% по якорній обмотці і 2% по обмотці збудження. Нерівномірність параметрів спричиняє нерівномірну жорсткість механічних характеристик і нерівномірний розподіл навантаження між двигунами. Тому актуальним завданням є дослідження стану електромеханічного обладнання та режимів роботи тягового електроприводу кар'єрного електровозного транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема підвищення ефективності роботи кар'єрних електровозів привертає увагу науковців уже кілька десятиліть, але й досі не здобула остаточного вирішення. Досліджуваним проблемам присвячені праці В.П. Браташа, Г.К. Гетьмана, О.М. Гончарова, А.А. Колби, М.О. Костіна, Б.А. Кузнецова, Г.Г. Півняка, Д.Й. Родькіна та ін., у яких запропоновано різні підходи і рішення. Із сучасних досліджень у сфері удосконалення технології випробування, діагностики та експлуатації тягових електричних машин слід відмітити роботи В.В. Артмоєнка, О.Б. Бабаніна, Л.В. Дубинця, П.О. Лози, Б.І. Мокіна, О.М. Сінчука, Д.Л. Сушка та інших учених. Питання електропостачання і живлення електровозів розглянуті в роботах [1, 2]. Необхідно, однак, відзначити, що централізоване енергопостачання вимагає створення досить великої інфраструктури (тягові підстанції, контактна мережа тощо), що поряд з високою вартістю локомотивів [3] і значними обсягами розносу бортів кар'єрів для розміщення комунікацій обумовлює високу капіталомісткість залізничного транспорту. Розширене використання залізничного транспорту [4] змінило підходи до проектування об'єктів гірничо-рудної промисловості. Об'єктивними причинами є порівняно невисокий (в 1,8 і 6 разів менше в порівнянні з автомобільним та конвеєрним відповідно) середній поздовжній ухил траси залізничного транспорту (0,037). При цьому спостерігається тенденція збільшення відставання розкривних робіт внаслідок використання залізничного транспорту, але то в першу чергу пов'язано з помилками в його застосуванні в конкретних гірничо-технічних умовах, неправильними рішеннями щодо розкриття горизонтів кар'єрів.

Одним з визначальних обмежень розширеного застосування залізничного транспорту з підвищеними ухілами залізничних шляхів є значна величина нормативного гальмівного шляху на керівному ухилі шляхів, яка була обґрунтована також в середині минулого століття. Між тим є розробки, що дозволяють за рахунок застосування принципово нових локомотивних і вагонних гальмівних колодок, легованих фосфором, скоротити гальмівний шлях в 1,5...2,0 рази [5-7]. При

цьому термін служби колодок в 2,0...2,5 рази вище вживаних в даний час, а знос бандажів колісних пар скорочується в 1,3...1,5 рази [5]. Детально на умови експлуатації тягових електричних машин на різних дорогах впливає профіль колії, коливання напруги в контактній мережі, вантажонапруженість та інтенсивність руху [8-10].

Мета статті – проведення досліджень стану електромеханічного обладнання та аналіз режимів роботи тягових електроприводів кар’єрних електровозів на основі статистичних даних промислових підприємств.

Виклад основного матеріалу. Кар’єрний транспорт є сполучною ланкою в загальному технологічному процесі. Від чіткої роботи кар’єрного транспорту залежить ефективність суміжних виробничих процесів – виймально-вантажних і відвальних робіт. До основних видів кар’єрного транспорту належать [4, 11-18]: автомобільний транспорт; залізничний транспорт; конвеєрний та ін.

В даний час значну частину транспортуючих гірських порід на відкритих гірничих роботах перевозять автотранспортом. Але він є і самим дорогим. Частка витрат на транспортування досягає 40...60% загальної вартості робіт в кар’єрі [19-22]. Високі експлуатаційні витрати включають найбільш ємні складові, такі як паливо і мастила, шини, змінні агрегати, підтримання доріг тощо. У свою чергу за розміром капітальних витрат автотранспорт поступається залізничному і конвеєрному. Залізничний кар’єрний транспорт є найбільш економічним і продуктивним у порівнянні з автомобільним та конвеєрним.

У зв’язку з цим на сьогоднішній день на великих залізрудних, вугільних і азбестових рудниках України одним з основних видів технологічного транспорту продовжує залишатися залізничний. Багаторічний досвід застосування електрифікованого залізничного транспорту в глибоких кар’єрах показує його високу ефективність за умови використання в бажаних гірничотехнічних умовах експлуатації. Аналіз науково-технічних та проектних рішень дозволяє стверджувати, що в перспективі як на діючих, так і на розроблених нових родовищах великої продуктивності, електрифікований залізничний транспорт буде залишатися одним з головних.

На рис. 1 [11, 16] наведено обсяг робіт гірничо-транспортного устаткування по залізрудній промисловості України в цілому. З діаграми видно, що транспортування залізничним транспортом становить 31% і займає друге місце за кількістю виконуваних робіт в кар’єрах. Найбільш експлуатованим і поширеним є автотранспорт, проте, як згадувалося вище, його утримання вимагає значних коштів.



Рис. 1 – Діаграма обсягу робіт гірничо-транспортного устаткування

Залізничний транспорт ефективно застосовується при широкому зміні обсягів перевезення (20...100 млн. т/рік і більше); раціональна відстань транспортування становить 5-10 км і більше, радіуси кривих – до 80-100 м, ухили шляху не перевищують 2,5...3,5° (40...50%), тому він найбільш ефективно використовується на родовищах з великими розмірами кар’єрного поля і при витриманому заляганні пластів або кар’єрних тіл. Глибина кар’єрів при залізничному транспорті становить зазвичай не більше 200-250 м, а із застосуванням тунельних схем розкриття глибоких горизонтів досягає 350-400 м [12, 23, 24].

До основних переваг електрифікованого залізничного транспорту слід віднести: високий середній експлуатаційний коефіцієнт корисної дії; економічність (порівняно низька собівартість перевезення гірничої маси) і надійність в експлуатації; можливість значного переванта-

ження електровозів; простота управління і ремонту; мала залежність від кліматичних умов; незначний негативний вплив на навколишнє середовище.

До недоліків відносяться: можливість долати відносно малі уклони шляху, залежність від електроенергії, тобто необхідність створення електрифікованих шляхів; необхідність створення та утримання залізничного полотна.

Глибоке введення залізничного транспорту в кар'єр забезпечується поетапним підвищенням крутизни трас. Горизонти послідовно розкриваються траншеями спочатку з ухилом шляхів 30%, потім 50% і, нарешті, 60%. Причому кожна траншея формує групи станцій, з яких у свою чергу відпрацьовується той чи інший напрямок. Робоча зона розкривається переважно прямими заїздами. Станції максимально пов'язані між собою, що надає гнучкість подальшого розвитку, можливість як оперативного, так і довгострокового перерозподілу вантажопотоків [25-27]. Щоб уникнути розміщення роздільних пунктів в робочій зоні і, як наслідок, стримування розвитку гірничих робіт, що характерно для багатьох кар'єрів, де застосовується залізничний транспорт, формування схеми колійного розвитку проводиться поетапно з тимчасовою консервацією бортиків. Постійна транспортна схема відбудовується поступово по мірі постановки бортиків в граничний стан. Таким чином, досвід ефективного застосування залізничного транспорту в кар'єрах дозволяє констатувати, що тенденція більш глибокого введення залізничного транспорту в кар'єри зберігається і в сучасних умовах.

Основним напрямком розвитку і вдосконалення кар'єрного транспорту вважається збільшення ухилів шляхів до 60...80%, що дозволяє збільшити глибину введення залізничного транспорту в кар'єри до 350-450 м, зменшити сумарні витрати на транспортування гірничої маси з глибини 300-350 м на 20...25%. В якості перспективного рішення деякі дослідники пропонують тунельне розкриття [26-30]. Реалізація цього проекту в сучасних умовах представляється важко здійсненою. Це пов'язано, перш за все, з тим, що він передбачає значні капітальні вкладення і великий термін будівництва тунелю, що при прийнятті рішень про розвиток транспортної системи робить цей варіант свідомо неконкурентоспроможним.

В даний час у глибоких кар'єрах широке поширення знайшли електровози і тягові агрегати з напругою 1,65 і 3,3 кВ постійного струму і 10 кВ змінного струму. Існуючі типи тягових засобів за своїм технічним рівнем і перспективним технологічним вимогам не забезпечують ефективну їх експлуатацію в глибинній зоні кар'єра.

Досить сказати, що проектні рішення щодо них формувалися в середині минулого століття. Термін експлуатації багатьох локомотивів значно перевищує нормативний. Положення не рятує серійний випуск модернізованого тягового агрегату НП-1. Нововведення, застосовані в конструкції НП-1, лише трохи полегшують експлуатацію агрегату і збільшують реалізовану силу тяги на 8%. Принципово нові локомотиви для відкритих гірських розробок створюються на основі асинхронних і індукторних тягових двигунів. Це дозволяє збільшити їх потужність на 25...30%, на 30% корисну масу і на 19% продуктивність, знизити енергетичні витрати на підйом гірничої маси на 6% при ухилах 60% і на 13% при ухилах 150%, зменшити обсяги гірничо-капітальних робіт, а також поліпшити екологічну обстановку в глибинній зоні кар'єра [16].

На круговій діаграмі (рис. 2) [8] показані залізничні перевезення рухомим складом в кар'єрах чорної металургії України. З діаграми видно що електрорухомий склад, що включає 245 електровозів та 356 тягових агрегатів, займає близько 60%, а тепловози з їх кількістю 448. Тепловози використовуються на більшості рудників Криворізького басейну [12, 23, 24].

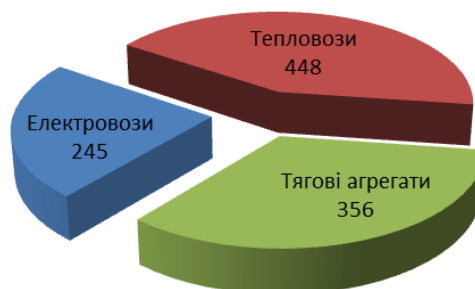


Рис. 2 – Рухомий склад кар'єрного залізничного транспорту України

Рухомий склад в кар'єрах складається з вагонів і локомотивів. Для перевезення корисних копалин широко використовуються вагони типу «гондола» вантажопідйомністю 60-90 тон і, частково, типу «хопер» вантажопідйомністю 60 тон.

У вагонів типу «гондола» дно складене з окремих щитів, що обертаються на шарнірах біля хребтової балки. Опущені щити утворюють похилі площини, за якими вантаж зсипається на обидві сторони від осі колії. Вагон типу «хопер» має похилі торцеві стінки і розвантажується через люки, розташовані нижче рами вагона. Вантаж зсипається між рейками або на бік.

Для перевезення розкривних порід застосовуються саморозвантажувальні вагони – думпкари з одностороннім або двостороннім розвантаженням. Конструкція думпкарів розрахована на сприйняття значних динамічних навантажень від падіння великих шматків породи масою 3-5 тон з висоти 1,5...3 метри (при навантаженні екскаваторами). Думпкари також широко застосовуються і для транспортування руди.

На кар'єрах ВАТ «Полтавський ГЗК» для перевезення руди і розкривних порід використовуються думпкари вантажопідйомністю 105 тон при вазі тари 45 тон. З 2010 р. ввелися в експлуатацію думпкари тієї ж вантажопідйомності, але з вагою тари вже 50 тон. Таким чином, вага одного навантаженого думпкара становить 155 тон. Розглянемо детальніше кожен з видів рухомого складу.

Локомотиви. В якості локомотивів в кар'єрах застосовуються електровози, тепловози і тягові агрегати. Перевагами електровозів є відносно високий ККД, висока швидкість руху на керівному підйомі, здатність подолання підйомів до 40 проміле, постійна готовність до роботи, простота обслуговування і надійна робота в суворих кліматичних умовах [1]. Недоліками електровозів є залежність від джерела енергії і значні початкові витрати на будівництво контактної мережі та тягової підстанції. Наявність контактної мережі на забійних шляхах ускладнює організацію вибухових і виймально-навантажувальних робіт.

Тепловози. Це локомотиви, обладнані двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ). ДВЗ, встановлений в тепловозі, забезпечує його автономність і виключає необхідність контактної мережі, вартість якої становить 12...15% загальної вартості транспортування. Тепловози мають високий ККД, рівний 24...26%, і здатні долати значні підйоми [2]. До недоліків тепловозів належить складність їх ремонту, а також значне зниження швидкості на підйом.

Тягові агрегати. Тягові агрегати являють собою поєднання електровоза управління, секції автономного живлення (дизельна секція) і кілька моторних думпкарів. Наявність моторних думпкарів у складі тягового агрегату дозволяє значно збільшити зчїпну вагу і корисну масу поїзда (в 2...2,5 рази в порівнянні з електровозами) або керівний підйом (до 60%). Наявність же дизельної секції в складі тягового агрегату забезпечує можливість виключення контактної мережі на пересувних коліях [3, 22].

Тенденції розвитку промисловості свідчать про збільшення одиничної потужності застосовуваного в кар'єрах обладнання. Збільшення зчїпної ваги локомотивів тягне за собою підвищення корисної маси поїзда до 1200-1800 тон. При використанні потужних екскаваторів зменшується їх загальна кількість в кар'єрі, спрощуються схеми колійного розвитку на уступах і в кар'єрі в цілому.

Одним з поширених тягових агрегатів являється ОПЭ1А, не зважаючи на те, що він був створений в 70х роках минулого століття. Але все ж він займає своє місце в гірничій виробці. На рис. 3 представлена кругова діаграма, яка показує відсоткову частку всіх випущених моделей тягових агрегатів [12].

У кар'єрах ПрАТ «Полтавський ГЗК» використовуються: тепловози серії ТЕМ7 – маневрово-вивізні тепловози, спеціально призначені для виконання важкої маневрової роботи і вивезення гірської маси з кар'єру; тепловози ЧМЕ – маневрові тепловози. Використовується в якості локомотива господарського поїзда (робота краном, хопрами, гідромонітором), а так само для проведення маневрової роботи; електровози (тягові агрегати) ОПЭ-1А і ОПЭ-1АМ – в якості локомотива «вертушки».

Виходячи з місцевих умов, «вертушка» складається з шести думпкарів для тепловоза ТЕМ7 і дванадцяти думпкарів для електровоза ОПЭ-1АМ. На даний момент локомотивний парк ЖДЦ ВАТ «Полтавський ГЗК» має 34 локомотива, призначені для вивезення гірської маси з кар'єра, з яких тепловозів – 19, електровозів ОПЭ-1А (ОПЭ-1АМ) – 15. Але, у зв'язку з пог-

либленням кар'єра і збільшенням обсягів перевезень, перевага віддається електровозам. Так, щозміни на лінії знаходяться 12 електровозів і 6 тепловозів (рис. 4) [11].

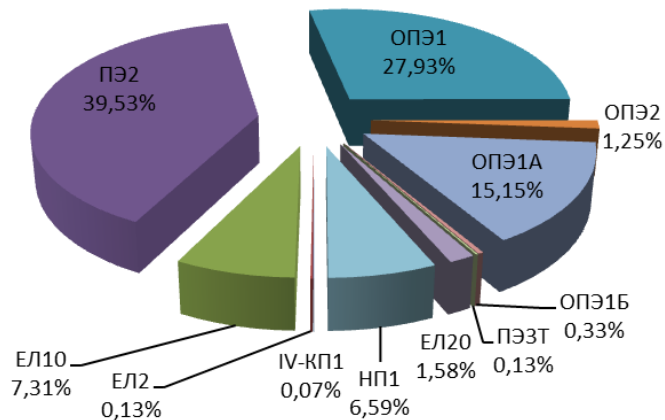


Рис. 3 – Діаграма випущених тягових агрегатів в країнах колишнього СРСР

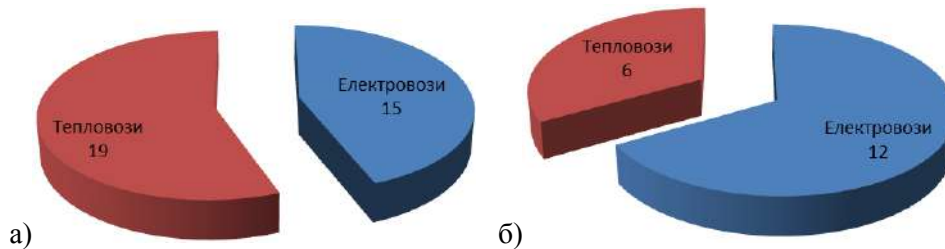


Рис. 4 – Локомотивний парк залізничного цеху ВАТ «Полтавський ГЗК»: а – локомотиви в наявності; б – локомотиви, експлуатовані на лінії

Тяговий електропривод є найбільш навантаженою частиною електровоза. На його частку припадає більша частина всіх відмов. Відмови тягового електроприводу відбуваються як через умови експлуатації, так і з-за якості ремонту.

Умови експлуатації тягових електричних машин на різних дорогах різко відрізняються не тільки умовами експлуатації, але і профілем колії (рис. 5), коливаннями напруги в контактній мережі, вантажнапруженістю та інтенсивністю руху [8-10].

Експлуатація тягового електроприводу при значних перепадах температур посилюється різними змінами швидкостей руху локомотивів, що викликають настільки ж різку зміну навантажень двигунів, їх частоти обертання, поштовхи і вібрацію. Великі навантаження, часті пуски призводять до нагрівання якірних обмоток і теплового руйнування ізоляції [31-36]. Нерівномірність існуючого зменшеного розподілу охолоджуючої кількості повітря всередині двигуна, відмінності в навантаженнях осі і діаметрів бандажів колісних пар, розбіжність швидкісних характеристик двигунів призводять до нерівномірного перегріву обмоток якоря і полюсних котушок [37].

При перевищенні допустимої температури обмоток тягового електроприводу його ізоляція стає жорсткою і крихкою і в значній мірі втрачає електричну міцність. При перегріві обмоток, летючі речовини з ізоляційних матеріалів швидко випаровуються, що призводить до утворення тріщин, розшарувань і пористості. Через неякісні ущільнення колекторних люків, повітропроводів, а також через незачинені вентиляційні отвори двигунів, конструкція яких передбачає захист від попадання снігу, всередину двигунів все-таки потрапляє вода і сніг. Також в двигунах конденсується волога і при постановці холодного локомотива в тепле приміщення.

Якщо двигуни не перебувають під навантаженням, то волога, яка в них потрапляє, поглинається ізоляцією. Проникаючи в найдрібніші тріщини і пори ізоляційного матеріалу, вона значно знижує його електричну і механічну міцність. Подібне зволоження ізоляції відбувається особливо інтенсивно при підвищенні вологості з різким збільшенням температури навколишнього середовища і часу простою електровоза в неробочому стані.



Рис. 5 – Фрагменти стану рейкового полотна і стану колісних пар: а – загальний вигляд; б – розрив; в – виїмка; г – вищербленість; д – зміна діаметра колеса; е – вищербленість колеса

Осінньо-зимовий період є найбільш несприятливим для тягових двигунів. Перепади температури, потрапляння снігу всередину двигуна через нещільності колекторних люків і повітропроводів призводять до зволоження ізоляції. Це сприяє різкому зниженню її опору.

При підвищенні температури повітря під час добових коливань температури або відлиг тяговий електродвигун нагрівається повільно. При зіткненні повітря з більш холодними частинами тягового електроприводу, повітря охолоджується, його вологоємність зменшується і надлишок водяної пари осідає на обмотках і колекторі у вигляді інею, що й призводить до намокання та руйнації ізоляції. Утворення інею залежить від швидкості зміни температури і відносної вологості повітря. Так, за температури нижче -20°C іній не утворюється через малий перепад температури. Проте за температури $5\dots 6^{\circ}\text{C}$ достатньо 6 годин для утворення інею [31, 34]. Для запобігання його утворення перед постановкою в опалювальний цех тяговий двигун потрібно підігрівати. Для цього використовується метод підігріву тягових двигунів від вентиляторів електровозів. Перед тим, як поставити електровоз в цех, включають вентилятори і двигуни підігриваються до температури в цеху. І тільки після цього встановлюють в цех.

Окремі пошкодження якорів тягових двигунів відбуваються через неправильні режими керування локомотивом, що призводить до боксування колісних пар, перевантаження тягових електричних машин. Котушки головних і додаткових полюсів виходять з ладу в результаті потрапляння вологи в остова через неякісні їх ущільнення, а також ослаблення кріплення полюсних котушок на сердечниках. В процесі експлуатації тягові електродвигуни (ТЕД) піддаються значним динамічним навантаженням, що, в першу чергу, негативно позначається на роботі вузла щіткотримачів і стані робочої поверхні колектора, а в кінцевому підсумку призводить до підвищеного іскріння під щітками, погіршення комутації, утворення кругового вогню по колектору і виникненню електричної дуги.

Аналіз літератури [33-38] з оцінки технічного стану локомотивів і визначення надійності їх роботи показав, що найбільш пошкоджуваним вузлом є саме ТЕД. Найбільша кількість виходів з ладу ТЕД приходиться на пробій ізоляції (рис. 6, а). Здебільшого це визначається саме складними умовами їх експлуатації: перевантаженнями, комутаційними перенапруженнями, зволоженням тощо [35]. Так, найбільша кількість виходів з ладу ТЕД через пробій ізоляції спостерігається в період перепаду температур, коли сильно зростає ймовірність зволоження обмоток через попадання вологи в електродвигун. Відсоток причин виходу з ладу ТЕД кар'єрних електровозів дещо інший (рис. 6, б).

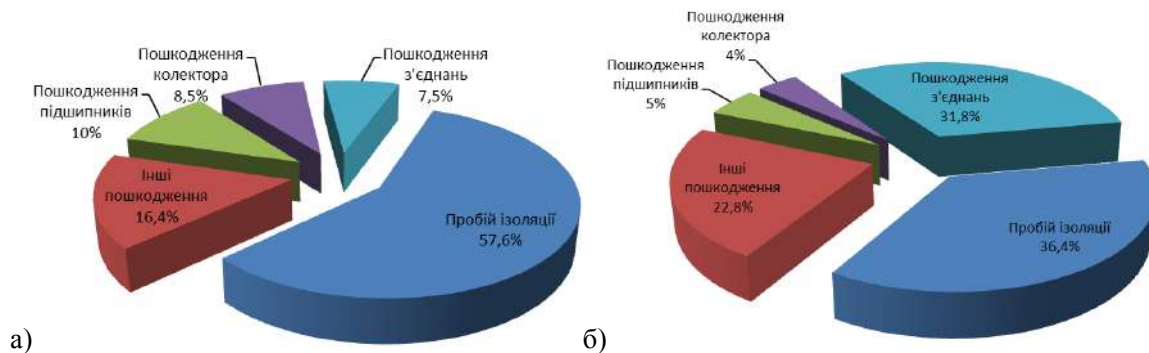


Рис. 6 – Розподіл відмов ТЕД: а – магістральних електровозів, б – кар'єрних електровозів

Як показує аналіз, число виходів з ладу тягових електроприводів кар'єрних електровозів при пробі ізоляції дещо менший в порівнянні з магістральними електровозами, але при цьому збільшується кількість відмов при пошкодженні механічних з'єднань тягового електропривода, включаючи й обрив валу двигуна.

Висновки

Наведені вище особливості технологічного процесу транспортування, умови експлуатації та керування системами електроприводів обумовлюють актуальність проведення поглиблених досліджень режимів роботи тягового електроприводу електровозів, створення математичних моделей та методів їх аналізу для розроблення заходів з контролю електричних параметрів тягових двигунів, їх керуванням при зміні умов зчеплення для забезпечення підвищення його експлуатаційних показників. Це потребує вирішення наступних задач: аналіз стану електромеханічного обладнання та режимів роботи тягових електроприводів кар'єрних електровозів; аналізу систем контролю та моніторингу стану електромеханічного обладнання електровозів; аналізу роботу тягового електропривода з урахуванням нерівності параметрів двигунів та геометрії колісних пар; розрахунків ймовірності аварійної роботи тягового електроприводу; розробки системи контролю за параметрами тягового електропривода; розробки математичних моделей для комплексного дослідження тягового електропривода з урахуванням пробоксовування колеса по рейках, а також проведення експериментальних досліджень режимів роботи тягового електропривода з імітацією процесу боксування.

Перелік використаних джерел:

1. Ющенко А.И. Справочник машиниста рудничного локомотива / А.И. Ющенко, В.П. Гудалов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1981. – 200 с.
2. Долгов В.А. Тепловозы ТЗМ1 и ТЗМ2 / В.А. Долов. – М. : Транспорт, 1972. – 256 с.
3. Симсон А.З. Двигатели внутреннего сгорания (тепловозные двигатели и газотурбинные установки) / А.З. Симсон. – М. : Транспорт, 1980. – 384 с.
4. Дьомін Ю.В. Залізнична техніка міжнародних транспортних систем (вантажні перевезення) / Ю.В. Дьомін. – К. : Юнікон – Пресс, 2001. – 342 с.
5. Расчет и проектирование механической и пневматической частей тормозов вагонов : учебное пособие / П.С. Анисимов, В.А. Юдин, А.Н. Шамаков, С.Н. Коржин; под общ. ред.

- П.С. Анисимова. – М. : Маршрут, 2005. – 248 с.
6. Асадченко В.Р. Автоматические тормоза подвижного состава : учебное пособие / В.Р. Асадченко. – М. : Маршрут, 2006. – 392 с.
 7. Бабаев А.М. Принцип дії, розрахунки та основи експлуатації гальм рухомого складу залізниць : навчальний посібник / А.М. Бабаев, Д.В. Дмитрієв. – К. : ДЕТУТ, 2007. – 176 с.
 8. Курган М.Б. Залежність експлуатаційних витрат від рівня швидкості на ділянках, що обмежують рух поїздів / М.Б. Курган, О.С. Маркова // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: тези 66-ї Міжн. наук.-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2006. – С. 211-212.
 9. Курган М.Б. Втрати часу руху поїздів на ділянках обмеження швидкості / М.Б. Курган, О.С. Маркова // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: тези 67-ї Міжнародної наук.-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2007. – С. 206-207.
 10. Курган М.Б. Фактори, що впливають на першочерговість усунення обмежень швидкості руху поїздів, пов'язаних зі станом залізничної колії / М.Б. Курган, О.С. Чернишова // Проблеми механіки залізничного транспорту: тези доп. 12-ї Міжн. наук. конф. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 90.
 11. Транспорт на горных предприятиях / Под общ. ред. проф. Б.А. Кузнецова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1976. – 552 с.
 12. Ярмолюк В.Т. Основи гірничої справи / В.Т. Ярмолюк. – К. : Либідь, 2000. – 280 с.
 13. Про залізничний транспорт : Закон України від 04.07.1996 № 273/96-ВР зі змінами і доповненнями станом на 2005 рік // Відомості Верховної Ради (ВВР). – 1996. – № 40. – Ст. 184. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/273/96-%D0%B2%D1%80#Text>.
 14. Кірпа Т.М. Залізниця України / Т.М. Кірпа, О.М. Пшінько, І.В. Агієнко. – Дніпропетровськ : Арт-Пресс, 2001. – 328 с.
 15. Кушнірчук В.Г. Перевезення вантажів залізничним транспортом: довідник / В.Г. Кушнірчук, В.І. Петров. – К. : Основа, 2001. – 512 с.
 16. Смоляницький Д.М. Организация работы шахтного транспорта / Д.М. Смоляницький. – К. : Техника, 1980. – 253 с.
 17. Статут залізниць України. – К. : Транспорт України, 1998. – 83 с.
 18. Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование : учебник / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый; под ред. О.Н. Синчука. – Кривой Рог-Донецк : ЧП А.В. Щербатых, 2015. – 428 с.
 19. Автомобили-самосвалы / В.Н. Белокуров [и др.]; под общ. ред. А.С. Мелик-Саркисянца. – М. : Машиностроение, 1987. – 216 с.
 20. Основы теории автотранспортных систем (Грузовые автомобильные перевозки) / В.И. Николлин, Е.Е. Витвицкий, С.М. Мочалин, Н.И. Ланьков. – Омск : Изд-во ОмГПУ, 1999. – 281 с.
 21. Гришкевич А.И. Автомобили: Теория / А.И. Гришкевич. – М. : Высшая школа, 1986. – 208 с.
 22. Закин Я.Х. Маневренность автомобиля и автопоезда / Я.Х. Закин. – М. : Транспорт, 1986. – 136 с.
 23. Теоретические и практические аспекты строения архитектур современных тяговых электромеханических комплексов шахтных электровозов : кол. монография : в 2-х т. Т. 1. Тяговые электромеханические комплексы постоянного тока / О.Н. Синчук, Ф.И. Караманиц, В.Л. Дебелый, В.О. Черная, В.А. Федотов, Д.О. Кальмус, О.А. Удовенко, С.Н. Якимец, А.Б. Семочкин, Л.В. Сменова; под ред. О.Н. Синчука. – Кривой Рог : ЧП А.В. Щербатых, 2018. – 192 с.
 24. Теоретические и практические аспекты строения архитектур современных тяговых электромеханических комплексов шахтных электровозов: кол. монография : в 2-х т. Т. 2. Тяговые электромеханические комплексы переменного тока / И.О. Синчук, Ф.И. Караманиц, В.Л. Дебелый, И.А. Козакевич, В.А. Федотов, Л.В. Сменова, А.В. Омельченко, Д.А. Шокарев; под ред. О.Н. Синчука. – Кривой Рог : ЧП А.В. Щербатых, 2018. – 2 т. – 184 с.
 25. Лукин В.В. Вагоны : общий курс / В.В. Лукин, П.С. Анисимов, Ю.П. Федосеев. – М. : Маршрут, 2004. – 424 с.
 26. Інструкція з організації руху вантажних поїздів підвищеної ваги й довжини на залізницях. – К. : Транспорт України, 2000. – 43 с.
 27. Типовий технологічний процес роботи вантажної станції ЦД 0017. – К. : ДАЗТ, 2004. – 262 с.

28. Нормативні акти з безпеки руху поїздів. – К. : Транспорт України, 2002. – 142 с.
29. Інструкція з оперативного планування поїзною і вантажною роботою. – К. : Транспорт України, 2004. – 40 с.
30. Інструкція з розрахунків пропускної спроможності залізниць України ЦД 0036. – К. : Транспорт України, 2002. – 375 с.
31. Організація технологічних процесів ремонту ТРС із застосуванням засобів діагностування / В.Г. Пузир, О.С. Крашенінін, І.Г. Крамчанін, А.П. Фалендиш // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2004. – Вип. 57. – С. 31-34.
32. Тартаковський Е.Д. Технологія передрейсового контролю локомотивів і локомотивних бригад / Е.Д. Тартаковський, В.Г. Пузир // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2002. – Вип. 49. – С. 75-79.
33. Пузир В.Г. Вибір аналітичної моделі для оцінювання якості управління локомотивом / В.Г. Пузир, І.В. Ремез // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2004. – Вип. 64. – С. 164-171.
34. Диагностика изоляции тяговых электродвигателей электровозов на основе наноинтерферометрических оптоволоконных датчиков / М.Н. Петров, А.И. Орленко, О.А. Терегулов, Э.В. Лукьянов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 15. – С. 139-141.
35. Авилов В.Д. Контроль технического состояния и оценка ресурса тяговых двигателей и колесно-моторных блоков подвижного состава / В.Д. Авилов, В.В. Харламов, В.Н. Костюков // Сборник научных работ ОАО «РЖД». – 2006. – С. 28-32.
36. Діагностування тягових електродвигунів за нерівномірністю обертання якоря / Б.С. Бондар, О.Б. Очкасов, Д.В. Черняєв, І.Я. Шевченко // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – Вип. 3 (45). – С. 13-21.
37. Афанасов А.М. Повышение энергетической эффективности испытаний тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока / А.М. Афанасов // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 1. – С. 12-15. – Режим доступа : DOI: 10.20998/2074-272X.2015.1.02.
38. Афанасов А.М. Розвиток наукових основ та вдосконалення енергоефективних методів випробування тягових електричних машин постійного та пульсуючого струму : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.09, 05.22.12 / Афанасов Андрій Михайлович. – Дніпропетровськ, 2013. – 39 с.

References:

1. Iushchenko A.I., Gudalov V.P. *Sravochnik mashinista rudnichnogo lokomotiva* [Mine locomotive driver's guide]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 200 p. (Rus.)
2. Dolgov V.A. *Teplovozy TZM1 i TZM2* [Diesel locomotives TZM1 and TZM2]. Moscow, Transport Publ., 1972. 256 p. (Rus.)
3. Simson A.Z. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia (teplovoznye dvigateli i gazoturbinnye ustanovki)* [Internal combustion engines (diesel engines and gas turbines)]. Moscow, Transport Publ., 1980. 384 p. (Rus.)
4. D'omin Iu.V. *Zaloznichna tekhnika mizhnarodnikh transportnikh sistem (vantazhni perevezennia)* [Railway equipment of international transport systems (freight transportation)]. Kiev, Iunikon – Press Publ., 2001. 342 p. (Ukr.)
5. Anisimov P.S., Iudin V.A., Shamakov A.N., Korzhin S.N. *Raschet i proektirovanie mekhanicheskoi i pnevmaticheskoi chastei tormozov vagonov: ucheb. posobie* [Calculation and design of mechanical and pneumatic parts of car brakes: textbook]. Moscow, Marshrut Publ., 2005. 248 p. (Rus.)
6. Asadchenko V.R. *Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava: ucheb. posobie* [Automatic brakes of rolling stock: textbook]. Moscow, Marshrut Publ., 2006. 392 p. (Rus.)
7. Babaev A.M., Dmitriev D.V. *Printsip dii, rozrakhunki ta osnovi ekspluatatsii gal'm rukhomogo skladu zaloznits'*: *navch.posibnik* [Principle of operation, calculations and bases of operation of brakes of a rolling stock of railways: textbook]. Kiev, DETUT Publ., 2007. 176 p. (Ukr.)
8. Kurgan M.B., Markova O.S. *Zalezhnist' ekspluatatsiynikh vitrat vid rivnia shvidkosti na diliankakh, shcho obmezhuut' rukh poizdiv. Tezi 66 Mizhn. Nauk.-prakt. konf. «Problemi ta perspektivi rozvitku zaloznichnogo transportu»* [Dependence of operating costs on the level of speed in areas that

- limit the movement of trains. Proceedings of the 66-th Int. sci.-pract. Conf. «Problems and prospects for the development of railway transport». Dnipropetrovsk, 2006, pp. 211-212. (Ukr.)
9. Kurgan M.B., Markova O.S. Vtrati chasu rukhu poїzdiv na diliankakh obmezhenia shvidkosti. *Tezi 67 Mizhn. Nauk.-prakt. konf. «Problemi ta perspektivi rozvitku zaliznichnogo transportu»* [Loss of train travel time in speed limit areas. Proceedings of the 67-th Int. sci.-pract. Conf. «Problems and prospects for the development of railway transport»]. Dnipropetrovsk, 2007, pp. 206-207. (Ukr.)
 10. Kurgan M.B., Chernishova O.S. Faktori, shcho vplivaiut' na pershochergovist' usunennia obmezen' shvidkosti rukhu poїzdiv, pov'iazanikh zi stanom zaliznichnoi kolii. *Tezi 12 Mizhn. nauk. konf. «Problemi mekhaniki zaliznichnogo transportu»* [Factors influencing the priority of removing train speed restrictions related to the condition of the railway track. Proceedings of the 12-th Int. sci. Conf. «Problems of railway transport mechanics»]. Dnipropetrovsk, 2008, pp. 90. (Ukr.)
 11. Ed. by prof. Kuznetsov B.A. *Transport na gornykh predpriatiiakh* [Mining transport]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 552 p. (Rus.)
 12. Iarmoliuk V.T. *Osnovi girnichoї spravi* [Fundamentals of mining]. Kiev, Libid' Publ., 2000. 280 p. (Ukr.)
 13. *Zakon Ukraїni 273/96-VR. Pro zaliznichnii transport* [Law of Ukraine 273/96-VR. About railway transport]. Vidomosti Verkhovnoi Radi Publ., 1996, no. 40, art. 184. (Ukr.)
 14. Kirpa T.M., Pshin'ko O.M., Agienko I.V. *Zaliznitsi Ukraїni* [Railways of Ukraine]. Dnipropetrovsk, Art-Press Publ., 2001. 328 p. (Ukr.)
 15. Kushnirchuk V.G., Petrov V.I. *Perevezennia vantazhiv zaliznichnim transportom: dovidnik* [Transportation of goods by rail: a guide]. Kiev, Osnova Publ., 2001. 512 p. (Ukr.)
 16. Smolianitskii D.M. *Organizatsiia raboty shakhtnogo transporta* [Organization of work of mine transport]. Kiev, Tekhnika Publ., 1980. 253 p. (Rus.)
 17. *Statut zaliznits' Ukraїni* [Charter of the Railways of Ukraine]. Kiev, Transport Ukraїni Publ., 1998. 83 p. (Ukr.)
 18. Sinchuk O.N., Guzov E.S., Debelyi V.L., Debelyi L.L. *Shakhtnyi elektrovoznyi transport. Teoriia, konstruksii, elektrooborudovanie : uchebnik* [Mine electric locomotive transport. Theory, designs, electrical equipment: textbook]. Kryvyi Rih-Donetsk, ChP A.V. Shcherbatykh Publ., 2015. 428 p. (Rus.)
 19. Belokurov V.N., Gladkov O.V., Zakharov A.A., Melik-Sarkis'iants A.S. *Avtomobili-samosvaly* [Dump trucks]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 216 p. (Rus.)
 20. Nikolin V.I., Vitvitskii E.E., Mochalin S.M., Lan'kov N.I. *Osnovy teorii avtotransportnykh sistem (Gruzovye avtomobil'nye perezozki)* [Fundamentals of the theory of road transport systems (Freight road transport)]. Omsk, OmGPU Publ., 1999. 281 p. (Rus.)
 21. Grishkevich A.I. *Avtomobili: Teoriia* [Cars: Theory]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 1986. 208 p. (Rus.)
 22. Zakin Ia.Kh. *Manevrennost' avtomobilia i avtopoezda* [Vehicle and road train maneuverability]. Moscow, Transport Publ., 1986. 136 p. (Rus.)
 23. Sinchuk O.N., Karamanits F.I., Debelyi V.L., Chernaiia V.O., Fedotov V.A., Kal'mus D.O., Udovenko O.A., Iakimets S.N., Semochkin A.B., Smenova L.V. *Teoreticheskie i prakticheskie aspekty stroeniia arkhitektur sovremennykh tiagovykh elektromekhanicheskikh kompleksov shakhtnykh elektrovozov: kol. monografiia: v 2-kh t. Tom 1. Tiagovye elektromekhanicheskie komplekсы postoiannogo toka* [Theoretical and practical aspects of the structure of the architecture of modern traction electromechanical complexes of mine electric locomotives: col. monograph: in 2 vol. Vol. 1. Traction electromechanical complexes of direct current]. Krivoi Rog, ChP A.V. Shcherbatykh Publ., 2018. 192 p. (Rus.)
 24. Sinchuk I.O., Karamanits F.I., Debelyi V.L., Kozakevich I.A., Fedotov V.A., Smenova L.V., Omel'chenko A.V., Shokarev D.A. *Teoreticheskie i prakticheskie aspekty stroeniia arkhitektur sovremennykh tiagovykh elektromekhanicheskikh kompleksov shakhtnykh elektrovozov: kol. monografiia: v 2-kh t. Tom 2. Tiagovye elektromekhanicheskie komplekсы peremennogo toka* [Theoretical and practical aspects of the structure of the architecture of modern traction electromechanical complexes of mine electric locomotives: col. monograph: in 2 vol. Vol. 2. AC traction electromechanical complexes]. Krivoi Rog, ChP A.V. Shcherbatykh Publ., 2018. 184 p. (Rus.)

25. Lukin V.V., Anisimov P.S., Fedoseev Iu.P. *Vagony: obshchii kurs* [Wagons: general course]. Moscow, Marshrut Publ., 2004. 424 p. (Rus.)
26. *Instruktsiia z organizatsii rukhu vantazhnikh poїzdiv pidvishchenoi vagi i dovzhini na zaliznitsiakh* [Instruction on the organization of movement of freight trains of the increased weight and length on railways]. Kiev, Transport Ukraїni Publ., 2000. 43 p. (Ukr.)
27. *Tipovii tekhnologichnii protses roboti vantazhnoi stantsii TsD 0017* [Typical technological process of cargo station CD 0017]. Kiev, DAZT Publ., 2004. 262 p. (Ukr.)
28. *Normativni akti z bezpeki rukhu poїzdiv* [Regulations on train safety]. Kiev, Transport Ukraїni Publ., 2002. 142 p. (Ukr.)
29. *Instruktsiia z operativnogo planuvannia poїznoiu i vantazhnoiu robotoiu* [Instructions for operational planning of train and freight work]. Kiev, Transport Ukraїni Publ., 2004. 40 p. (Ukr.)
30. *Instruktsiia z rozrakhunkiv propusknoi spromozhnosti zaliznits' Ukraїni TsD 0036* [Instruction on calculations of capacity of the railways of Ukraine CD 0036]. Kiev, Transport Ukraїni Publ., 2002. 375 p. (Ukr.)
31. Puzir V.G., Krashenin O.S., Kramchanin I.G., Falendish A.P. Organizatsiia tekhnologichnikh protsesiv remontu TRS iz zastosuvanniam zasobiv diagnostuvannia [Organization of technological processes of TRS repair with the use of diagnostic tools]. *Zbirnik naukovikh prats' UkrDAZT – Collection of scientific works of UkrDAZT*, 2004, vol. 57, pp. 31-34. (Ukr.)
32. Tartakovskii E.D., Puzir V.G. Tekhnologiia peredreisovogo kontroliu lokomotiviv i lokomotivnikh brigad [Technology of pre-trip control of locomotives and locomotive crews]. *Zbirnik naukovikh prats' UkrDAZT – Collection of scientific works of UkrDAZT*, 2002, vol. 49, pp. 75-79. (Ukr.)
33. Puzir V.G., Remez I.V. Vibir analitichnoi modeli dlia otsiniuvannia iakosti upravlinnia lokomotivom [Selection of an analytical model for assessing the quality of locomotive control]. *Zbirnik naukovikh prats' UkrDAZT – Collection of scientific works of UkrDAZT*, 2004, vol. 64, pp. 164-171. (Ukr.)
34. Petrov M.N., Orlenko A.I., Teregulov O.A., Luk'ianov E.V. Diagnostika izoliatsii tiagovykh elektrodvigatelei elektrovozov na osnove nano-interferometricheskikh optovolokonnykh datchikov [Diagnostics of the insulation of traction electric motors of electric locomotives based on nano-interferometric fiber-optic sensors]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanii – International Journal of Applied and Basic Research*, 2013, no. 15, pp. 139-141. (Rus.)
35. Avilov V.D., Kharlamov V.V., Kostiukov V.N. Kontrol' tekhnicheskogo sostoianii i otsenka resursa tiagovykh dvigatelei i kolesno-motornykh blokov podvizhnogo sostava [Monitoring the technical condition and assessing the resource of traction motors and wheel-motor units of rolling stock]. *Sbornik nauchnykh rabot OAO «RZhd» – Collection of scientific works of JSC «Russian Railways»*, 2006, pp. 28-32. (Rus.)
36. Bondar B.C., Ochkasov O.B., Cherniaev D.V., Shevchenko I.Ia. Diagnostuvannia tiagovykh elektrodviguniv za nerivnomirnistiu obertannia iakoria [Diagnosis of traction motors by uneven rotation of the armature]. *Nauka ta progres transport – Science and Transport Progress*, 2013, vol. 3 (45), pp. 13-21. (Ukr.)
37. Afanasov A.M. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti ispytanii tiagovykh elektromashin postoiannogo i pul'siruiushchego toka [Increasing the energy efficiency of testing DC and pulsating traction electric machines]. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 1, pp. 12-15. doi: 10.20998/2074-272X.2015.1.02. (Rus.)
38. Afanasov A.M. *Rozvitok naukovikh osnov ta vdoskonalennia energoefektivnikh metodiv viprobuvannia tiagovykh elektrichnikh mashin postiinogo ta pul'suiuchogo strumu*. Avtoref. diss. dokt. techn. nauk [Development of scientific bases and improvement of energy-efficient methods of testing traction electric machines of direct and pulsating current. Thesis of Doct. tech. sci. diss.]. Dnipropetrovsk, 2013. 39 p. (Ukr.)

Рецензент: С.К. Поднебенна
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 19.10.2020

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ
ТОКАРНОГО ВЕРСТАТУ НА БАЗІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ**

У статті досліджено систему електроприводу токарного верстату 1Е61М, який широко використовується на металооброблюючих підприємствах. Існуюча система живлення передбачає наявність трифазної мережі, не забезпечує плавний пуск та регулювання швидкості головного руху верстату. В роботі запропоновано забезпечити підвищення ефективності системи електроприводу токарного верстату 1Е61М за рахунок впровадження частотно-регульованого електроприводу на базі широко розповсюдженого перетворювача частоти АЕ200-4.0 G. Основні його переваги – низька вартість та можливість живлення від однофазної мережі. Використання цього перетворювача частоти дозволило зменшити споживання струму від мережі на 56%, що свідчить про підвищення ефективності; забезпечити плавний пуск електродвигуна та покращити регульовальні характеристики системи електроприводу. Для аналізу електромагнітної сумісності з електричною мережею було проведено дослідження з використанням аналізатору якості електроенергії Metrel MI 2885 Master Q4 та спеціалізоване програмне забезпечення Metrel PowerView. Вказаний аналізатор забезпечує відповідність стандарту якості електроенергії МЕК 61000-4-30, клас S, вимогам стандартів МЕК 61557-12 і IEEE 1459-2010 (об'єднана потужність (основна і додаткові гармоніки), основна потужність (основна гармоніка), неосновна потужність (додаткові гармоніки) і МЕК 62053-21 (енергія). Було встановлено, що використання перетворювача частоти АЕ200-4.0 G не задовольняє вимогам електромагнітної сумісності електротехнічного обладнання з мережею. Крім того, використання перетворювача частоти без вихідного синусного фільтра погіршує енергоефективність системи електроприводу за рахунок зниження ресурсу електричного двигуна, який не розрахований на роботу у складі частотно-регульованого електроприводу. Вибір та розрахунок вхідного та вихідного фільтрів дасть змогу забезпечити підвищення ефективності систем електроприводу на базі перетворювачів частоти.

Ключові слова: токарний верстат, асинхронний двигун, перетворювач частоти, електромагнітна сумісність.

S.K. Podnebenna, V.G. Kysliak, O.M. Bondaruk. Improving the efficiency of the electric drive system of a lathe based on frequency converters. The article investigates the electric drive system of the 1E61M lathe, which is widely used at metalworking enterprises. The existing power system assumes the availability of a three-phase grid, it does not provide a smooth start and speed control of the main movement of the machine. The paper proposes to increase the efficiency of the electric drive system of the 1E61M lathe through the use of a variable frequency drive based on the widespread frequency converter AE200-4.0 G. Its main advantages are low cost and the ability to supply power from a single-phase grid. The use of this frequency converter made it possible to reduce the current consumption from the grid by 56%, which indicates an increase in efficiency; to ensure a smooth start of the electric motor and to improve the control characteristics of the electric drive system. To analyze the electromagnetic compatibility with the electri-

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-0878-1492, podsvet@gmail.com

² аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, kysliak.volodymyr@ukr.net

³ студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, olegbond87@gmail.com

cal network, a study was carried out using the Metrel MI 2885 Master Q4 power quality analyzer and the Metrel PowerView specialized software. This analyzer provides the power quality standard IEC 61000-4-30, class S, compatibility to the standards IEC 61557-12 and IEEE 1459-2010 and IEC 62053-21 requirements. It has been found that the use of the AE200-4.0 G frequency converter does not meet the requirements of the electromagnetic compatibility of the electrical equipment of the network. Besides the use of a frequency converter without an output sine filter degrades the energy efficiency of the electric drive system by reducing the resource of the electric motor, which is not designed to operate as part of a variable frequency drive. The selection and calculation of input and output filters will improve the efficiency of electric drive systems based on frequency converters.

Keywords: *lathe, induction motor, frequency converter, electromagnetic compatibility.*

Постановка проблеми. Підвищення енергоефективності будь-якого технологічного процесу є актуальною та важливою задачею. Системи електроприводу для металооброблюючих верстатів не є виключенням. Використання частотно-регульованого електроприводу є перспективним напрямком для розв'язання цієї задачі, але потребує дослідження питання електромагнітної сумісності такої системи з мережею та питання забезпечення енергоефективності при роботі асинхронного двигуна в системі частотно-регульованого електроприводу [1, 2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням електромагнітної сумісності систем частотно-регульованого електроприводу з мережею та забезпечення енергоефективності при роботі асинхронного двигуна в системі частотно-регульованого електроприводу присвячено досить багато сучасних досліджень [1, 2]. Але при модернізації металооброблюючих верстатів більше уваги приділяють практичним критеріям: технічним, до яких відноситься можливість забезпечення регулювання швидкості двигуна у широкому діапазоні, можливість живлення від однофазної мережі, та економічним, основний з яких це вартість. Слід зазначити, що вибір перетворювача частоти лише за критерієм вартості зазвичай призводить до зниження ефективності всієї системи.

Мета статті – дослідження і підвищення ефективності системи електроприводу токарного верстату 1Е61М за рахунок впровадження частотно-регульованого електроприводу та дослідження шляхів забезпечення електромагнітної сумісності з електричною мережею.

Виклад основного матеріалу. Верстат 1Е61М відноситься до групи токарних агрегатів високої точності. Як правило, він використовується для виконання різьбонарізальних і різних токарних процедур – напівчистових і чистових [3].

Технічні параметри верстатного устаткування є головним показником того, наскільки якісно і ефективно воно дає можливість виконувати ті чи інші роботи. Для верстатів, що відносяться до токарно-гвинторізної групи, такими параметрами є кількість оборотів (в одну хвилину) шпинделя, максимальна довжина виробу, яку може обробити агрегат, і її максимальний діаметр.

Описуваний токарно-гвинторізний верстат дозволяє працювати з деталями діаметром до 320 мм над станиною, довжиною до 710 мм, а частота обертання шпинделя верстата досягає величини в 1335 об/хв [3-5]. Електропривод верстата здійснюється від індивідуального електродвигуна потужністю 4,5 кВт. Клиноремінною передачею рух передається на приймальний шків коробки швидкостей. Від коробки швидкостей шістьма клиновими ремнями рух передається далі – на шків передньої бабки, а потім за допомогою зубчастої муфти – на шпиндель [4, 5]. Реверсування головного руху верстата – електричне. Гальмування обертання шпинделя виробляється протиструмом в електродвигуні. Застосований на верстаті електродвигун з підвищеним ковзанням забезпечує підвищення частоти реверсування при нарізанні різьби [4, 5].

При обробці заготовок на верстаті здійснюється два робочих рухи:

- головний рух – обертання шпинделя разом із заготівлею;
- рух подачі;
- поздовжня подача різця, закріпленого у різцетримачі;
- поперечна подача різця;
- поздовжня (осьова) подача свердла, закріпленого в пінолі задньої бабки [4, 5].

Згідно паспортним даним, на верстаті встановлені три трифазних короткозамкнених асинхронних електродвигуна на напругу 220/380 В (рис. 1):

- Д1 – головний електродвигун типу АОС 51/4 виконання Щ-2 потужністю 4,5 кВт, 1335 об/хв;
- Д2 – електронасос мастила типу ПА-22 потужністю 0,125 кВт, 2800 об/хв;
- Д3 – електронасос подачі охолоджуючої рідини типу ПА-22 потужністю 0,125 кВт, 2800 об/хв.

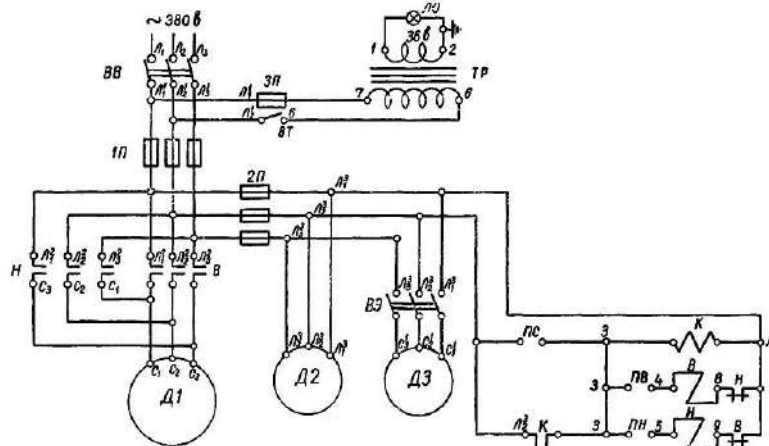


Рис. 1 – Електрична схема токарного верстату 1Е61М

Для здійснення головного руху верстату служить асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором з підвищеним ковзанням типу АОС-51/4 в закритому виконанні. Вмикання та вимикання його відбувається за допомогою реверсивного магнітного пускача через барабанний перемикач за допомогою рукоятки правої чи лівої.

При поданні струму від зовнішньої мережі на верстат вмикається мастильний насос до вмикання головного двигуна таким чином, що виключена можливість роботи шпиндельної бабки без змащування.

Вимоги до приводів головного руху і подачі:

- 1) забезпечення потужності різання, необхідної для приводу;
- 2) збереження сталості крутного моменту і потужності різання в коробках швидкостей;
- 3) великий коефіцієнт корисної дії (ККД);
- 4) забезпечення заданого діапазону регулювання швидкості;
- 5) надійність;
- 6) малі розміри і простота обслуговування.

На рис. 2 наведена схема керування швидкістю шпинделя токарного верстата за допомогою частотно-регульованого електроприводу [6].

Перетворювач частоти 1 регулює швидкість обертання асинхронного двигуна 2 головного приводу шпинделя 3. Система працює за замкнутою схемою зі зворотним зв'язком за швидкістю обертання. Швидкість обертання вимірюється імпульсним датчиком 5. Режим роботи частотно-регульованого приводу задається з пульта управління 4. Різець плавно переміщується справа наліво уздовж деталі, що обертається [6-7].

До впровадження частотно-регульованого приводу швидкість обертання двигуна була незмінною, а швидкість шпинделя можна було змінювати тільки дискретно за допомогою коробки передач.

Оснащення обробних верстатів частотно-регульованим електроприводом дозволяє задовольнити найжорсткіші і суперечливі вимоги, що пред'являються технологією обробки різних матеріалів. Використання частотно-регульованого приводу дозволяє полегшити управління верстатом за рахунок можливості плавної зміни числа обертів шпинделя без його зупинки, розширити діапазон числа оборотів. Використання коробки передач і частотно-регульованого приводу дозволяє оптимально встановлювати число обертів шпинделя і отримати максимальний крутний момент при малих обертах [6-7].

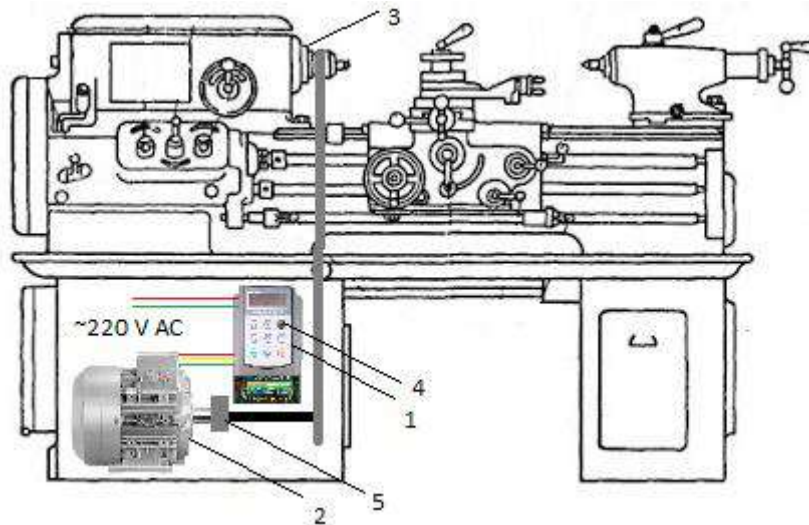


Рис. 2 – Схема керування швидкістю шпинделя токарного верстата за допомогою частотно-регульованого електроприводу з частотним перетворювачем

Застосування частотно-регульованого приводу крім того забезпечує:

- підвищення якості обробки деталей та зниження кількості поломок ріжучого інструменту за рахунок точної підтримки швидкості обертання шпинделя;
- зменшення кількості поломок обладнання за рахунок зниження ударних навантажень на електропривод і механічну передачу при пуску і зупинці.

Особливу увагу слід приділити можливості використання однофазних перетворювачів частоти, які дозволяють забезпечити живлення трифазних двигунів від однофазної мережі без втрати моменту. Принципова схема підключення двигуна до мережі через однофазний перетворювач частоти залишиться такою ж, як зображено на рис. 3, а фотографії реального об'єкту дослідження – на рис. 4. Окрім основного ПЧ, встановлений перетворювач частоти CFM-110 ACPrивод потужністю 0,18 кВт для живлення електродвигуна мастильної станції ПА-22.

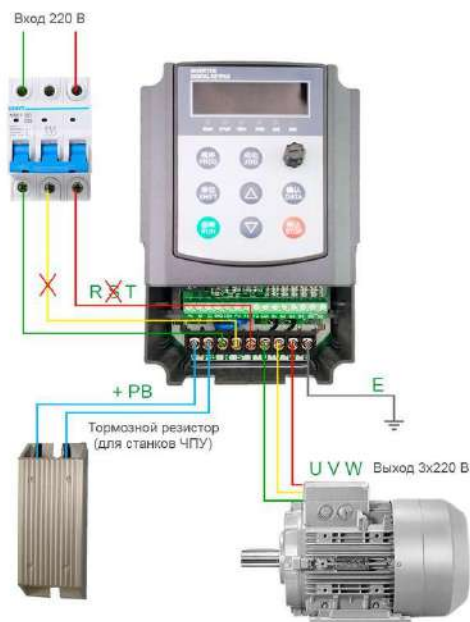


Рис. 3 – Схема підключення перетворювача частоти



Рис. 4 – Фото системи електроприводу токарного верстату 1Е61М з перетворювачем частоти

Для забезпечення неможливості роботи основного механізму без змащування спочатку вмикається електродвигун мастильної станції ПА-22, а з затримкою в 8 с вмикається основний двигун. Затримка часу виконана за допомогою встановлення додатково реле часу та проміжного реле (рис. 4). Час розгону перетворювача частоти встановлений таким, що дорівнює 2 с. Споживаний від мережі в режимі навантаження струм склав 9 А (середньоквадратичне значення), що в 1,78 разів менше за номінальний, що зменшує в 3,1 рази втрати потужності в електричній мережі.

Використання частотно-регульованого електроприводу дозволило вирішити наступні проблеми: реалізувати живлення верстату від однофазної мережі; зменшити споживання струму від мережі на 56%; забезпечити плавний пуск електродвигуна та покращити регульовальні характеристики системи електроприводу.

Для аналізу і дослідження електричних параметрів системи електроприводу з частотними перетворювачами використаний аналізатор якості електроенергії Metrel MI 2885 Master Q4 та спеціалізоване програмне забезпечення Metrel PowerView. Вказаний аналізатор забезпечує відповідність стандарту якості електроенергії МЕК 61000-4-30, клас S, вимогам стандартів МЕК 61557-12 і IEEE 1459-2010 (об'єднана потужність (осн. і доп. гармоніки), основна потужність (осн. гармоніка), неосновна потужність (додаткові гармоніки) і МЕК 62053-21 (енергія).

Осцилограми споживаного від мережі струму (а) та його спектр (б) наведені на рис. 5. При збільшенні навантаження відбувалося зростання споживаного струму та, відповідно, потужності. При цьому зміни спектрального складу струму практично не відбувалось. Коефіцієнт спотворення форми кривої напруги коливався в діапазоні 5-6%, відповідно, струму – 88-93%.

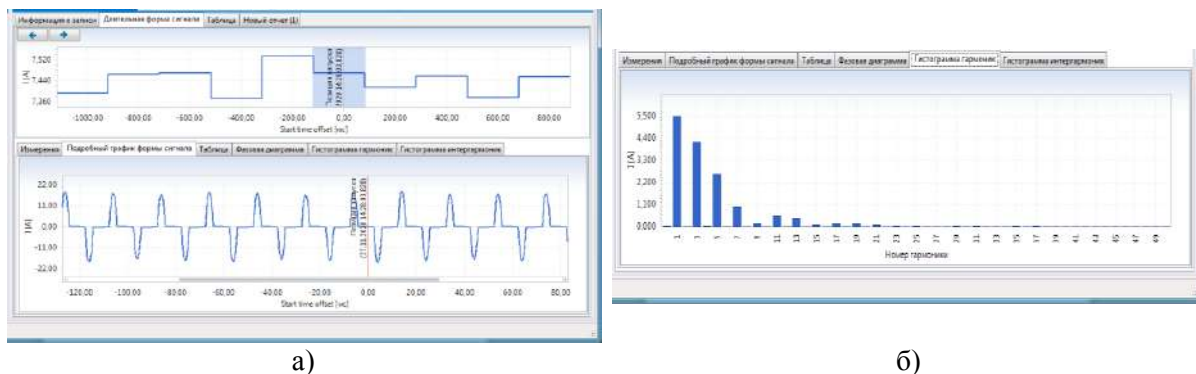


Рис. 5 – Осцилограма споживаного ПЧ від мережі струму (а) та його спектр (б)

З аналізу споживаного від мережі струму видно, що мережевий фільтр (вхідний фільтр, мережевий дросель) у складі частотного перетворювача AE200-4.0 G відсутній. Це призводить до того, що проілюстровано на рис. 5, – струм, який споживається від мережі, носить несинусоїдний характер, коефіцієнт гармонік складає близько 90%. При цьому в слабкій мережі коефіцієнт несинусоїдності напруги зростає з 1,5% при відсутності навантаження у вигляді частотного перетворювача до 5,5% (а подекуди і більше 8%), що супроводжується одночасно відхиленням напруги на 5-10%.

Висновки

Використання перетворювача частоти дозволило підвищити ефективність системи електроприводу токарного верстату, реалізувати живлення верстату від однофазної мережі; зменшити споживання струму від мережі на 56%; забезпечити плавний пуск електродвигуна та покращити регульовальні характеристики системи електроприводу.

При цьому було встановлено, що використання перетворювача частоти AE200-4.0 G призводить до погіршення якості електроенергії мережі, не задовольняє вимогам електромагнітної сумісності електротехнічного обладнання з мережею. Крім того, використання перетворювача частоти без вихідного синусного фільтра погіршує енергоефективність системи електроприводу за рахунок зниження ресурсу електричного двигуна, який не розрахований на роботу у скла-

ді частотно-регульованого електроприводу. Вибір та розрахунок вхідного та вихідного фільтрів дасть змогу забезпечити підвищення ефективності систем електроприводу на базі перетворювачів частоти, що є предметом наступних досліджень.

Перелік використаних джерел:

1. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода : навчальний посібник / М.В. Загірняк, Т.В. Коренькова, А.П. Калінов, А.І. Гладир, В.Г. Ковальчук. – 2-е вид., переробл. і доповн. – Харків : Видавництво «Точка», 2017. – 206 с.
2. Поднебенна С.К. Забезпечення електромагнітної сумісності судових електричних мереж / Р.К. Яшаров, С.К. Поднебенна // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. праць. – Маріуполь, 2018. – Вип. 37. – С. 158-164. – (Серія: Технічні науки). – Mode of access: DOI: 10.31498/2225-6733.37.2018.160280.
3. 1E61M – высокоточный токарный станок [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://tutmet.ru/tokarno-vintoreznyi-standok-1e61m-tehnicheskie-harakteristiki.html>.
4. 1E61M Станок токарно-винторезный повышенной точности [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: http://stanki-katalog.ru/sprav_1e61m.htm.
5. Токарно-винторезный станок 1E61M повышенной точности. Руководство к станку. – Саратов : Центральное бюро технической информации, 1965. – 64 с.
6. Примеры типовых применений частотно-регулируемого привода в металлообрабатывающих станках и технологических линиях [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://www.electrolibrary.info/chastotnik/7-primery-ispolzovaniya-chastotno-reguliruemogo-privoda.html>.
7. Махнев П.С. Асинхронный электродвигатель для частотно регулируемого привода металлообрабатывающего оборудования / П.С. Махнев. – Тольятти, 2018. – 91 с.

References:

1. Zagirniak M.V., Koren'kova T.V., Kalinov A.P., Gladir A.I., Koval'chuk V.G. *Suchasni peretvoriuvachi chastoti v sistemakh elektroprivoda : navch. posibnik* [Modern frequency converters in electric drive systems: textbook]. Kharkiv, Tochka Publ., 2017. 206 p. (Ukr.)
2. Yasharov R.K., Podnebennaya S.K. Zabezpechennia elektromagnitnoi sumisnosti sudovikh elektrichnikh merezh [Ensuring of ship electrical networks electromagnetic compatibility]. *Visnik Priazovs'kogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2018, vol. 37, pp. 158-164. doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160280.
3. 1E61M – vysokotochnyi tokarnyi stanok (1E61M – high-precision lathe) Available at: <https://tutmet.ru/tokarno-vintoreznyi-standok-1e61m-tehnicheskie-harakteristiki.html> (accessed 15 July 2020). (Rus.)
4. 1E61M Stanok tokarno-vintoreznyi povyshennoi tochnosti (1E61M High-precision screw-cutting lathe) Available at: http://stanki-katalog.ru/sprav_1e61m.htm (accessed 23 July 2020). (Rus.)
5. Tokarno-vintoreznyi stanok 1E61M povyshennoi tochnosti. Rukovodstvo k stanku [Screw-cutting lathe 1E61M of increased accuracy. Machine manual]. Saratov, Tsentral'noe biuro tekhnicheskoi informatsii Publ., 1965. 64 p. (Rus.)
6. Primery tipovykh primenenii chastotno-reguliruemogo privoda v metalloobra-batyvaiushchikh stankakh i tekhnologicheskikh liniakh (Examples of typical applications of a variable frequency drive in metal-working machines and technological lines) Available at: <http://www.electrolibrary.info/chastotnik/7-primery-ispolzovaniya-chastotno-reguliruemogo-privoda.html> (accessed 03 July 2020). (Rus.)
7. Makhnev P.S. *Asinkhronnyi elektrodvigatel' dlia chastotno reguliruemogo privoda metallobrabatyvaiushchego oborudovaniia* [Asynchronous electric motor for variable frequency drive of metalworking equipment]. Tolyatti, 2018. 91 p. (Rus.)

Рецензент: В.В. Бурлака
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 09.11.2020

© Шарейко Д.Ю.¹, Білюк І.С.², Садовий О.С.³, Савченко О.В.⁴,
Фоменко А.М.⁵, Козаченко А.В.⁶

МОДЕРНІЗАЦІЯ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

Наведено спосіб модернізації промислових роботів за рахунок використання синхронних сервоелектродвигунів з цифровою системою керування. Цифрова система керування може бути побудована або на основі контролера, або з використанням ЕОМ. Отримана методика розрахунку параметрів цифрового регулятора на задані показники якості керування.

Ключові слова: сервоелектропривод, синхронний двигун, цифровий регулятор, цифрова система керування, логарифмічні амплітудні характеристики (ЛАХ), показники якості керування, частота квантування.

D.Yu. Shareyko, I.S. Biliuk, O.S. Sadovyy, O.V. Savchenko, A.M. Fomenko, A.V. Kozachenko. Modernization of industrial robots. The method of modernization of industrial robots due to the use of synchronous servo electric motors with a digital control system has been given. The digital control system can be arranged either on the basis of the controller, or with the use of a computer. The method of calculation of the digital regulator parameters to get the set indicators of control quality has been received. The use of digital controllers makes it possible not only to improve the control quality, but also to increase the margin of stability. Modern frequency converters that are part of complete electric drives already contain speed and current regulators. These regulators are arranged on different control principles: PI, PD, PID. The parameters of these controls are set in software and cannot be changed in any other way. An alternative is to use a programmable logic controller (PLC). It is connected through the digital inputs of the frequency converter and can also receive information through the digital outputs of that very frequency converter. However, unlike the fixed controllers, which are part of the frequency converter and are set up according to the specifications of the electric drive in accordance with the known methods of linear systems, the setting-up of the PLC software digital controller requires programming in a special programming language for this controller. In addition, the controller can change the settings of the regulators and the regulation law itself, turning the control system into an adaptive one. Therefore, the solution to the problem of setting-up digital controllers is entirely relevant, especially when connecting an electric drive to a computer. This improves the user's dialogue, making it possible to reset up the parameters of the regulators and the control law. In modern robotic manipulators with stringent requirements for positioning accuracy, synchronous servo electric drives are widely used, which are replacing stepper drives. The exception is electric drives with piezoceramic actuators. But they are used in low-power robots. The paper provides an example of calculating the parameters of a digital controller using the method of logarithmic frequency characteristics.

¹ канд. техн. наук, доцент, НУК «Національний університет кораблебудування», м. Миколаїв, dshareyko.mk@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, НУК «Національний університет кораблебудування», м. Миколаїв, ivanbiliuk@gmail.com

³ канд. техн. наук, ст. викладач, МНАУ «Миколаївський національний аграрний університет», м. Миколаїв, ORCID: 0000-0001-9000-6606, sadovuyos@mnau.edu.ua

⁴ зав. лабораторіями, НУК «Національний університет кораблебудування», м. Миколаїв, savchenko1984@gmail.com

⁵ доцент, НУК «Національний університет кораблебудування», м. Миколаїв, fomenko.mk@gmail.com

⁶ зав. відділення, Новобузький коледж МНАУ «Миколаївський національний аграрний університет», м. Новий Буг, andrey.kozachenko2017@gmail.com

Keywords: *servoelectric drive, synchronous motor, digital regulator, digital control system, logarithmic amplitude characteristics, control quality indicators, quantization frequency.*

Постановка проблеми. Існує два технічних рішення у розв'язку задачі контролю робота послідовної дії координат. Перше рішення – це безпосереднє формування сигналу контролером до вузлу робота. Цій підхід простий та може використовуватися у випадках застосування, наприклад, крокових двигунів. Проте, супроводжується проблемами зупинки механізмів при будь-яких неполадках. Якщо ж застосовувати для цих систем зворотній зв'язок, то це може призвести до дуже тривалих коливальних перехідних процесів. Отже, частіше застосовують розташування на вузлах робота сервомеханізму, який відстежує команди положення контролера. Виходячи з цього, доцільно використовувати цифрову систему керування, яка буде здійснювати керування механізмами робота.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз даних літератури і веб-сайтів, у тому числі провідних зарубіжних компаній (KUKA, FANUC, MITSUBISHI, TOSHIBA, KAWASAKI та ін.), що виробляють роботів, показав, що електропривод зайняв пануюче положення у робототехніці і продовжує інтенсивно розвиватися. Але слід зазначити, що інформація про електричні машини приводів роботів у зарубіжних джерелах зазвичай прихована. У вітчизняних джерелах інформації наявний матеріал не узагальнений і не систематизований [1-8].

Прогрес в областях електроніки і використовуваних в електротехніці матеріалів змінили ситуації в техніці приводу. Досі в сервотехніці застосовувалися в основному двигуни постійного струму з постійними магнітами. Головний недолік двигунів змінного струму в порівнянні з двигунами постійного струму полягав в обмеженій можливості регулювання швидкості. Останні досягнення в області електроніки, особливо в мікроконтролерах, дозволяють компенсувати цей недолік шляхом використання сучасних засобів керування [2-4].

Нині відбувається зміщення акцентів в приводних системах від двигунів постійного струму до двигунів змінного струму. Тенденція переходу до синхронних двигунів змінного струму особливо очевидна в сервосистемах, які майже завжди виконувалися з використанням електроприводів постійного струму [5-7].

Як діє система керування роботом – від точки до точки, або по суцільній траєкторії – залежить від об'єму пам'яті та типу контролера. Проте, в обох випадках важливо відстежувати точність позиціонування. Адаже навіть з використанням руху по заданій траєкторії програмно це все одно здійснюється від точки до точки, з яких створюється траєкторія [1].

Мета роботи – покращити динамічні характеристики промислового робота за рахунок застосування синхронних серводвигунів та цифрової системи керування з використанням програмованого контролера або ЕОМ і цифрових регуляторів.

Виклад основного матеріалу. Нині відбувається зміщення акцентів в приводних системах від двигунів постійного струму до двигунів змінного струму. Тенденція переходу до синхронних двигунів змінного струму особливо очевидна в сервосистемах, які майже завжди виконувалися з використанням електроприводів постійного струму.

Нові потужні постійні магніти, виготовлені зі сплавів ніодим-залізо-бора і самарій-кобальта, завдяки їх високій енергоємності можуть істотно поліпшити характеристики двигуна одночасним зниженням масо-габаритних показників електричних машин. У результаті покращуються динамічні характеристики приводу і знижуються його габарити.

У сучасній приводній техніці у багатьох випадках пред'являються високі вимоги до:

- похибки позиціонування;
- похибки стабілізації швидкості;
- керування позицією валу;
- широкого діапазону регулювання;
- стабілізації моменту обертання;
- перевантажувальної здатності;
- високої динаміки.

Вимоги до динаміки, тобто поведінки приводу в часі, складаються з процесів обробки, що все прискорюються, збільшенню циклів обробки і пов'язаної з ними продуктивності машини.

Висока точність дуже часто визначає можливість використання систем електроприводу в нових технологіях. Цим вимогам повинні відповідати сучасні високодинамічні системи приводу, які мають назву сервоприводи.

Отже, завдяки високому максимальному моменту M_{\max} і малому моменту інерції, синхронний двигун має дуже малий час розгону вхолосту, що дозволяє рекомендувати його для динамічних електроприводів. Відокремимо далі переваги і недоліки сервоприводів.

Переваги, які надає використання синхронного серводвигуна:

- відмінна підтримка швидкості (статична точність підтримки швидкості на валу двигуна до 0,01%);

- діапазон регулювання швидкості більше 1:1000;
- відмінні динамічні можливості;
- широкий діапазон регулювання швидкості;
- висока точність позиціонування;
- висока перевантажувальна здатність (3Мн);
- керування за швидкістю, по моменту або по позиції;
- низька вага та компактні розміри.

Недоліки:

- відносно висока вартість системи.

Порівняння питомої потужності асинхронних і синхронних двигунів (відношення потужності до об'єму двигуна) показує, що питома потужність синхронних двигунів в 1,5-3 рази більше питомої потужності асинхронних. З точки зору вартості асинхронний сервопривод має безперечну перевагу при великих потужностях. Вартість синхронних серводвигунів з рідкоземельними магнітами істотно зростає при крутих моментах, більше 20...30 Н·м. Отже, основні переваги синхронних серводвигунів по відношенню до асинхронних – висока динаміка, точність позиціонування і питома потужність, висока перевантажувальна здатність; основний недолік – відносно висока вартість.

Застосування сервопривода замість крокового двигуна обумовлено наступними чинниками:

- використання крокового двигуна супроводжується жорсткими вимогами щодо редуктора механізму;

- відбувається компенсація люфтів у приводі;
- збільшується точність позиціонування;
- збільшується швидкодія системи керування;
- зменшуються витрати енергії;
- покращується діагностика системи керування.

Як недоліки можна визначити:

- обов'язкова потрібність у датчику положення;
- ускладнюється система керування;
- фіксація елемента здійснюється за рахунок пригальмовування механізму;
- сервоприводи дорожчі.

З приведеного короткого огляду видно, що сервоприводи змінного струму по глибині регулювання швидкості і динаміці керування не поступаються кращим електроприводам постійного струму, а в сукупності з можливостями керування по цифрових каналах фазою, швидкістю, моментом і позицією перевершують не лише двигуни постійного струму, але і крокові двигуни. Технічна цінність високої динаміки керування сервоприводу підвищується ще і завдяки його малим габаритам, а також виключенням необхідності обслуговування електродвигунів. Незважаючи на усі перелічені вище недоліки, гілка синхронних електричних машин найбільш перспективна і найближчий час обіцяє істотний технологічний стрибок. Вже сьогодні є розробки синхронних машин, що мають на порядок поліпшені масогабаритні показники. Ці машини мають абсолютно нову нетрадиційну конструкцію і дуже широкі можливості.

Промисловий робот спроектований по найбільш розповсюдженій і універсальній кінематичній схемі шести рухомого маніпулятора з обертальними кінематичними парами.

Технічні характеристики електропривода:

маса вантажу $m_{\text{тр}} = 12$ кг;

маса ступеня рухливості $m_{cn} = 3$ кг;
 кутова швидкість $\omega = 10,47$ рад/с;
 кутове переміщення $S_{max} = 720^\circ$;
 ексцентриситет відносно вісі привода $L_{цм} = 0,1$ м;
 передаточне відношення редуктора:
 режим роботи $i_p = 30$;
 ПВ = 80 %.

Основні вимоги до електроприводу:

- відносний статичний перепад швидкості у всьому діапазоні зміни статичного моменту – $\delta \leq 10\%$;
- для зниження кінематичних зусиль при переміщеннях необхідне обмеження прискорення – $\varepsilon \leq 52,36$ рад/с²;
- час пуску не більше 0,2 с;
- діапазон регулювання швидкості D повинен становити 50:1 для забезпечення точної зупинки приводу;
- допускається зниження живлячої напруги не більше ніж на 10%;
- точність зупинки – $\Delta\varphi \leq 0,5^\circ$.

Статичні моменти в розрахунку на один двигун:

$$M_{c1} = g(m_{zp} + m_{cn})L_{цм}(1 + k_{mp}) = 9,81 \cdot (12 + 3) \cdot 0,1 \cdot (1 + 0,08) = 15,89 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{c2} = |g(m_{zp} + m_{cn})L_{цм}(-1 + k_{mp})| = 9,81 \cdot (12 + 3) \cdot 0,1 \cdot (-1 + 0,08) = 13,53 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Задаємося параметрами тахограми:

- час пуску: $t_n = 0,2$ с;
- час циклу: $t_{ц} = 60$ с;
- час роботи на сталій швидкості:

$$t_y = t_{ц} \text{ ПВ} - 4t_n = 60 \cdot 0,8 - 4 \cdot 0,2 = 47,2 \text{ с}.$$

Момент інерції J , кг·м²:

$$J = (m_{zp} + m_{cn})L_{цм} = (12 + 3) \cdot 0,1 = 0,15.$$

Кутове прискорення ε , рад/с²:

$$\varepsilon = \frac{\omega}{t_p} = \frac{10,47}{0,2} = 52,36.$$

Динамічний момент $M_{дин}$, Н·м:

$$M_{дин} = J\varepsilon = 0,15 \cdot 52,36 = 7,86.$$

Розрахунок еквівалентного моменту $M_{екв}$ ведеться за умови рівності статичних моментів найбільшому, тому можливо перевертання ступеня рухливості.

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{[(M_{c1} + M_{дин})^2 + (M_{c1} - M_{дин})^2] \cdot 4t_n + M_{c1}^2 t_y}{t_{ц} \text{ ПВ}}} =$$

$$\sqrt{\frac{[(15,89 + 7,86)^2 + (15,89 - 7,86)^2] \cdot 4 \cdot 0,2 + 15,89^2 \cdot 47,2}{60 \cdot 0,8}} = 16,1 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Приведемо еквівалентний момент до ПВ = 80%, тому що номінальний ПВ обраного двигуна складає 100%:

$$M_{екв} = M_{екв} \sqrt{\text{ПВ}} = 16,1 \cdot \sqrt{0,8} = 14,38 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Розрахункова потужність двигуна $P_{роз}$, Вт:

$$P_{роз} = M_{екв} \omega = 14,38 \cdot 10,47 = 150,64.$$

Умови вибору двигуна:

$$P_{роз} \leq P_n; \omega_{роз} \approx \omega_n.$$

Тахограми і навантажувальна діаграма наведені на рисунку 1.

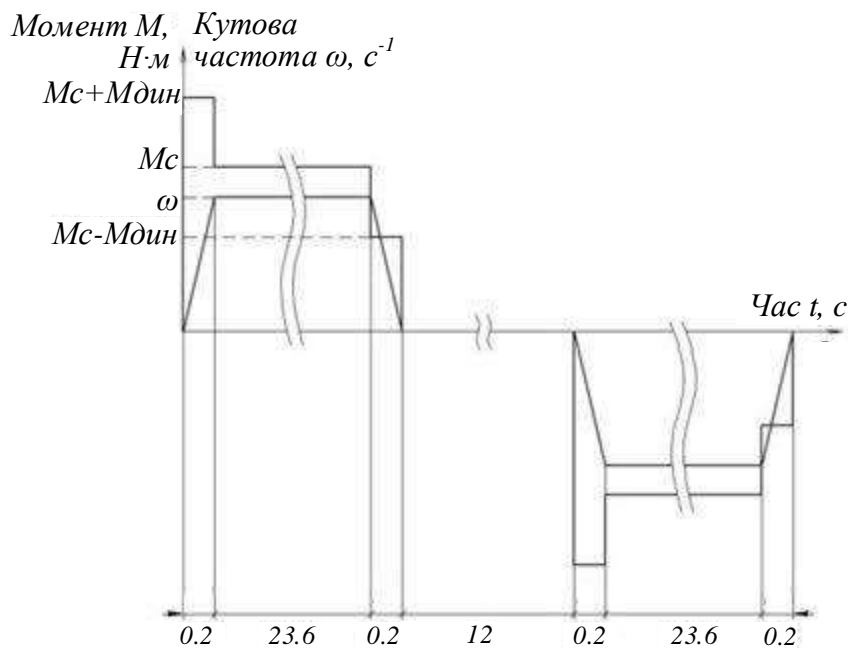


Рис. 1 – Тахограми і навантажувальна діаграма механізму

Виходячи с даного розрахунку, обираємо синхронний серводвигун Estun EMJ-04A потужністю 0,4 кВт, характеристики якого наведені у таблиці.

Таблиця

Технічні характеристики серводвигуна Estun EMJ-04A

Параметр	Значення
Модель серводвигуна	EMJ-04A
Напруга, В	200 АС
Номінальна вихідна потужність, кВт	0,4
Номінальний момент, N·m	1,27
Піковий момент, Н·м	3,82
Номінальний струм, А	2,8
Максимальний струм, А	8,4
Номінальна швидкість, об/хв	3000
Максимальна швидкість, об/хв	4500
Номінальна напруга гальмування, В	24DC ±10%
Номінальна потужність гальмування, Вт	7,2
Утримуючий момент гальмування, Н·м	1,3
Енкодер	Інкрементальний
Стандарт, іпм/об	2500
Енкодер	Абсолютний,
Опція, іпм/об	131072
Робоче середовище	Температура: от 0°C до +40°C, вологість: від 20 до 80% відносної вологості (без конденсації), вібрація: менш ніж 49 м/с ²
Клас ізоляції	F

Спрощену структурну схему цифрової системи подано на рис. 2. Безперервний сигнал похибки $\varepsilon(t)$ імпульсним елементом ІЕ1 перетворюється в решітчасту цифрову функцію $\varepsilon[n]$ і надходить на вхід ЦОМ, яку подано у вигляді передаточної функції $D(z)$. Вихідний сигнал

ЦОМ імпульсним елементом ІЕ2 і формувачем імпульсів $W_{\Phi}(p)$ перетворюється в ступінчастий сигнал. Безперервну частину системи подано ланкою з передаточною функцією $W_{\text{Гн}}(p)$ [8].

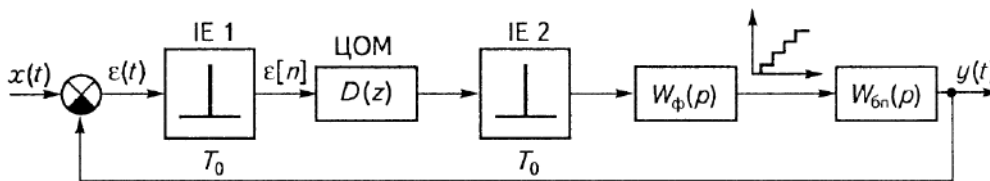


Рис. 2 – Спрощена структурна схема цифрової системи керування

Для керування синхронним двигуном використаємо систему підпорядкованого керування із зворотнім зв'язком за швидкістю. Skorиставшись спрощеною структурною схемою, зображеною на рисунку 2, побудуємо структурну схему керування синхронним двигуном (рис. 3).

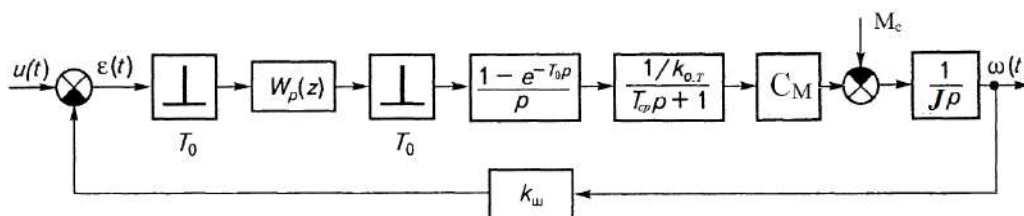


Рис. 3 – Структурна схема цифрової системи керування синхронним двигуном

Виконаємо синтез цифрового регулятора системи автоматичного регулювання синхронного сервоприводу. Одним з найефективніших інженерних методів синтезу систем автоматичного керування є метод, в основу якого покладено використання ЛАХ розімкненої системи. Ідея методу ґрунтується на тому, що для стійких мінімально-фазових систем існує однозначний зв'язок між перехідною характеристикою замкнутої системи і виглядом ЛАХ відповідної розімкненої системи. Виходячи з бажаного вигляду перехідного процесу, будують ЛАХ, яка відповідає такому процесу (бажану ЛАХ). Далі, знаючи вигляд бажаної ЛАХ, до неї наближують ЛАХ вихідної системи, запроваджуючи різні коректувальні пристрої.

Будь-яка система автоматичного регулювання (САР) з електроприводом складається з незмінної частини, до якої належить об'єкт регулювання, електродвигун, силовий керований перетворювач, а також елементи головного зворотного зв'язку та порівняння. Об'єкт регулювання вважається відомим при проектуванні САР, двигун вибирають, виходячи з технологічних характеристик об'єкта. Природно, що ці елементи не підлягають зміні при корекції динамічних властивостей САР. Елементи САР, що не змінюються, визначають ЛАХ вихідної системи. Вимоги до показників якості системи: добротність за швидкістю $k_v = 50 \text{ с}^{-1}$, час регулювання, перерегулювання $\sigma < 25\%$.

Розрахунок коефіцієнтів передаточної функції.

Прийmemo: $C_m = \frac{M_{\text{дв}}}{I_{\text{инв}}} = \frac{14,08}{8,4} = 1,71$ – коефіцієнт пропорційності між моментом двигуна та

струмом інвертора.

$$k_{o.m} = \frac{U_{\text{змmax}}}{I_{cm}};$$

при умовах:

$$U_{\text{змmax}} \leq 10\text{В};$$

$$I_{cm} = (2 \dots 3) I_n = 2 \cdot I_n = 2 \cdot 2,8 = 5,6\text{А};$$

$$k_{o.m} = \frac{U_{\text{змmax}}}{I_{cm}} = \frac{10}{5,6} = 1,8 \frac{\text{В}}{\text{А}}.$$

Момент інерційності двигуна J , кг·м²:

$$J = (m_{zp} + m_{cn})L_{cm} = (12 + 3) \cdot 0,1 = 0,15.$$

З урахуванням невеликої постійної часу фільтру T_ϕ у колі датчика струму постійна часу $T_{cp} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ с.

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю – $k_{ш} = 0,01$ Ом.

Загальний коефіцієнт підсилення:

$$k = \frac{C_M k_{ш}}{J k_{o,m}} = \frac{1,71 \cdot 0,01}{0,15 \cdot 0,8} = \frac{0,017}{0,27} = 0,06.$$

Передаточна функція безперервної частини системи $W_{\text{бп}(p)}$:

$$W_{\text{бп}(p)} = \frac{C_M k_{ш}}{J k_{o,m} (T_{cp} p + 1)}$$

Побудуємо ЛАХ безперервної частини.

Вибираємо період квантування так, щоб злам асимптотичної ЛАХ був ліворуч від частоти

$$\omega = \frac{2}{T_0}.$$

Частота зламу ЛАХ безперервної частини системи становить ω_1 , с⁻¹:

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,0015} = 666.$$

Приймаємо $T_0 = 0,003$ с (умова $T > 0,5 T_0$ виконується). У низькочастотній зоні $\omega \approx \lambda$. Знаходимо абсолютну псевдочастоту зламу асимптотичної ЛАХ λ , с⁻¹:

$$\lambda = \frac{2}{T_0} \operatorname{tg} \frac{\omega_1 T_0}{2} = \frac{2}{0,003} \operatorname{tg} \frac{666 \cdot 0,003}{2} = 660,$$

тобто похибка становить усього ~ 2%.

Через те, що високочастотна частина ЛАХ практично не впливає на якість перехідних процесів, під час синтезу коректувальної ланки можна обмежитися спрощеною побудовою ЛАХ приведеної безперервної частини системи $W_n(j\lambda)$:

$$W_n(j\lambda) = \frac{\left(1 - j\lambda \frac{T_0}{2}\right) 0,06}{j\lambda(0,0015 j\lambda + 1)}.$$

Побудовану характеристику $L_n(\lambda)$ зображено на рисунку 4.

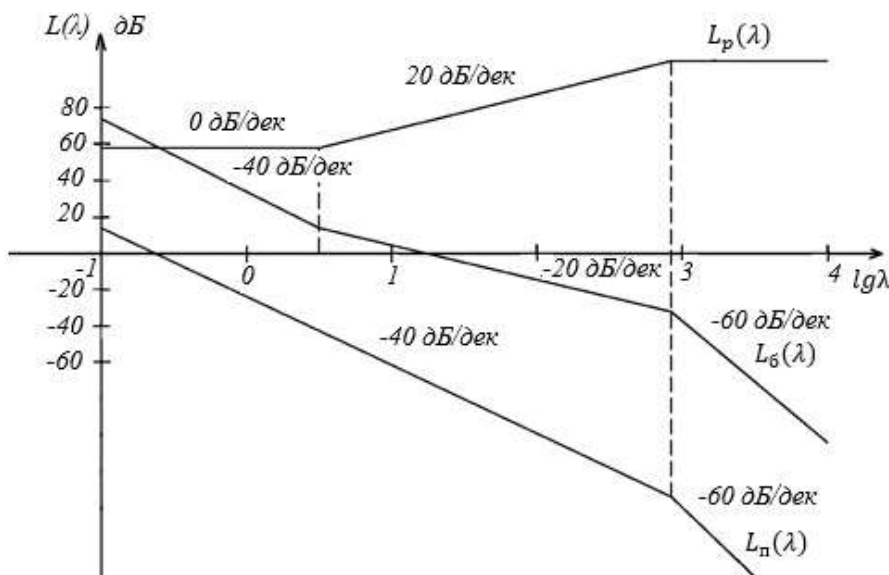


Рис. 4 – Побудова ЛАХ системи

Бажану ЛАХ побудуємо за методикою, що застосовується для безперервних систем. Виходячи із заданої добротності системи за швидкістю, низькочастотну частину ЛАХ $L_6(\lambda)$ проводимо через точку з координатами $\lg\lambda = 0$, $L_6(\lambda) = 20$, $\lg k_v = 34$ дБ з нахилом -20 дБ/дек. Виходячи із заданого часу регулювання $t_p = 0,5$ с і перерегулювання $\sigma < 25\%$, визначимо частоту зрізу λ_3 , c^{-1} :

$$\lambda_3 = \frac{c}{t_p} = \frac{8}{0,5} = 16.$$

де $c = 8$ – коефіцієнт, що визначається за графіком [8].

Середньочастотну частину $L_6(\lambda)$ проводимо через точку з координатами $L(\lambda) = 0$, $\lg\lambda_3$ з нахилом -20 дБ/дек і сполучаємо її з низькочастотною частиною на частоті $\lg\lambda_2 = 0,5$, $\lambda_2 = 3,2$ c^{-1} .

Виходячи з типу бажаної ЛАХ, частоти сполучення середньочастотної частини з низькочастотною і високочастотною частинами визначаємо з умов:

$$\lambda_3/\lambda_2 = 10; 2 < \lambda_2/\lambda_3 < 4.$$

Високочастотну частину характеристики $L_6(\lambda)$ проводимо паралельно характеристиці $L_n(\lambda)$.

ЛАХ цифрового регулятора $L_p(\lambda)$ визначається як різниця $L_6(\lambda) - L_n(\lambda)$. За виглядом ЛАХ $L_p(\lambda)$ знаходимо комплексно-частотну функцію

$$W_p(j\lambda) = \frac{794(j\tau_1\lambda + 1)}{j\tau_2\lambda + 1} = \frac{794(j0,31\lambda + 1)}{j0,0015\lambda + 1},$$

в якій $\lg\lambda_1 = 0,5$, $\lambda_1 = 3,2$ c^{-1} , $\tau_1 = 0,31$ с; $\lg\lambda_2 = 2,8$, $\lambda_2 = 660$ c^{-1} , $\tau_2 = 0,0015$ с визначено за характеристикою $L_p(\lambda)$ (рис. 4).

Виконавши підстановку:

$$j\lambda = \frac{2}{T_0} \frac{z-1}{z+1},$$

дістанемо $W_p(z)$:

$$W_p(j\lambda) = \frac{123864z-1}{1985+1}.$$

Цей вираз зведемо до вигляду, зручному для складання різницевого рівняння $W_p(z)$

$$W_p(z) = \frac{U_p(z)}{\varepsilon(z)} = \frac{62,4z-61,6}{z-0,2} = \frac{62,4-61,6z^{-1}}{1-0,2z^{-1}}.$$

Введемо співмножник z^{-1} , що забезпечує виконання програми корекції на мікро-ЕОМ у реальному масштабі часу $\frac{U_p(z)}{\varepsilon(z)}$:

$$\frac{U_p(z)}{\varepsilon(z)} = \frac{62,4z^{-1}-61,6z^{-2}}{1-0,2z^{-1}}.$$

Запишемо різницеве рівняння корекції

$$U_p[nT_0] = 0,2U_p[n(-1)T_0] + 62,4\varepsilon[(n-1)T_0] - 61,6\varepsilon[(n-2)T_0].$$

У цьому рівнянні $U_p[nT_0]$ – число, що подається на ЦАП, увімкнений на виході цифрового регулятора; $\varepsilon[nT_0]$ – число на виході АЦП, що перетворює різницю сигналів завдання і зворотного зв'язку за швидкістю в цифровий код.

Під час обчислення $U_p[nT_0]$ приймається, що $U_p[nT_0] = 0$ при $n < 0$ і функція $\varepsilon[nT_0]$ прикладається в момент $n = 0$. Тоді $U_p[nT_0]$ обчислюємо у такій послідовності: в кінці першого такту $n = 1$ і $U_p[1T_0] = 62,4\varepsilon[0]$, в кінці другого такту $n = 2$ і

$$U_p[2T_0] = 0,2U_p[1T_0] + 62,4\varepsilon[1T_0] - 61,6\varepsilon[0].$$

Для дослідження стійкості системи скористуємося пакетом програм Matlab, а саме середовищем Simulink. Опираючись на структурну схему, сформуємо математичну модель системи.

Для реалізації АЦП використаємо ланку екстраполятора нульового порядку, математична модель якого присутня у середовищі Simulink [9]. Формувач імпульсів змодельовано за допомогою цифрового диференціатора та інтегруючої ланки. Цифровий регулятор представляє собою підсилювальну ланку та дискретну передаточну функцію. Загальний вигляд математичної моделі системи зображений на рисунку 5.

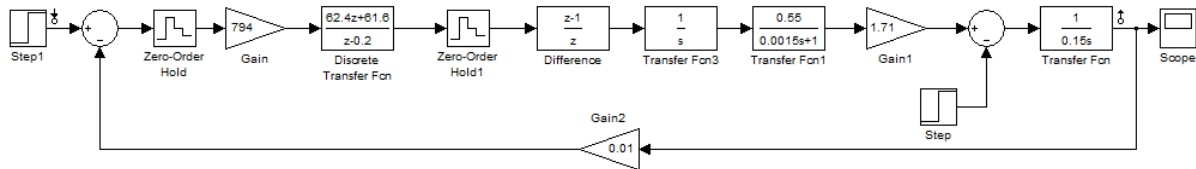


Рис. 5 – Математична модель системи

Результат моделювання перехідних процесів у середовищі Simulink зображений на рисунку 6.

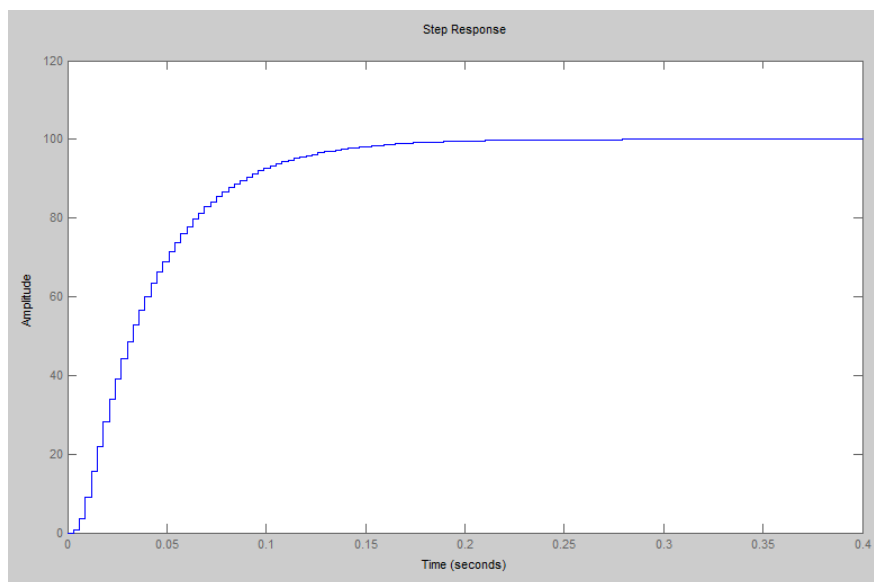


Рис. 6 – Перехідна характеристика системи

З рисунку 6 впливають показники якості керування:

- перегулювання складає $\sigma = 0\%$;
- час перехідного процесу $t_p = 0,15$ с.

Висновки

1. Наведено спосіб удосконалення промислових роботів з жорсткими вимогами до точності позиціонування.
2. Застосування цифрової системи керування дозволить гнучко змінювати алгоритм керування.
3. Використання цифрового регулятора дозволить поліпшити показники якості керування електроприводом разом на відміну від звичайних лінійних систем, які розповсюджені в роботах.

Перелік використаних джерел:

1. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов / О.П. Михайлов. – М. : Машиностроение, 1990. – 302 с.
2. Фоменко А.М. Комплектні електроприводи : у 3 ч. Ч. 1. Аналогові комплектні електропри-

- води : навч. посібник / А.М. Фоменко, Д.Ю. Шарейко. – Миколаїв : НУК, 2010. – 144 с.
3. Фоменко А.М. Комплектні електроприводи : у 3 ч. Ч. 2. Цифрові комплектні електроприводи: навч. посібник / А.М. Фоменко, Д.Ю. Шарейко. – Миколаїв : НУК, 2014. – 32 с.
 4. Шарейко Д.Ю. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Комплектні електроприводи» : у 3 ч. Ч. 1. / Д.Ю. Шарейко, А.М. Фоменко. – Миколаїв : НУК, 2014. – 32 с.
 5. Білюк І.С. Комплектні електроприводи : у 3 ч. Ч. 3. Сервоелектроприводи : навчальний посібник / І.С. Білюк, Д.Ю. Шарейко, А.М. Фоменко, О.В. Савченко. – Миколаїв : НУК, 2018. – 210 с.
 6. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Н.Л. Рассудов. – 3-е изд., испр. – М. : Академия, 2007. – 576 с.
 7. Ловыгин А.А. Современный станок с ЧПУ и САД/САМ система / А.А. Ловыгин, А.В. Васильев, С.Ю. Кривцов. – М. : Литкон-Пресс, Эльф ИПР, 2006. – 286 с.
 8. Попович М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков. – Київ : Либідь, 2005. – 680 с.
 9. Дашенко А.Ф. MATHLAB в инженерных и научных расчетах / А.Ф. Дашенко, В.Ф. Кириллов, Л.В. Коломиец, В.Ф. Оробей. – Одесса : Астропринт, 2003. – 212 с.

References:

1. Mikhaylov O.P. *Avtomatizirovannyi elektropriwod stankov i promyshlennykh robotov* [Automated electric drive of machine tools and industrial robots]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 302 p. (Rus.)
2. Fomenko A.M., Shareyko D.Yu. 2010. *Komplektni elektroprivodi: u 3 ch. Ch. 1: Analogovi komplektni elektroprivodi: navchal'niy posibnik* [Complete set of electric drives: in 3 parts. Part 1: Analogs of set of electric drives]. Mikolaiv, NUK Publ., 2010. 144 p. (Ukr.)
3. Fomenko A.M., Shareyko D.Yu. *Komplektni elektroprivodi: u 3 ch. Ch. 2: Tsifrovi komplektni elektroprivodi: navchal'niy posibnik* [Complete set of electric drives: in 3 parts. Part 2: Digital set of electric drives] Mikolaiv, NUK Publ., 2014. 32 p. (Ukr.)
4. Shareyko D.Yu., Fomenko A.M. *Metodichni vkazivki do vikonannya laboratornikh robit z kursu «Komplektni elektroprivodi», chastina 1* [Methodical instructions for laboratory work on the course «Complete electric drives», part 1]. Mikolaiv, NUK Publ, 2014. 32 p. (Ukr.)
5. Bilyuk I.S., Shareyko D.Yu., Fomenko A.M., Savchenko O.V. *Komplektni elektroprivodi. Ch. 3: Servoelektroprivodi* [Complete electric drives. Part 3: Servoelektroprivodi]. Mikolaiv, NUK Publ., 2018. 210 p. (Ukr.)
6. Belov M.P., Novikov V.A., Rassudov N.L. *Avtomatizirovannyi elektropriwod tipovykh proizvodstvennykh mekhanizmov i tekhnologicheskikh kompleksov: uchebnyk dlya stud.* [Automated electric drive of standard production mechanisms and technological complexes: a textbook for students]. Moscow, Academy Publ., 2007. 576 p. (Rus.)
7. Lovygin A.A., Vasiliev A.V., Krivtsov S.Yu. *Sovremennyi stanok s ChPU i CAD/CAM sistema* [Modern CNC machine and CAD / CAM system]. Moscow, Litkon-Press, El'f IPR Publ., 2006. 286 p. (Rus.)
8. Popovich M.G., Lozinsky O.Yu., Klepikov V.B. *Elektromekhanichni sistemi avtomatichnogo keruvannya ta elektroprivodi* [Electromechanical automatic control systems and electric drives]. Kiev, Libid Publ, 2005. 680 p. (Ukr.)
9. Dashchenko A.F., Kirillov V.F., Kolomiets L.V., Orobei V.F. *MATHLAB v inzhenernykh i nauchnykh raschetakh* [MATHLAB in engineering and scientific calculations]. Odessa, Astroprint Publ., 2003. 212 p. (Rus.)

Рецензент: І.П. Атаманюк

д-р техн. наук, проф., Миколаївський національний аграрний університет

Стаття надійшла 01.10.2020

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПРИВОДУ ЕЛЕКТРОГАРМАТИ
ДЛЯ ЗАКРИТТЯ ЛЬОТКИ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ**

У даній статті розглядається електрогармата для закриття льотки доменної печі, виявляються недоліки, які можуть негативно вплинути на продуктивність електрогармати, а саме дискретність переміщення гака електромагніту захоплення в петлю. Представлене рішення основної проблеми електромагніту захоплення, як важливої і невід'ємної частини електрогармати для закриття льотки доменної печі, що в свою чергу призведе до підвищення надійності роботи вищевказаного апарату.

Ключові слова: електрогармата, електромагніт, льотка, доменна піч.

I.M. Karakuts. Improving the reliability of the electric gun drive for closing the taphole of a blast furnace. The blast furnace is a large metallurgical vertical furnace for smelting cast iron and ferroalloys. The principle of the blast furnace operation is the continuity of the metallurgical process during the whole period of its operation up to the regular overhaul, which is performed on average once every ten years. The total service life of the blast furnace can exceed one hundred years. The blast furnace is of a mine type: it is periodically charged from above with ore, coke and other components, gas being fed from below. Periodically, the slag melt is drained from the blast furnace and molten cast iron is released, i.e. the column of raw materials in the blast furnace mine eventually settles down, turning into cast iron and slag, and on top it is replenished with new portions of charge materials. For the periodic release of cast iron, a tap hole is used, which at the end of the release process is filled with the filling mass with the help of a special machine – a gun at the end of the release process. The reliability of the gun determines the quality and continuous operation of the furnace. One of the cycles of the blast furnace gun is fixing the gun on the blast furnace shell to ensure the reliability of the taphole closure. This function of the gun is performed by the locking mechanism. This article discusses an electric gun for closing the taphole of a blast furnace, reveals the drawbacks that can negatively affect the performance of the electric gun, namely, the discreteness of moving the hook of the gripping electromagnet into the loop. The solution of the main problem of the gripping electromagnet is presented, as an important and integral part of the electric gun for closing the taphole of the blast furnace, which in its turn will result in an increase in the reliability of the above mentioned apparatus.

Keywords: electric oven, electromagnet, taphole, blast furnace.

Постановка проблеми. На стабільність роботи доменної печі впливає ряд факторів, одним із яких є надійна робота електрогармати для закривання її чавунної льотки. Одним з елементів гармати є прилад її фіксації відносно льотки під час закриття. Цей прилад побудований на базі використання довгоходового електромагніту, який здійснює дискретне переміщення гаку (засувки) в отвір (паз) скоби на кожусі доменної печі. Висока швидкість входу гака в отвір скоби може призвести в окремих випадках до аварійних, позаштатних ситуацій, поломок механізму. Тому робота над підвищенням надійності приводу електрогармати для закриття льотки доменної печі є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Доменна піч – це велика металургійна вертикально розташована піч для виплавки чавуну і феросплавів. Принцип роботи доменної печі полягає в безперервності металургійного процесу на весь термін її експлуатації до чергового капі-

* студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, karakuts1998@gmail.com

тального ремонту, який виконується в середньому один раз на 10 років. Загальний термін служби доменної печі може перевищувати 100 років [1].

Доменна піч шахтна: зверху в неї періодично завантажують порціями шихту з руди (агломерату), коксу та інших компонентів, а знизу подають газ. Періодично з доменної печі зливають розплав шлаку та випускають розплавлений чавун, тобто стовп вихідних матеріалів в шахті домни з часом осідає, перетворюючись в чавун і шлак, а зверху його нарощують новими порціями шихтових матеріалів [2].

Для періодичного випуску чавуну використовується чавунна лютка, яку по закінченні процесу випуску забивають закладочною (льоточною) масою за допомогою спеціальної машини – гарматою (рис. 1, а). Надійність роботи гармати визначає якісну і безперервну роботу печі [3].

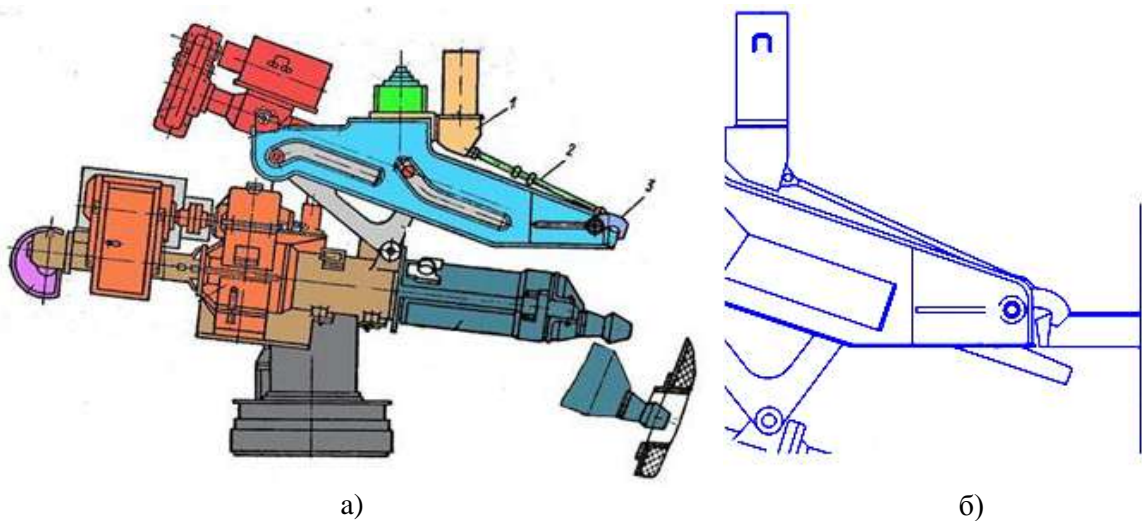


Рис. 1 – Електрогармата (машина) для закривання чавунної лютки доменної печі (а) та механізм фіксації поворотної консолі гармати (б): 1 – електромагніт; 2 – тяга; 3 – засувка

Одним з циклів роботи гармати доменної печі є фіксація гармати (при повороті її в робоче положення) на кожусі доменної печі для забезпечення надійності закриття лютки [4]. Цю функцію на гарматі виконує механізм фіксації (рис. 1, б).

Для надійного функціонування гармати в момент закривання чавунної лютки, вона (гармата) підводиться притискним пристроєм до лютки і для компенсації реактивного зусилля, яке формується при видавлюванні льоточної маси з носка гармати, фіксується в цьому положенні механізмом фіксації (рис. 1, б).

Призначення механізму фіксації, зблокованого з притискним пристроєм, – утримати гармату в футлярі чавунної лютки при її закритті.

Механізм фіксації складається з встановленого на кронштейні довгоходового електромагніту 1, тяг 2 і засувки 3, що обертається на осі (рис. 1, а).

В процесі експлуатації печі виявлений такий недолік електрогармати, як висока швидкість (дискретність) переміщення гака в петлю (рис. 2, графік 1), що може призводити до деформації як петлі, так і гака при недостатньому підході гака до кожуха доменної печі [5].

Мета статті – підвищення надійності роботи гармати для закривання лютки доменної печі за рахунок модернізації механізму фіксації поворотного пристрою (колони), що дозволить забезпечити регламентований характер переміщення гака у часі.

Виклад основного матеріалу. Для усунення дискретного переміщення гака в петлю і запобігання можливості руйнування цієї системи запропоновано змінити принцип роботи електромагніту, встановивши додатково електронну систему управління динамікою переміщення якоря магніту.

Розроблено пристрій, що забезпечує швидке підведення гака до петлі з наступним введенням гака в петлю із заданим зміненням швидкості (рис. 2, крива 2).

Пристрій складається з довгоходового магніту 1, сердечник якого механічно з'єднаний з датчиком 2 його переміщення, і системи управління роботою магніту (блоки: 3 – генератор; 4 – порівнювальний пристрій, 5 – підсилювач потужності, 6 – датчик струму, 7 – пороговий пристрій і 8 – сигнальний пристрій) (рис. 3).

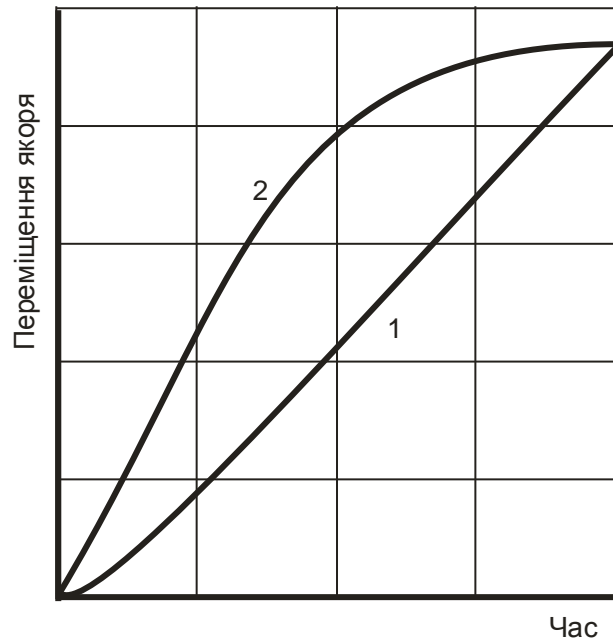


Рис. 2 – Характер переміщення якоря електромагніту у часі

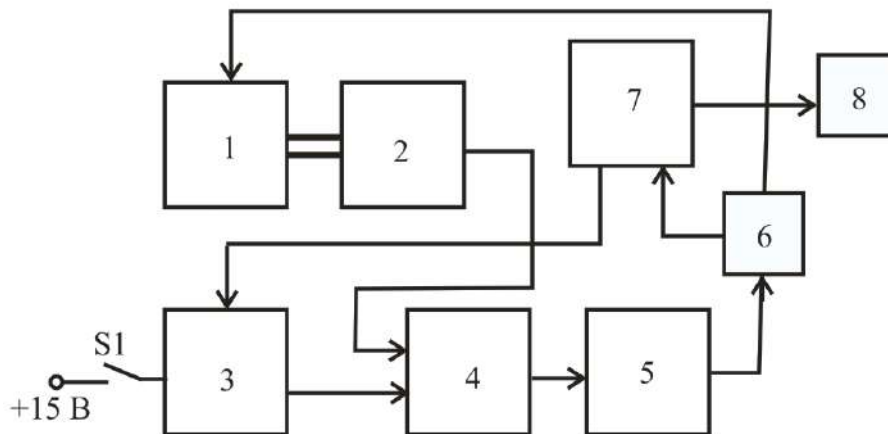


Рис. 3 – Структурна схема управління характером переміщення якоря електромагніту у часі

Спрощена електрична схема блоків 3 і 4 наведена на рис. 4. Генератор 3 побудований на операційному підсилювачі DA1, включеного за схемою аперіодичної ланки (в колі його зворотного зв'язку включені паралельно з'єднані конденсатор C1 і резистор R3), що дозволяє при подачі на його вхід напруги 15 В (замкнувши вимикач S1) сформувати на його виході напругу, форма якої аналогічна кривій 2, показаній на рис. 2.

Ця напруга порівнюється (в операційному підсилювачі DA2) з сигналом, що надходить з датчика 2 переміщення якоря електромагніту, і їх різниця подається на підсилювач потужності 5, до виходу якого через датчик струму 6 підключена обмотка електромагніта 1. З датчика струму сигнал подається на вхід порогового пристрою 7, який має два виходи: один підключений до другого входу генератора 3, а до другого виходу підключений сигнальний пристрій 8.

Принцип дії: при включенні ключа S1 подається сигнал на включення електромагніту 1, що дозволяє роботу генератора 3, який формує на виході сигнал, форма якого наведена на рисунку 3. Сигнал цієї форми дозволяє забезпечити заданий в часі характер переміщення гака захоплення. Це необхідно для запобігання ударів в кінці його ходу. Такий характер зміни швидкості необхідний для того, щоб в початковий момент гак з мінімальними витратами часу підійшов до засувки і перед входом в петлю його швидкість сповільнилася.

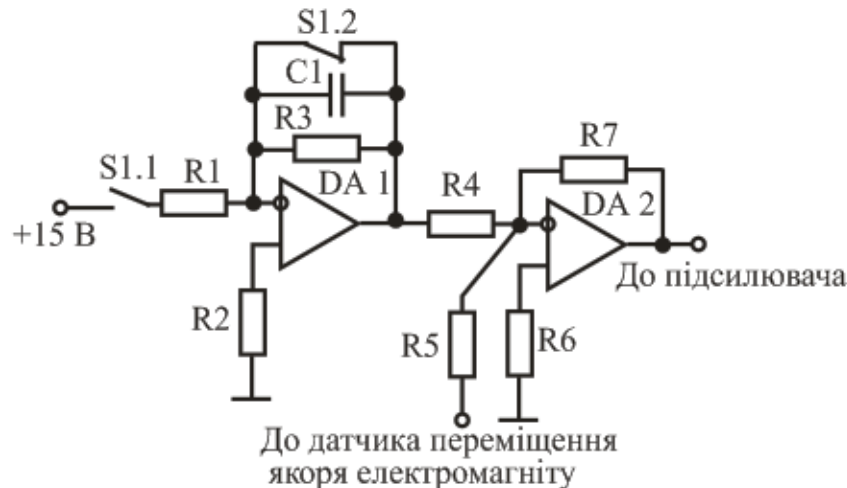


Рис. 4 – Спрощена електрична схема блоків 3 та 4 (рис. 3)

Така схема (рис. 4) дозволяє при зміні швидкості переміщення якоря забезпечити задане тягове зусилля електромагніту на всьому шляху його переміщення.

Якщо струм електромагніту ненабагато перевищить граничне значення, то пороговий пристрій сформує сигнал, загориться сигнальна лампа. Якщо ж граничне значення струму електромагніту перевищено, то сигнал з порогового пристрою 7 загальмує роботу генератора 1, скинувши його в 0.

Вибравши величину конденсатора C1 і опору R3 в колі оборотного зв'язку операційного підсилювача DA1, можна змінювати постійну часу пропорційно-інтегруючої ланки, тим самим керувати характером зміни швидкості якоря електромагніту.

Висновки

У статті розглянуто питання підвищення надійності приводу електромагніту доменної печі за рахунок модернізації системи управління електромагнітом захоплення.

Розроблено пристрій, що забезпечує швидке підведення гака до петлі з наступним введенням гака в петлю із заданим зміненням швидкості.

Дана розробка є легкою як в монтажі, так і в обслуговуванні, не потребує значних економічних витрат, однак її установка призведе до значного продовження терміну експлуатації електромагніту для закриття лютки доменної печі.

Перелік використаних джерел:

1. Бабарькин Н.Н. Теория и технология доменного процесса / Н.Н. Бабарькин. – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. – 257 с.
2. Рамм А.Н. Современный доменный процесс / А.Н. Рамм. – М. : Metallurgiya, 1980. – 303 с.
3. Агроник С.Г. Электрическое оборудование доменных цехов / С.Г. Агроник, М.Ю. Блатт, С.П. Скрыльников. – М. : Metallurgiya, 1966. – 196 с.
4. А.с. 419558 СССР, МПК С 21 в 7/12. Электропушка для забивки чугунной летки доменной печи / В.А. Шатлов, Б.П. Федосов, В.Г. Маньков, А.Г. Крупский, А.Я. Семенко, В.И. Бабенке. – № 1799693/22-2; заявл. 22.06.1972; опубл. 15.03.1974, Бюл. № 10.
5. Фираго Б.И. Теория электропривода / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 414 с.

References:

1. Babarikin M.M. *Teoriia i tekhnologiia domennogo protsessa* [Theory and technology of the blast furnace process]. Magnitogorsk, GOU VPO «MGU» Publ., 2009. 257 p. (Rus.)
2. Ramm A.N. *Sovremennyi domennyi protsess* [Modern domain process]. Moscow, Metallurgii Publ., 1980. 303 p. (Rus.)
3. Agronik S.G., Blatt M.Iu., Skryl'nikov S.P. *Elektricheskoe oborudovanie domennykh tsekhov* [Electrical equipment of blast furnaces]. Moscow, Metallurgii Publ., 1966. 196 p. (Rus.)
4. Shatlov V.A., Fedosov B.P., Man'kov V.G., Krupskii A.G., Semenko A.Ia., Babenke V.I. *Elektricheskaya dlika dlia zabivki chugunnoi letki domЕННОЙ pechi* [Electric gun for driving a cast-iron tap-hole in a blast furnace]. Certificate of authorship USSR, no. 419558, 1974. (Rus.)
5. Firago B.I., Pavlyachik L.B. *Teoriia elektroprivoda* [Theory of electric drive]. Minsk, ZAT «Technoperspective» Publ., 2004. 414 p. (Rus.)

Рецензент: С.К. Поднебенна
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла: 15.08.2020

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

UDC 528.088.4

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226190

© Mehdiyeva Almaz Mobil gizi *

DEVELOPMENT OF VIRTUAL MEASURING EQUIPMENT FOR CONTROL SYSTEMS

The article considers the issue of measurements, virtual devices, which is a topical issue of the time. The first step in control industry and technology is to take measurements. Virtual measuring devices have been studied, given that virtual devices are now widely used in industry. Control systems, which are a clear example of modern technology, are an ideal tool for obtaining high quality products in production and industry, as long-used analog control systems give way to digital control systems with high accuracy and wide range of functions. Taking all this into account, simulation modelling of this process was carried out: Technological processes in production areas operate continuously, one of which is the process of collecting a product or raw material in a tank or transferring it from a tank to a specific device. This process requires control of the product level in the tank, which must be automatic. Level measuring devices keep the level of the product in the tank stable and control the overfilling of the tank. Recently, there has been a blurring of the distinction between «real» and «virtual» devices. Almost any modern device has the ability to connect to a PC and software (software) included in the kit. By connecting such a device to a PC and using software, the user has the ability to control the device from a PC, store and process data, which turns the real device itself into a virtual part of the «virtual» device. The use of the LXI protocol in the devices eliminates the need to install software on the computer, since the communication software is located in the device itself. Thus, it has been shown that through the technology of virtual devices, it is possible to transform a standard personal computer, which is the creator of the program, and the whole set of control and measuring devices together into a complex of measurement and calculation with a wide range of functions. The advantages of the proposed virtual devices are: minimization of costs; simultaneous analysis of multiple measurements; installation of multi-channel distribution systems; simplification of automated systems.

Keywords: control system, technological process, measuring device, virtual measuring device, level transmitter, information transmitter.

Мехдієва Алмаз Мобіл кизи. Розробка віртуального вимірювального обладнання для систем контролю. У статті розглядається питання вимірювань віртуальними приладами, яке є актуальним питанням часу. Першим кроком у галузі управління та технологій є проведення вимірювань. Віртуальні вимірювальні прилади були вивчені з огляду на їх широке використання у промисловості. Системи керування, які є яскравим прикладом сучасних технологій, є ідеальним інструментом для отримання високоякісної продукції у виробництві та промисловості, оскільки аналогові системи керування, що використовуються давно, поступаються місцем цифровим системам з високою точністю та широким спектром функцій. Враховуючи все це, було проведено імітаційне моделювання процесу: технологічні процеси на виробничих ділянках виконуються безперервно, одним з них є процес збору продукту або

* applicant, Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan, ORCID: 0000-0002-3962-3980, almazmehdiyeva@yahoo.com

сировини в резервуар або перенесення його з резервуара на конкретний пристрій. Цей процес вимагає контролю рівня продукту в резервуарі, який повинен бути автоматичним. Прилади для вимірювання рівня підтримують рівень продукту в резервуарі стабільним і контролюють переповнення резервуара. Останнім часом відбувається стирання відмінностей між «реальними» і «віртуальними» приладами. Практично будь-який сучасний прилад має можливість підключення до ПК і програмне забезпечення, що входить в комплект. При підключенні такого приладу до ПК і використанні програмного забезпечення, користувач має можливість управляти приладом, зберігати і обробляти дані, що перетворює сам реальний прилад вже у віртуальну частину «віртуального» приладу. Використання ж протоколу LXI в приладах дозволяє відмовитися від установки програмного забезпечення на комп'ютер, оскільки програмне забезпечення для зв'язку знаходиться у самому приладі. Таким чином, було показано, що за допомогою технології віртуальних приладів можна перетворити стандартний персональний комп'ютер, який є творцем програми, і весь набір контрольно-вимірювальних приладів разом у комплекс вимірювань і обчислень з широким спектром функцій. Перевагами запропонованих віртуальних пристроїв є: мінімізація витрат, одночасний аналіз множинних вимірювань, встановлення багатоканальних розподільчих систем, спрощення автоматизованих систем.

Ключові слова: *система керування, технологічний процес, вимірювальний прилад, віртуальний вимірювальний прилад, передавач рівня, передавач інформації.*

Description of the problem. The automation of technological processes consists of a number of tools and methods designed to manage various processes, without the use of laboratory. At present, the pace of development and progress of technology is such that any technological process can be carried out without human intervention. The constantly updated technological equipment and aggregates have a great impact on the development of industry, and the automation of production processes is almost the basis for the development of production and various industries.

Analysis of recent research and publications. Intelligent control systems, which are a clear example of modern technology, are an ideal tool for obtaining high quality products in production and industry, as long-used analogy control systems give way to digital control systems with high accuracy and wide range of functions. Taking all this into account, simulation modelling of this process was carried out: Technological processes in production areas operate continuously, one of which is the process of collecting a product or raw material in a tank or transferring it from a tank to a specific device. This process requires control of the product level in the tank, which must be automatic. Level measuring devices keep the level of the product in the tank stable and control the overfilling of the tank. The use of level gauges is used to monitor not only the level itself, but also the physical parameters of the product - the parameters that characterize it. The introduction of automatic control systems is the best solution to increase production efficiency. Extensive application of control systems is needed to increase production efficiency.

Purpose of the article is to study the development of virtual measuring equipment for control systems.

Presentation of the main material. Level meters are used to measure the level of liquid in closed and open tanks and devices of technological process. These sensors are designed to provide automated control of the level of liquid and granular products, as well as to transmit warning light and sound signals when the level of the controlled medium changes. Level meters are made as a single device or part of a technological device [1]. With the help of systems designed in conjunction with modern intelligent devices, it is possible to make accurate measurements, even in very difficult and dangerous conditions. Tanks are divided into two groups according to the position of use: tanks used in production and filling. Products from other tanks are poured into the tanks used in production. Therefore, the level of product in these tanks is constantly increasing. The sensor warns if there is a decrease in product level. In filling tanks, on the contrary, the level of the product always decreases. In this case, the level gauge warns if there is an increase in the level of the product in the tank. Radar-level level sensors, which are non-contact level sensors, are an ideal tool for solving the above-

mentioned problem. Measurement-study determines the quantitative ratios of the intended events, which allows to compare the final results of various discoveries and research. Measuring instruments (MV) – technological devices used in measurement and containing accurate metrological characteristics of the measured quantity. Verification of measuring instruments – is the determination by the official metrological body of the suitability for measurement of the given metrological characteristics of the technical means used and confirmation of compliance with the requirements. Accuracy of measurements is the degree to which the error of the unmeasured value of a physical quantity is close to zero. Measurement error is the sum of the principles and means by which the measurement method is used. A measuring device is a technical measuring instrument that obtains the value of a quantity measured at a predetermined interval. These devices are analog and digital due to the fact that they transmit the received information in the form of continuous or discrete signals. One of the new trends in the field of automation of measurement processes is the introduction of virtual computing for data collection and processing in advance. This trend is closely linked with the rapid development of modern information and computer technology. The virtual environment is a software module for recording data, ie to create virtual devices that are used in parallel with real devices in the measurement process. LabVIEW-program was created by the American company National Instruments [2-4]. LabVIEW – the environment was created thirty years ago and is still evolving. This program was originally designed for research laboratories. Today, Lab VIEW is an invaluable graphical programming language for millions of scientists, engineers and researchers. Designed for testing, various measurement processes, data generation and monitoring, LabVIEW is used to combine on-screen automation and measurement functions that make up its composition. The language used in LabVIEW is G. Features. With LabVIEW, a large graphical programming language, it is possible to increase the productivity of the automation process many times over. The process of creating a program in simple programming languages takes a long time. However, in the LabVIEW software package, this process only takes a few hours. The measurement system developed in LabVIEW is more efficient than a laboratory device because it uses various features of modern programming [5-7]. LabVIEW is a virtual device that performs the task. It has a library of functions that solve many programming problems, free from the daily work associated with the distribution of indicators, as well as ready-to-use subroutines. Places used. There is a wide range of applications such as medicine, food and light industry, automation of technological processes, automotive diagnostics, SCADA applications, statistics, physics, energy analysis, determination of chemical compounds, robotics, and the field of application continues to grow.

Data flow and graphical programming language. In object-oriented algorithmic programming environments, programming is based on writing the program interface by sequentially entering program code, while LabVIEW uses a graphical programming language. In this software environment, the algorithm allows you to eliminate a large number of syntactic errors, using a graphic icon in the formation of the block diagram. Using this method requires attention in programming a single data stream. The working algorithm of the program is developed, then it is left to draw a visual description of this algorithm – a block diagram, using the graphical language of programming. In this case, there is no need to think about cell memory, access ports, addresses, and other attributes. The data will be transmitted from block to block via wires, the data will be processed according to algorithms, an image will be obtained and stored in memory. Virtual device. If we equip any personal computer with several analog inputs, then we can turn it into a very powerful measurement system. A computer keyboard and monitor are more useful than an oscilloscope and multimeter, and allow you to use many services. Disk devices and flash cards play an important role in storing data. The printer is suitable for recording time-consuming processes. Also, the computing power and command system of personal computers allow you to process data with different types of complexity. When previous versions of the personal computer were converted into virtual devices, it was necessary to install some expensive and complex boards on the computer. Today, this method is still used in the automation of large industrial processes and large research laboratories. However, it is possible to achieve the desired result by connecting a small analog-to-digital converter to a parallel or serial port on a personal computer. Virtual tools are computer programs that interact with actuators and sensors and real objects [8]. These tools perform a set of functions of imaginary and real tools. A sensor is a simple device that receives information from an object, converts that information into electrical signals, and then

transmits it to a computer for processing. Virtual measuring instruments collect and analyse a single piece of data, while very sophisticated virtual instruments interact with objects in both directions. Here, the output signals are controlled by actuators (Figure 1).

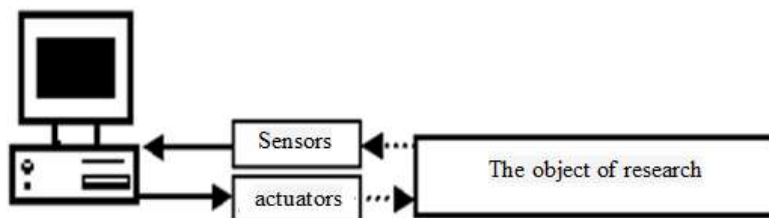


Fig. 1 – Description of a virtual device

The signals received by the computer are digital signals, while real signals are analog in nature. For this reason, converters are needed to switch from analog to digital and from digital to analog signal so that the computer can communicate with the object being searched. To solve this problem, the Analog Digital Converter (ADC) and Digital Analog Converter (DAC) boards in the systems are placed inside the computer. The device records the necessary information, monitors the set of indicators. The readings of all transmitters are entered into a computer that processes these indicators. The results are then displayed on a monitor and stored in the computer's external memory. The computer on which LabVIEW is written uses a Virtual Instrument that works with real indicators of the device's transmitters and monitors real changes in parameters. All results obtained in this program are displayed on the screen in the virtual front panel. The virtual measurement system can be assembled from different types of hardware and software. Various measuring instruments can be used to monitor any process or to test any device.

LabVIEW is a user-friendly software environment designed primarily for the needs of engineers. The LabVIEW environment is an extensive set of tools for data collection, analysis, processing and storage. Programs created in the LabVIEW environment consist of three parts: block diagram; front panel; pictogram.

It is possible to show the solution of the problem graphically with the block diagram. On the one hand, when the user controls the front panel, on the other hand, virtual tools work in the block diagram. The block diagram also controls real systems through hardware developed by NI. The block diagram is used to write code in the object-oriented programming language, to respond to forms prepared for the front panel user interface.

In the LabVIEW environment, the front panel is the user interface, which displays a graphical description of the virtual key, key, control and other indication elements.

A pictogram is a graphical representation of a virtual device in a block diagram. The icon allows you to functionally transform a virtual device into an object to be used in the block diagram of another virtual device.

The software assembled in the LabVIEW environment of a virtual device designed to control the liquid level in an oil-filled tank is shown in Figure 2 and Figure 3. The figure shows the front panel, block diagram and graphic description of the virtual device. The total capacity of the tank is 1000 liters. A measuring scale is used to control the level of oil in the tank. There are also lower and upper limits for the level of the tank. The upper limit is 900 liters, and the lower limit is 100 liters. If the level of the tank exceeds the upper limit or, conversely, reaches the lower limit, the user is alerted by a light signal. In addition, an alarm is sounded when the oil level in the tank reaches the upper limit, ie if there is a risk of oil overflow. Here, the oil level is visually displayed on the tank. The «stop» command is used to stop the program. An alarm diagram is also provided at the time of tank emptying and filling. Thus, a virtual measuring device was created by the proposed method and the issue of increasing the measurement accuracy was studied. Differences in the results at the end of numerous measurement studies indicated the presence of errors. We have proposed corrective filtering to eliminate measurement errors.

As a result of the research, a satisfactory result was obtained, and the errors were significantly reduced. The result is shown in Figure 4.

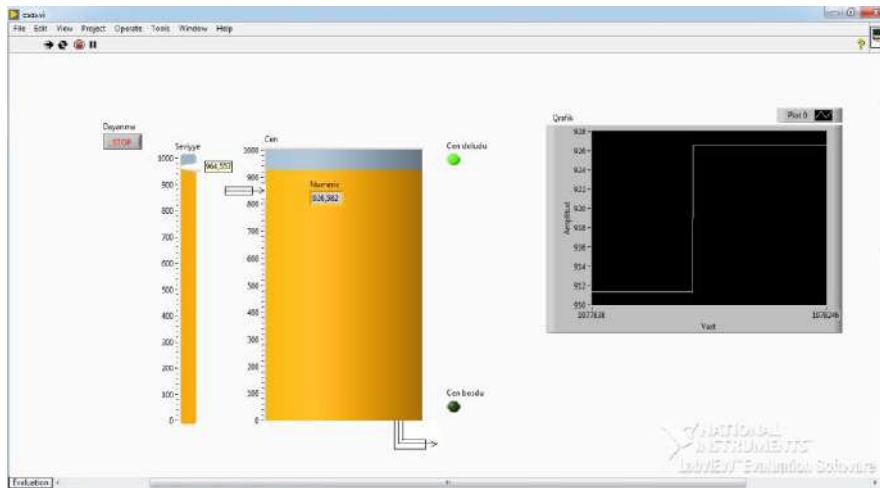


Fig. 2 – A virtual device that monitors the level of liquid in the tank

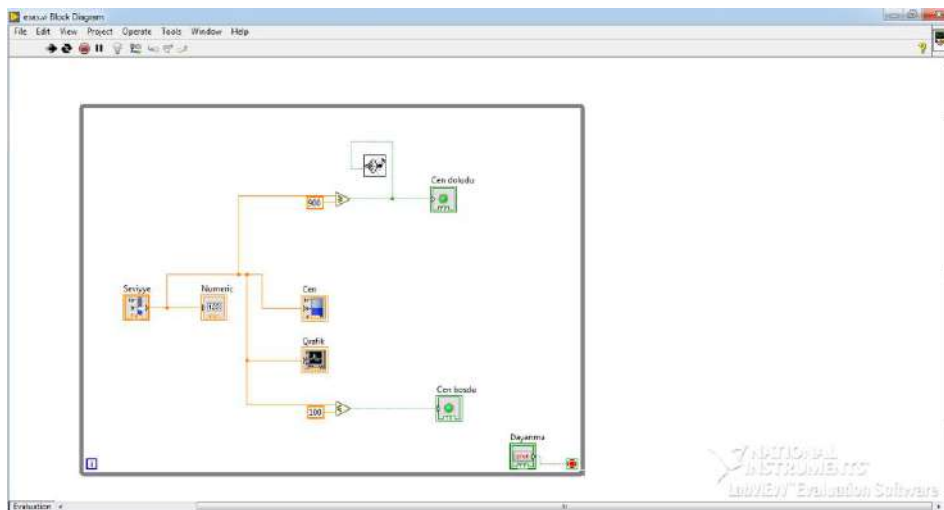


Fig. 3 – A virtual device that monitors the level of liquid in the tank

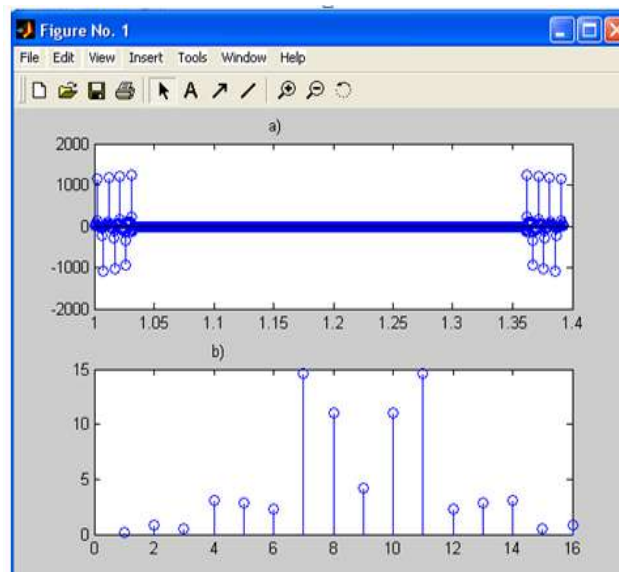


Fig. 4 – Spectrum of the input signal and spectrum after corrective filtration

Conclusions

1. The principle of operation and structure of measuring instruments used in level measurement were studied, appropriate measuring instruments were selected for use in different conditions.

2. It is proposed to use a radar-type level sensor, which has recently been developed and is considered the best in level measurement.

3. A virtual device has been developed to measure and monitor the level of liquid in the tank through the Lab VIEW program.

4. Proposed corrective filtering to eliminate measurement errors.

5. As a result of the research, a satisfactory result was obtained, and the errors were significantly reduced.

References:

1. Devine P. Radar level measurement – the user’s guide, Burgess Hill, VEGA Controls Publ., 2004. 116 p.
2. Jerome J. Virtual instrumentation using LabVIEW. PHI Learning Publ., 2010. 54 p.
3. LabVIEW, Introductory Course – NCSA HDF5 (Hierarchical Data Format 5) Software Library and Utilities. 2003. 27 p.
4. Sensor Technology Handbook: edited by Jon S. Wilson. 2005. 704 p. doi: 10.1016/b978-0-7506-7729-5.x5040-x.
5. Vinogradova N.A., Listratov Ia.I., Sviridov E.V. *Razrabotka prikladnogo programmnogo obespecheniia v srede LabVIEW* [Development of applied software in the LabVIEW environment]. Moscow, MEI Publ., 2005. 47 p. (Rus.)
6. Druz’iakin I.G., Lykov A.N. *Tekhnicheskie izmereniia i pribory* [Technical measurements and instruments]. Perm’, Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Publ., 2008. 412 p. (Rus.)
7. Kulakov M.V. *Tekhnologicheskie izmereniia i pribory dlia khimicheskikh proizvodstv* [Technological measurements and devices for chemical production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 424 p. (Rus.)
8. Vil’nina A.V., Vil’nin A.D., Efremov E.V. *Sovremennye metody i sredstva izmereniia urovnia v khimicheskoi promyshlennosti: uchebnoe posobie* [Modern methods and means of measuring the level in the chemical industry: a textbook]. Tomsk, TPU Publ., 2011. 84 p. (Rus.)

Перелік використаних джерел:

1. Devine P. Radar level measurement – the user’s guide / P. Devine. – Burgess Hill : VEGA Controls, 2004. – 116 p.
2. Jerome J. Virtual instrumentation using LabVIEW / J. Jerome. – PHI Learning, 2010. – 54 p.
3. LabVIEW, Introductory Course – NCSA HDF5 (Hierarchical Data Format 5) Software Library and Utilities. – 2003. – 27 p.
4. Sensor Technology Handbook: edited by Jon S. Wilson. – 2005. – 704 p. – Mode of access: DOI: 10.1016/B978-0-7506-7729-5.X5040-X.
5. Виноградова Н.А. Разработка прикладного программного обеспечения в среде LabVIEW / Н.А. Виноградова, Я.И. Листратов, Е.В. Свиридов. – М. : Издательство МЭИ, 2005. – 47 с.
6. Друзьякин И.Г. Технические измерения и приборы / И.Г. Друзьякин, А.Н. Лыков. – Пермь: Издательство Пермского государственного технического университета, 2008. – 412 с.
7. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств / М.В. Кулаков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1983. – 424 с.
8. Вильнина А.В. Современные методы и средства измерения уровня в химической промышленности: учебное пособие / А.В. Вильнина, А.Д. Вильнин, Е.В. Ефремов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 84 с.

Reviewer: S.F. Cafarov

PhD in Engineering, associate professor, Azerbaijan State Oil and Industry University

The article was admitted on 17.09.2020

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНОГО
ОБРОБЛЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОБКОТИШІВ НА КОНВЕЄРНІЙ
ВИПАЛЮВАЛЬНІЙ МАШИНИ**

Розроблена комплексна математична модель для дослідження керування процесом термічного оброблення залізородних обкотишів на конвеєрній випалювальній машині при управлінні контролером нечіткої логіки із здійсненням параметричної ідентифікації параметрів газоповітряних потоків впродовж технологічних зон. Система має комплексну математичну модель, що включає в себе змінні, які характеризують параметри технологічних зон.

Ключові слова: конвеєрна випалювальна машина, обкотиші, комплексна математична модель.

***O.V. Mitrofanov. Mathematic model for research of heat treatment of iron ore pellets on a conveyor roasting machine.** The purpose of the study is to develop a mathematical model for the study of the automated control of thermal process based on fuzzy logic and the rational use of coolant gas-air flows through the technological zones of the conveyor roasting machine. The proposed methodology will stabilize the treatment regime by technological zones and reduce the energy consumption amount and improve the quality of the roasted pellets. The subject of the study is an automated control system for the process of thermal treatment of pellets in the technological zones of the conveyor roasting machine; the system takes into account the influence of fuzzy parameters of the temperatures of the gas-coolant heat fluids, which provides economical use of energy costs in the conditions of uncontrolled external disturbances. The solution of the actual research problem of controlling the distribution of coolants of gas-air streams in the technological zones of the conveyor roasting machine during the thermal treatment of iron ore pellets is accomplished by developing a complex mathematical model and taking into account the relationships between the technological parameters of technological machines. It has been revealed that the main problem of control systems synthesis of the conveyor roasting machine technological processes of the theory of optimal control is the high dimension of the models of mass exchange technological processes dynamics. Therefore, it is suggested to apply fuzzy logic in conjunction with neural networks. Models of technological zones of drying, heating, roasting, recovery and cooling of the conveyor roasting machine have been improved by introducing a fuzzy logic controller into their structure as the main control and regulating device. This made it possible to improve the performance of the main functional dependencies, that is the temperatures of the upper layer of pellets and gas-air flows.*

Keywords: conveyor roasting machine, pellets, a complex mathematical model.

Постановка проблеми. Сьогодні існує безліч математичних моделей, розроблених для дослідження протікання перехідного процесу для однієї технологічної зони конвеєрної випалювальної машини (КВМ). Моделі дозволяють досліджувати і оптимізувати як різні режими процесу термічної обробки обкотишів, так і роботу його електроприводів вентиляторів і димотягів, а також окремих вузлів і агрегатів. При цьому більшість досліджень виконується на моделях, які містять одну технологічну зону або електропривод і описуються системами звичайних нелінійних диференціальних рівнянь, що дозволяють із достатньою точністю описати теплові та газоповітряні потоки, що впливають на випалювання обкотишів, або визначити елект-

* аспірант, ДВНЗ «Криворізький національний університет» м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0003-4093-8223, mitrofanov.322@gmail.com

ромагнітні процеси в двигуна [1-4]. Проте обмежуються оптимізації процесу термообробки для усієї КВМ. Існуючі математичні моделі достатньо точно описують теплові та газоповітряні потоки, що впливають на випалювання обкотишів, але невідомий вплив параметрів газоповітряного потоку на термообробку.

Під час процесу переміщення конвеєрних візків відбуваються складні коливальні рухи через зміну їх параметрів температурного розподілу нерівномірним шаром за висотою і зміною пористості шару, їх фізико-хімічних властивостей. Вказані збурення призводять до температурних коливань, що позначається на якості випалених обкотишів. Необхідно зазначити, що кожен вид коливань може проявлятися окремо або спільно з іншими видами коливань. При цьому склад вхідних впливів представляється обмеженим. В останньому випадку є можливість досліджувати теплові процеси, що діють у технологічних зонах, а також коливальні процеси, які можуть виникати при роботі цієї зони і приводити як до додаткових витрат енергоносіїв при виготовленні обкотишів, так і до можливих порушень протікання технологічного процесу. Однак у процесі руху конвеєрних візків обкотиші відчувають більш складні коливальні рухи, які обумовлені зміною параметрів температур їх нагріву, нерівностями висоти і пористістю шару обкотишів, їх фізико-хімічними властивостями. При цьому, у ділянки КВМ, що працюють під розрідженням, надходять підсосі атмосферного повітря, а ділянки, що знаходяться під тиском, втрачають частину теплоносія. Наявні в шарах котунів температурні коливання від зони до зони зменшують вплив динамічних зусиль і не забезпечують більш якісне виробництво обкотишів. Проте врахування дії цих збурень все одно призводить до того, що не враховується температурний режим попередніх зон і призводять до значних коливань температур як над шаром обкотишів, так і в середині нього під час руху конвеєрних візків. При цьому, кожен вид коливань може проявлятися окремо або спільно з іншими видами коливань. Останнє є особливо актуальним у зв'язку з тим, що коливання параметрів обкотишів безпосередньо залежать, з одного боку, від їх фізико-хімічного складу, тому що зі збільшенням швидкостей руху конвеєрних візків потрібно збільшувати амплітуду і частоту коливань параметрів газоповітряного потоку, а з іншого боку, від збільшення швидкостей руху конвеєрних візків суттєво залежить якість випалюваних обкотишів і продуктивність КВМ. Тому тема, що розглядається, є актуальною та має наукову та практичну значимість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Керування складними технологічними процесами доцільно проводити з використанням автоматизованих систем, до складу яких входять різні типи математичних моделей, які наведено у роботах [5-8]. Проте відомі математичні моделі не у повній мірі задовольняють протікання технологічного процесу термічного оброблення обкотишів. Вони не враховують зміни параметрів газоповітряного потоку впродовж технологічних зон КВМ, які впливають на структуру та міцність випалених обкотишів. Тому дотримання газодинамічних і температурних характеристик під час термічного оброблення обкотишів є необхідною складовою процесу отримання якісного продукту [9, 10]. При цьому якість залізорудних обкотишів пов'язана з комплексом фізико-хімічних перетворень, які відбуваються в умовах зміни параметрів газоповітряного потоку [11]. У процесі експлуатації КВМ оптимальні конструктивні та режимні параметри будуть змінюватися у зв'язку зі зміною характеристик шару обкотишів і донної постелі (вологість, діаметр, гранулометричний склад та ін.). Тому повинні бути реалізовані відповідні алгоритми управління технологічним процесом з використанням комплексної математичної моделі для керування процесом термічного оброблення обкотишів у конвеєрній випалювальній машині, яка враховує одночасну роботу усіх технологічних зон [12, 13]. Аналогічне керування технологічним процесом виконується при створенні критерію функціональної ефективності вантажопідіймального крана в формі комплексної математичної моделі, що включає модель структурних взаємозв'язків укрупнених складальних одиниць, загальну для відомих конструкцій вантажопідіймальних кранів, модель математичного опису функціональної взаємодії укрупнених складальних одиниць вантажопідіймальних кранів, методику розрахунку величин критерію функціональної ефективності [14]. Іншим автором розроблена комплексна математична модель взаємозалежних електромеханічних систем міжклітьового проміжку ширококутового стану гарячої прокатки [15]. Досліджено також, що раціональне використання використаних параметрів газоповітряних потоків дозволить знизити в промислових умовах до 20% палива і покращити якість обкотишів [9, 16-17].

Мета статті. Розробити комплексну математичну модель для дослідження керування процесом термічного оброблення обкотишів при управлінні контролером нечіткої логіки при здійсненні параметричної ідентифікації параметрів газоповітряних потоків впродовж усіх технологічних зон конвеєрної випалювальної машини.

Виклад основного матеріалу дослідження. На підставі проведеного аналізу параметрів термічного оброблення та впливу температурного розподілу шару обкотишів та теплоносіїв газоповітряних потоків [9-11], запропоновано використання комплексної математичної моделі, яка враховує зовнішні коливання, що суттєво впливають при виготовленні обкотишів. Також пропонується включати й інші окремі параметри технологічних зон, параметри фізико-хімічного складу обкотишів, висоту їх шару, пористість шару обкотишів та параметри теплоносіїв газоповітряних потоків, що змінюються при проходженні через шар обкотишів. Розроблена комплексна математична модель для дослідження термічного оброблення шару обкотишів представлена на рис. 1. Математична модель представлена за допомогою розподілених параметрів та має технологічні зони сушіння I (ЗСІ) та II (ЗСІІ), попереднього нагрівання (ЗПН), випалювання (ЗВ), рекуперації (ЗР) та охолодження I (ЗОІ) та II (ЗОІІ).

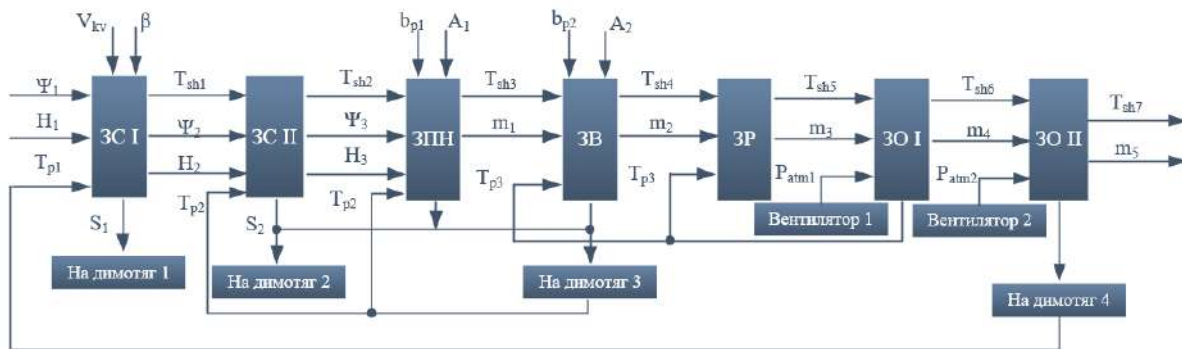


Рис. 1 – Структурна схема комплексної математичної моделі термічного оброблення обкотишів за технологічними зонами

Головна ідея запропонованої математичної моделі є те, що вхідні параметри в технологічну зону є вихідними параметрами з попередньої зони і навпаки, вихідні параметри однієї зони являються вхідними параметрами наступної зони. Проте, необхідно зазначити, що для ЗСІ вхідними параметрами є висота шару обкотишів H_1 , їх вміст вологи Ψ_1 та основність β , швидкість конвеєрних візків V_{kv} , температура теплоносія газоповітряного потоку T_{p1} , що відходить із ЗОІІ. До вихідних параметрів відносяться температура верхнього шару обкотишів T_{sh1} , висота їх шару H_2 , вміст вологості обкотишів Ψ_2 та розрідження S_1 , яке надходить на димотяг 1 та видаляється з ЗСІ. T_{sh} є важливим параметром для врахування температурного розподілу шару обкотишів у зонах високих температур та зонах охолодження для врахування необхідної кількості палива та оптимального тиску теплоносіїв газоповітряних потоків для проходження через шар. Перелічені параметри є вхідними для наступної технологічної зони – ЗСІІ. У ЗСІІ та ЗПН додається ще один вхідний параметр – температура газоповітряного потоку T_{p2} , що відходить із ЗВ та є основним теплоносієм для сушіння обкотишів. Вихідні параметри ЗСІІ (T_{sh2} , Ψ_3 , H_3 , S_2 відходять на димотяг 2) відповідають таким же вихідним параметрам ЗСІ.

Для ЗПН відсутній параметр вмісту вологи, що обумовлюється остаточним видаленням вологи в цій зоні. Оскільки ЗПН є попередньою зоною для випалювання обкотишів для запобігання спікання обкотишів спалюється природний газ для підтримання заданого температурного режиму та встановлені пальникові пристрої для згоряння природного газу у ЗПН та ЗВ, тому одним із вхідних параметрів ЗПН є питома витрата палива b_{p1} та подача первинного повітря A_1 на інжекторні пальники, регламентоване співвідношення до газу 10:1, для ЗВ – b_{p2} та A_2 . Такі параметри, як температури верхнього шару обкотишів T_{sh3} , T_{sh4} , T_{sh5} , T_{sh6} та маси обкотишів на конвеєрному візку m_1 , m_2 , m_3 , m_4 є вхідним для ЗВ, ЗР, ЗОІ, ЗОІІ, відповідно, обумовлюються складними фізико-хімічними реакціями, що впливають на хімічний склад шару обкотишів. Температура теплоносія газоповітряного потоку T_{p3} із ЗОІ подається до ЗВ та ЗР. На димотяг 2

відходить розрідження S_2 газоповітряного потоку з ЗСІІ, ЗПН та ЗВ. Із ЗВ транспортується теплоносії газоповітряного потоку димотягом 3 у ЗСІІ. Нагнітання тиску атмосферного повітря $P_{атм}$ виконується для охолодження шару обкотишів вентиляторами 1 та 2. Димотяг 4 транспортує газоповітряний потік у ЗСІ. Таким чином, опис теплових процесів, що протікають в шарі монодисперсного матеріалу, система рівнянь для розрахунку температур в шарі обкотишів виглядає як у формулі (1).

$$\begin{cases} c_{po}(T)\rho_m(T)(1-\varepsilon)\left[\frac{\partial T_o}{\partial t} + \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y}\right] = \\ = \left[\frac{\partial T_o}{\partial x} \left(\lambda(T,W) \frac{\partial T_o}{\partial x}\right) + \frac{\partial T_o}{\partial y} \left(\lambda(T,W) \frac{\partial T_o}{\partial y}\right) + \frac{\partial T_o}{\partial z} \left(\lambda(T,W) \frac{\partial T_o}{\partial z}\right)\right] + q(x,y,z); \\ \alpha_v(T_z - T_o) = c_z p_z \varepsilon \frac{\partial T_z}{\partial t} - c_z p_z \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y}; \\ \frac{\partial P}{\partial y} = \psi_{ca} \omega_z^2 \rho_z \frac{y}{r_3^2} (1 + \beta T_z), \end{cases} \quad (1)$$

де ρ_o, ρ_z – густина обкотишів і газу, кг/м³; c_{po}, c_z – теплоємність обкотишів і газу, кДж/кг⁰С; ε – порозність шару обкотишів; T_o, T_z – температура матеріалу і газу, ⁰С; $\lambda(T, W)$ – коефіцієнт теплопровідності обкотишів, Вт/м⁰С; P – перепад тиску газу, Па; α_v – об’ємний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м³С; r_3 – еквівалентний радіус частинки, м; ω_z – швидкість газу, м/с; ψ_{ca} – коефіцієнт газодинамічного опору; β – коефіцієнт об’ємного розширення газу, К⁻¹; t – час, с.

Рівняння теплового балансу для теплоносіїв газоповітряних потоків і шару обкотишів мають вигляд (2) та (3).

$$\frac{\partial t_g}{\partial Z} \frac{1}{\eta} = t_g - t_p; \quad \frac{\partial t_p}{\partial X} \frac{1}{\xi} = t_g - t_p; \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\alpha_f(1-\varphi)6H}{C_r m d (W_o \cdot 3600)}; \quad \xi = \frac{\alpha_f 6\Delta L_i}{C_p \rho_p d m (u \cdot 60)}, \quad (3)$$

де η та ξ – безрозмірні параметри функції температури; $Z = z / H$; $X = x / \Delta L_i$ – відносні переміщення; ΔL_i – довжина i -ої ділянки шару, швидкість фільтрації теплоносія газоповітряного потоку W_{oi} протягом якої постійна.

На перетині ділянок вхідна температура теплоносія газоповітряного потоку може зазнавати деякі витрати повітря. Швидкість фільтрації від дільниці до дільниці змінюється стрибкоподібно і на різних ділянках можливий рух газу в протилежних напрямках. Обсяг відхідних газоповітряних потоків розраховується за відомими швидкостями фільтрації в технологічних зонах КВМ (4).

$$V_v = \frac{60 L U_f}{\rho_H h U_A}, \quad (4)$$

де L – довжина технологічної зони, м; U_f – швидкість фільтрації теплоносія газоповітряного потоку, м/с.

Температуру шару обкотишів і теплоносія з часом t від початку процесу і на відстані (висоті) h від місця підведення теплоносія обчислюють з виразів (5) та (6):

$$t_p^h = t_p^h + \Theta_p (t_g^h - t_p^h); \quad (5)$$

$$t_g^h = t_p^h + \Theta_g (t_g^h - t_p^h), \quad (6)$$

де Θ_p та Θ_g – відносні температури обкотишів і газоповітряного потоку.

Значення Θ_p та Θ_g визначають за номограмами Шумана-Будріна в залежності від критеріїв місця Y і часу Z , які зручно представити у вигляді (7):

$$Y = 0,278 \frac{\alpha_{\Sigma v} h}{1000 C_g W}; \quad Z = \frac{1}{60} \frac{\alpha_{\Sigma v} \tau}{1000 C_k \rho}, \quad (7)$$

де $\alpha_{\Sigma v}$ – сумарний об’ємний коефіцієнт теплопередачі (ккал/м³·с·⁰С), який визначається з виразу:

$$\frac{1}{\alpha_{\Sigma v}} = \frac{1}{\alpha_r} + \frac{R^2}{15(1-\varphi)\lambda}$$

де α_v – коефіцієнт зовнішньої теплопередачі; C_k – розрахована теплоємність обкотишів; R – радіус обкотишів, м; $\frac{R^2}{15(1-\varphi)\lambda}$ – внутрішній термічний опір обкотишів.

Кількість палива (м³/год) для опалювання горна машини визначається з виразу (8):

$$V_t = Q_n^p + V_t c_t t_t + V_g 9,94 a c_w t_w + Q_w c_w t_w + Q_{ekz} = Q_{ob} c_{ob} t_{ob} + V_t [10,91 + 9,94(\alpha - 1)] c_{v.g.} t_{v.g.} + Q_{end} + Q_p, \quad (8)$$

де c_t – питома об’ємна теплоємність палива, Дж/(м³·К); c_o – питома масова теплоємність гарячих обкотишів в горні, Дж/(кг·К); c_{ob} – питома масова теплоємність випалених обкотишів, Дж/(кг·К); c_w – питома об’ємна теплоємність повітря, що надходить в горн на розведення, Дж/(м³·К); $c_{v.g.}$ – питома об’ємна теплоємність газів, Дж/(м³·К); t_g – температура палива, °С; t_w – температура повітря розведення, °С; $t_{p.p.}$ – температура обкотишів в зоні підігріву, °С; $t_{v.g.}$ – температура відхідних газів після шару в зоні випалу (середня), °С; Q_n – продуктивність машини в зонах підігріву та випалу, т/год; Q_{ekz} , Q_{end} – хід тепла екзотермічних і ендотермічних процесів, Дж/м³; Q – втрати тепла, Дж/м³; Q_n^p – низька об’ємна теплота згоряння палива Дж/м³.

Насипна маса шару сирих обкотишів визначалася експериментально: $g_n = 2,17$ т/м³. Питома витрата палива для тони випалених обкотишів визначається за формулою (9):

$$b = \frac{Q_{ef} + Q_{pt} + Q_{pk}}{Q_n^p k_b}, \quad (9)$$

де Q_{ef} – ефективний тепловий ефект фізико-хімічних процесів; Q_{pt} – технологічні втрати тепла; Q_{pk} – конструктивні втрати тепла.

Виконаємо моделювання для зони СП, при керуванні термічним обробленням сирих обкотишів у ЗСІ на них одночасно діють декілька вхідних параметрів, таких як: фізико-хімічний склад, вологість й основність сирих обкотишів, рівень шару сирих обкотишів на конвеєрних візках, температура теплоносія газоповітряного потоку, що приходить із ЗОП, швидкість переміщення конвеєрних візків та інші. При переході візків конвеєрної стрічки з обкотишами у ЗСІ потрібно враховувати деякі вихідні параметри ЗСІ, які впливають на роботу ЗСІІ. Тому структурна схема математичної моделі для ЗСІ є багатозв’язною. Її вхідні та вихідні вектори й їхній взаємозв’язок при керуванні термічним обробленням обкотишів у ЗСІ буде мати вигляд, представлений на рис. 2, а.

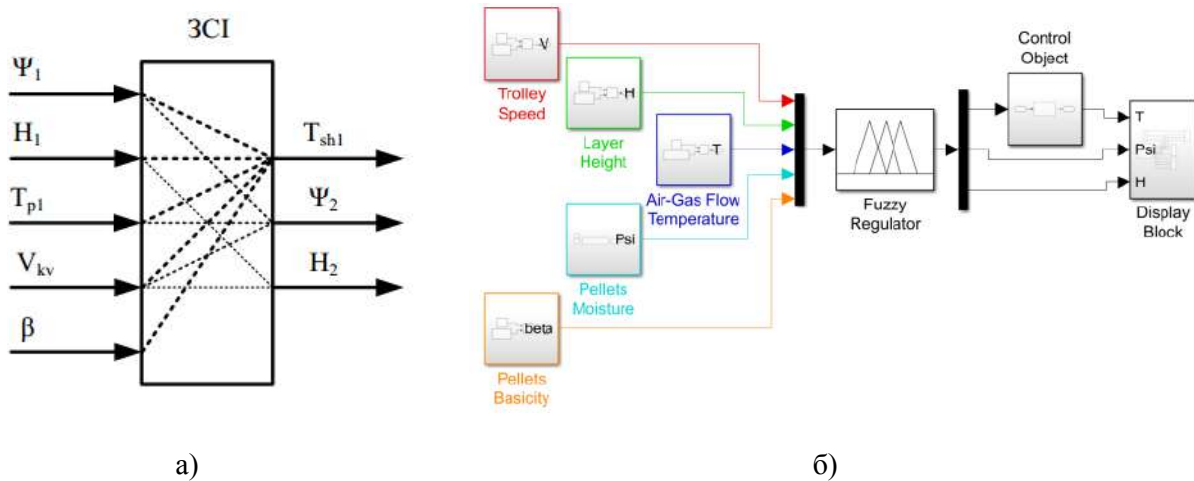


Рис. 2 – Структурна схема вхідних і вихідних векторів при керуванні процесом термічного оброблення обкотишів у ЗСІ (а) та структура системи управління термічного оброблення обкотишів у ЗСІ

На цьому рисунку позначено: Ψ_1 – задане значення вологості, %; H_1 – заданий рівень шару сирих обкотишів, мм; T_{p1} – температура теплоносія газоповітряного потоку (ГПП), що приходить із ЗОП, °С; V_{kv} – швидкість переміщення конвеєрних візків, м/хв; β – основність сирих обкотишів; T_{sh1} – температура верхнього шару обкотишів, що виходять з ЗСІ, °С; Ψ_2 – вологість обкотишів на виході з ЗСІ, %; H_2 – висота шару обкотишів на виході з ЗСІ, мм. Кожний параметр вихідного вектору $[T_{sh1}; \Psi_2; H_2]$, як показують результати виробничих процесів, змінюється у широкому діапазоні та залежить від інших значень параметрів вхідного вектору $[\Psi_1; H_1; T_{p1}; V_{kv}; \beta]$. У табл. 1-2 представлені мінімально та максимально допустимі граничні значення параметрів вхідного та вихідного векторів, враховуючи параметри КВМ ПівнГЗК типу ОК-306.

Таблиця 1

Параметри вектора входу для ЗСІ

Найменування параметра	Позначення параметра	Граничне значення параметра	
		min	max
Вологість обкотишів, %	Ψ_1	85	90
Висота шару обкотишів, мм	H_1	250	400
Температура ГПП, °С	T_{p1}	300	350
Швидкість переміщення конвеєрних візків, м/хв	V_{kv}	0,72	2,52
Основність обкотишів	β	0,7	1,56

Таблиця 2

Параметри вектора виходу для ЗСІ

Найменування параметра	Позначення параметра	Граничне значення параметра	
		min	max
Температура верхнього шару обкотишів, °С	T_{sh1}	300	350
Вологість обкотишів, %	Ψ_1	35	45
Висота шару обкотишів, мм	H_2	245	392

Використовуючи представлену структурну схему (рис. 2, а), розроблена математична модель нечіткої логіки для керування процесом термічного оброблення сирих обкотишів в технологічній зоні СІ з використанням пакету математичного моделювання Matlab\Simulink. На рис. 2, б представлено модель системи з нечітким регулятором «Fuzzy Regulator».

На моделі представлені блоки, що задають вхідні параметри: швидкості конвеєрних візків, позначений як «Trolley Speed» із виходом V , висоти шару обкотишів – «Layer Height» із виходом H , температури теплоносія ГПП із зони ОП – «Air-Gas Flow Temperature» із виходом T , вологості обкотишів – «Pellets Moisture» із виходом P_{si} та основність сирих обкотишів – «Pellets Basicity» із виходом β . Кожен із цих блоків представлений встановленим середнім значенням інтервалу для кожного з параметрів і розкидом від цього інтервалу в межах заданих норм. «Display Block» – блок моделі, в якому виводяться значення отриманих вихідних параметрів температури шару T , вологості P_{si} та висоти шару обкотишів H у ЗСІ й які використовуються подалі у моделі ЗСІ. При розробці математичної моделі системи враховано, що при керуванні термічним процесом виготовлення обкотишів у ЗСІ об'єкт управління «Control Object» вибрано у вигляді типової аперіодичної ланки першого порядку, тому що будь-який процес, пов'язаний з температурними режимами, має інерційність. У якості головного регулюючого та керуючого пристрою використовується регулятор нечіткої логіки (РНЛ) «Fuzzy Regulator», який працює за заданими правилами нечіткої логіки за алгоритмом Мамдані, а не Сугено, так як структура регулятора з базою правил за алгоритмом Сугено буде мати більш складний вид, що потребує додаткових розрахунків, а значить і великих обчислювальних потужностей для даного роду завдання. Поверхні обліку правил і параметричних множин для температури теплоносія ГПП-температури верхнього шару-швидкості переміщення конвеєрних візків, температури теплоносія ГПП-температури верхнього шару-висота шару, температури теплоносія ГПП-температури верхнього шару-вологості обкотишів та температури ГПП-температури верхнього шару-

основності обкотишів представлені на рис 3, а-г, відповідно. Для визначення впливу температури теплоносія ГПП із ЗОП на вихідні функціональні залежності ЗСІ виконаємо моделювання при наступному розкиді значень температури теплоносія: мінімальному 100-200°C, середньому 300-350°C та максимальному 400-600°C.

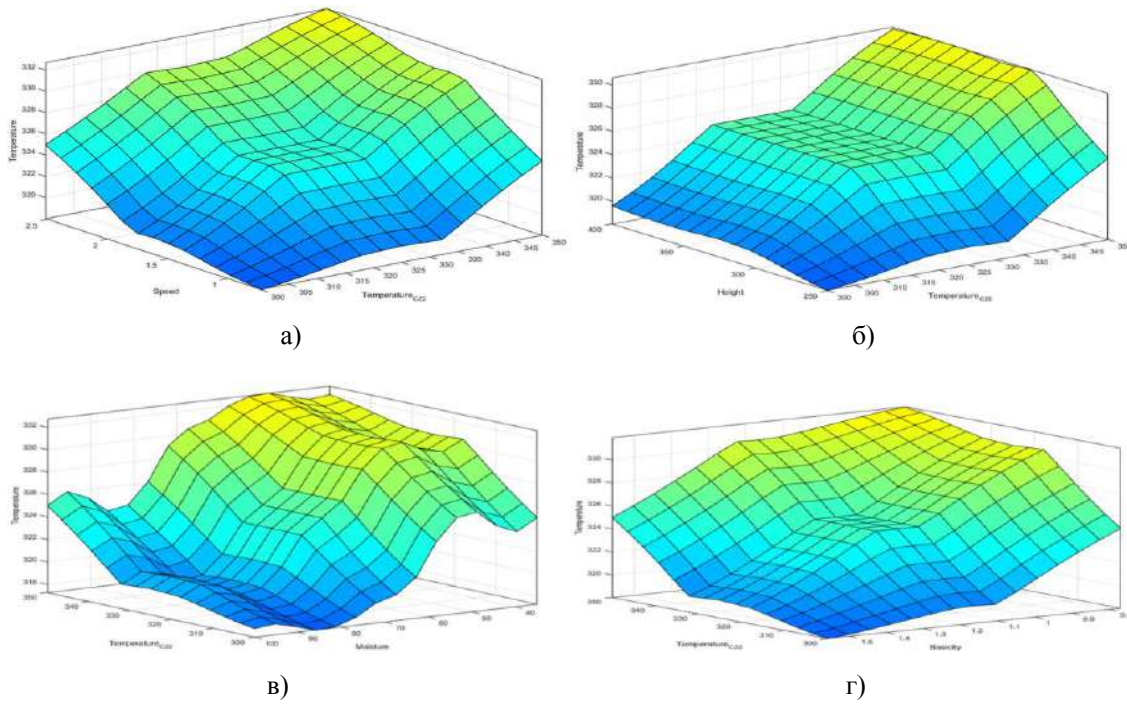


Рис. 3 – Поверхні синтезованого РНЛ ЗСІ

Результат моделювання наведено на рис. 4.

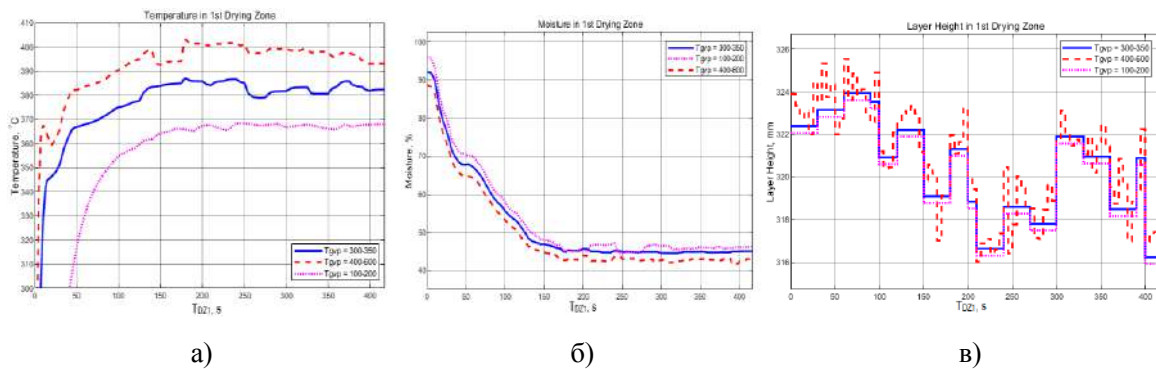


Рис. 4 – Результати моделювання при різних значеннях температури теплоносія ЗСІ (мінімальному 100-200°C; середньому 300-350°C; максимальному 400-600°C): а – для температури верхнього шару обкотишів; б – для вологості; в – для висоти шару обкотишів

На цьому графіку та на інших характеристичних зображеннях ЗСІ прийнято позначення щодо часового інтервалу T_{DZ1} – часовий інтервал у ЗСІ, що дорівнює 348 с.

Висновки

1. Визначено можливість впливу на розподіл параметрів газотеплоносійних потоків за технологічними зонами КВМ при управлінні димотягами у функції температури газотеплоносійних потоків, що відходять із технологічних зон випалювання і рекуперації. Як показали дослі-

дження, при зниженні температур газотеплоносійних потоків на виході із цих зон виникає необхідність управляти димотягами, змінюючи параметри цих потоків для зон сушіння і попереднього нагріву, стабілізуючи потрібний потік.

2. Проведено вдосконалення моделей технологічних зон сушіння, нагрівання, випалювання, рекуперації та охолодження КВМ за рахунок введення до їх структури РНЛ у якості головного керуючого та регулюючого пристрою. Це дозволило покращити показники управління основних функціональних залежностей – температури верхнього шару обкотишів та температури теплоносіїв ГПП.

3. Проведено аналіз адекватності запропонованих моделей з використанням експериментальних даних реальної КВМ ПівнГЗК типу ОК-306, котрий показав, що запропоновані моделі є адекватними.

Перелік використаних джерел:

1. Пирматов Д.С. Математическая модель тепловой обработки окатышей в обжиговой машине / Д.С. Пирматов // Сборник трудов всероссийской конференции : Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ-2010. – Воронеж, 2010. – С. 88-89.
2. Боковиков Б.А. Математическое моделирование динамики процесса обжига окатышей на конвейерной машине / Б.А. Боковиков, В.М. Малкин, М.И. Найдич // Metallургическая теплотехника. – 2002. – № 8. – С. 25-31.
3. Буткарев А.А. Исследование и совершенствование процесса управления термообработкой окатышей на обжиговых конвейерных машинах / А.А. Буткарев // Сталь. – 2011 – № 5. – С. 4-8.
4. Lobov V. Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine / V. Lobov, K. Lobova, M. Koltiar // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 4. – Pp. 22-29.
5. Neskromna M.V. Modeling of iron-ore pellet firing in a conveyor-type kiln at pelletizing plant / M.V. Neskromna // Widening our horizons. – 2016. – P. 42.
6. Кривонос В.А. Оптимизация режима термообработки окатышей в АСУ ТП конвейерной обжиговой машины / В.А. Кривонос, Д.С. Пирматов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 3. – С. 26-33.
7. Кривонос В.А. Математическая модель процесса обжига окатышей по зонам обжиговой машины для оптимизации режима / В.А. Кривонос, Д.С. Пирматов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – № 5. – С. 128-132.
8. Математическая модель процесса обжига рудугольных окатышей на конвейерной машине / В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко, Н.А. Спиринов, В.В. Лавров // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, № 4. – С. 328-335. – Режим доступа: DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-329-335.
9. Lobova K. Pellets Temperature distribution on a conveyor roasting machine / K. Lobova // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 8. – Pp. 12-15.
10. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей / В.М. Абзалов, В.А. Горбачев, С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн. – Екатеринбург : УрО РАН. – 2012. – 397 с.
11. A Study of the speed effect of moving sintering trolleys on the productivity of the conveyor machine / M. Nazarenko, N. Nazarenko, V. Lobov, L. Yefimenko, M. Tykhanskyi, K. Lobova, R. Gayduk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4, № 2 (88). – Pp. 42-51. – Mode of access: DOI: 10.15587/1729-4061.2017.107349.
12. Рубан С.А. Розробка принципів керування температурним режимом процесу випалювання котунів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей / С.А. Рубан, В.Й. Лобов // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2008. – № 1. – С. 69-74.
13. Кокорин Л.К. Производство окисленных окатышей / Л.К. Кокорин, С.Н. Лелеко. – Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы, 2005. – 280 с.
14. Будівельні машини та обладнання : підручник / О.М. Лівівський [та ін.]. – К. : Українська академія наук; «МП Леся», 2015. – 612 с.

15. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклеточного промежутка широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев [и др.] // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2009. – № 1. – С. 12-20.
16. Лобов В.Й. Дослідження термічної обробки шару обкотишів у газоповітряній камері обпалювальної машини конвеєрного типу / В.Й. Лобов, М.О. Котляр // Науковий вісник НГУ. – 2015. – № 3. – С. 131-136.
17. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств: монография : в 3 т. Т. 2, кн. 1. Новые способы, модельные и экспериментальные исследования / В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – 590 с.

References:

1. Pirmatov D.S. Matematicheskaya model' teplovoi obrabotki okatyshei v obzhigovoi mashine. *Sbornik trudov vserossiyskoy konferentsii «Novyye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proyektirovaniy, upravlenii, proizvodstve NT-2010»* [Mathematical model of heat treatment of pellets in a roasting machine. Proceedings of the All-Russian Conference: New Technologies in Scientific Research, Design, Management, Production of NT-2010]. Voronezh, 2010, pp. 88-89. (Rus.)
2. Bokovikov B.A, Malkin V.M., Naidich M.I. Matematicheskoye modelirovaniye dinamiki protsessa obzhiga okatyshey na konveyernoy mashine [Mathematical modeling of the dynamics of the pellet firing process on a conveyor machine]. *Metallurgicheskaya teplotekhnika – Metallurgical heat engineering*, 2002, no. 8, pp. 25-31. (Rus.)
3. Butkarev A.A. Issledovaniye i sovershenstvovaniye protsessa upravleniya termoobrabotkoy okatyshey na obzhigovykh konveyernykh mashinakh [Research and improvement of the control process for the heat treatment of pellets on firing conveyor machines]. *Stal' – Steel*, 2011, no. 5, pp. 4-8. (Rus.)
4. Lobov V., Lobova K., Koltiar M. Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 4, pp. 22-29.
5. Neskromna M.V. Modeling of iron-ore pellet firing in a conveyor-type kiln at pelletizing plant. *Widening our horizons*, 2016, pp. 42-47.
6. Krivonosov V.A., Pirmatov D.S. Optimizatsiya rezhima termoobrabotki okatyshey v ASU TP konveyer-noy obzhigovoy mashiny [Optimization of the mode of heat treatment of pellets in the automatic process control system of a conveyor roasting machine]. *Inzhenernyy vestnik Dona – Engineering Bulletin of the Don*, 2013, no. 3, pp. 26-33. (Rus.)
7. Krivonosov V.A., Pirmatov D.S. Matematicheskaya model' protsessa obzhiga okatyshey po zonam obzhigovoy mashiny dlya optimizatsii rezhima [A mathematical model of the pellet firing process in the zones of the firing machine to optimize the mode]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2010, no. 5, pp. 128-132. (Rus.)
8. Shvydki V.S., Yaroshenko Yu.G., Spirin N.A., Lavrov V.V. Matematicheskaya model' protsessa obzhiga rudougol'nykh okatyshey na konveyernoy mashine [A mathematical model of the process of firing ore-pellet pellets on a conveyor machine]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya – News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy*, 2017, vol. 60, no. 4, pp. 328-335. doi: 10.17073/0368-0797-2017-4-329-335. (Rus.)
9. Lobova K. Pellets temperature distribution on a conveyor roasting machine. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 8, pp. 12-15.
10. Abzalov V.M., Gorbachev V.A., Evstyugin S.N., Klein V.I. *Fiziko-khimicheskiye i teplotekhnicheskkiye osnovy proizvodstva zhelezorudnykh okatyshey* [Physicochemical and thermotechnical fundamentals of iron ore pellet production]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2012. 397 p. (Rus.)
11. Nazarenko M., Nazarenko N., Lobov V., Yefimenko L., Tykhanskyi M., Lobova K., Gayduk R. A Study of the speed effect of moving sintering trolleys on the productivity of the conveyor machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 4, no. 2 (88), pp. 42-51. doi: 10.15587/1729-4061.2017.107349.
12. Ruban SA, Lobov V.Y. Rozrobka pryntsyviv keruvannya temperaturnym rezhymom protsesu

- vypalyuvannya kotuniv z vykorystannyam prohnozuyuchykh ANFIS-modeley [Development of principles of temperature control of process of firing of coils using predictive ANFIS-models] *Radiotelektronika. Informatyka. Upravlinnya – Electronics. Computer Science. Management*, 2008, no. 1, pp. 69-74. (Ukr.)
13. Kokorin L.K., Leleko S.N. *Proizvodstvo oksislennykh okatyshey* [Production of Oxidized Pellets]. Ekaterinburg, Ural'skii tsentr PR i reklamy Publ., 2005. 280 p. (Rus.)
 14. Livivsky O.M. *Budivel'ni mashyny ta obladnannya* [Construction machinery and equipment]. Kyiv, Ukrainian Academy of Sciences, MP Lesya Publ., 2015. 612 p. (Ukr.)
 15. Karandaev A.S. Matematicheskoye modelirovaniye vzaimosvyazannykh elektromekhanicheskikh sistem mezhkletevogo promezhutka shirokopolosnogo stana goryachey prokatki [Mathematical modeling of interconnected electromechanical systems of the inter-span gap of a broadband hot rolling mill]. *Izv. vuzov. Elektromekhanika – News of universities. Electromechanics*, 2009, no. 1, pp. 12-20. (Rus.)
 16. Lobov V.Y., Kotlyar M.O. Doslidzhennya termichnoyi obrobky sharu obkotyshiv u hazopovitryaniy kameri obpalyval'noyi mashyny konveyernoho typu [Investigation of thermal treatment of the pellet layer in the gas chamber of the conveyor-type combustion engine]. *Naukovyy visnyk NHU – Scientific Bulletin of the NSU*, 2015, no 3, pp. 131-136. (Ukr.)
 17. Lisienko V.G. *Sovershenstvovaniye i povysheniye effektivnosti energotekhnologiy i proizvodstv: monografiya. Tom 2, kn. 1 kn.: Novye sposoby, model'nye i eksperimental'nye issledovaniia* [Improvement and increase of efficiency of energy technologies and production. Vol. 2, book 1: New ways, model and experimental studies]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2013. 590 p. (Rus.)

Рецензент: А.І. Купін
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «КНУ»

Стаття надійшла 10.10.2019

**МЕТРОЛОГІЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-
ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА**

UDC 62-405.6

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226192

© Allahverdiyeva Nurana Mahyaddin gizi*

**DETERMINATION AND DIAGNOSIS OF CONSTRUCTION MATERIAL
QUALITY CONTROL PROBLEMS**

The presented article discusses the problems of quality control of construction materials. As we know, the quality of construction materials is one of the most pressing issues at the moment. Quality control means checking whether the quality indicators of goods meet the requirements of the adopted technical normative documents (standards, specifications, etc.). Quality control – set of quality indicators of the material is to check compliance with the requirements. This article also studies analysis of recent research and publications, the effectiveness of quality control methods and structure of functional diagnostics of quality control system. One of the most important areas of quality control is the diagnosis of control problems. Diagnostics – the identification and study of features that characterize the condition of building, structures of buildings and structures in order to identify possible deviations and prevent violations of the normal mode of operation. There are two main types of diagnostics, functional and systematic diagnostics. The main directions of functional diagnostic are described in tabular form. The structure of concrete is also considered here. Execution of concrete structures is a complex process that includes various activities. The basic principle of the development and the application of quality control system during the execution of concrete structures is the process approach. Defining the processes, identification and interaction of sub-processes are performed with the objective of quality monitoring and control that are required in order to achieve concrete structures' specifications. Quality control system in the area of execution of concrete structures must also comply with national acts, rules, regulations and standards that are essential for concrete structures design, execution and concrete production. The analysis of specific compositions is presented in terms of diagnosing that structure.

Keywords: *quality control, functional diagnostics, systematic diagnostics, quality control assessment methods, construction materials, concrete structure.*

Аллахвердиева Нурана Махяддин кизи. Визначення та діагностика проблем контролю якості будівельних матеріалів. У представленій статті розглядаються проблеми контролю якості будівельних матеріалів. Як відомо, якість будівельних матеріалів на даний момент є однією з найактуальніших проблем. Під контролем якості розуміється перевірка відповідності показників якості товару вимогам прийнятих технічних нормативних документів (стандартів, технічних умов і ін.). Контроль якості – набір показників якості матеріалу для перевірки відповідності вимогам. У статті також проведений аналіз останніх досліджень і публікацій, проаналізована ефективність методів контролю якості та структура функціональної діагностики системи контролю якості. Одним з найбільш важливих напрямків контролю якості є діагностика проблем контролю. Діагностика – виявлення і вивчення ознак, що характеризують стан будівлі, конструкцій будівель і споруд з метою виявлення можливих відхилень і запобігання порушень нормального режиму експлуатації. Існує два основних типи діагностики: функціональна і систематич-

* applicant, Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan, nuru15@rambler.ru

на. Основні напрямки функціональної діагностики описані в табличній формі. Тут також розглядається структура бетону. Виконання бетонних конструкцій – це складний процес, що включає в себе різні види діяльності. Основним принципом розробки і застосування системи контролю якості при виконанні бетонних конструкцій є процесний підхід. Визначення процесів, ідентифікація і взаємодія підпроцесів виконуються з метою моніторингу і контролю якості, які необхідні для досягнення технічних характеристик конкретних конструкцій. Система контролю якості в галузі виробництва бетонних конструкцій також повинна відповідати національним законам, правилам, постановам і стандартам, які необхідні для проектування, виконання та виробництва бетонних конструкцій. Аналіз конкретних композицій представлений з точки зору діагностики цієї структури.

Ключові слова: контроль якості, функціональна діагностика, систематична діагностика, методи оцінки контролю якості, будівельні матеріали, бетонна конструкція.

Description of the problem. The problem of quality is especially relevant in the stages of development of the country's economy and especially in the construction industry [1]. The quality of construction products being a very large and complex concept depends on many factors such as the quality of the resources used, following the production technology, qualification of workers, etc. Product quality control means the determination of quality indicators, preparation, production and operation of the product through systematic control and purposeful influence on the factors affecting its quality [2]. According to ISO 9000:2015, quality is defined as «the degree to which internal characteristics meet a number of requirements» [3]. The quality of construction materials and products, the development of norms and standards, the design of the construction site, the construction and installation work, the preparation of construction materials, parts and structures are formed [4]. During the research, the requirements for high quality of construction materials and products in building complexes have been shown. Attention has been paid to the number of defects affecting the structural safety of the building and structures under construction. Poor quality of construction products is one of the main problems in the construction industry. There are several reasons for this situation in the construction market [5]. The effectiveness of quality control is ensured by the timely impact on the controlled entity in order to obtain the required results. The impact is due to the functional freedom of the control structure of the enterprise and the activity of the external environment and the interaction of information between the organization. Since quality control applies to all subsystems, it seeks to ensure that these systems are quality-oriented. The dynamics of economic development remains a key factor in ensuring the continuous improvement of production processes. In the mid-1960s, Japanese scientists systematizing number of quality management means have chosen, seven methods from them and called them «seven Japanese methods of quality control analysis of the production process» [6]. By means of these seven methods, applying mathematical statistics, a quantitative criterion of quality that can be achieved by the participants of the production process of all production cycles of the product has been analyzed.

The control process reflects the purpose of detecting certain data, deviations from the given parameters, the causes of these deviations and the analysis of their compliance with the new requirements after their elimination [7].

Analysis of recent research and publications. One of the most important areas of quality control is the diagnosis of control problems, i.e. the identification, recognition, evaluation and recording of existing problems of the quality control system. Diagnostics identifies existing faults in the control system and, as a result, allows make the most appropriate control decisions. In the diagnostic process, first of all, it is necessary to study the condition of the main control subsystems, data support, document flow, workflow, interaction and order to eliminate the identified violations. There are two main types of diagnostics in relevant sources:

- Functional diagnostics is used when there are obvious deficiencies in specialized functions, and some of them involve diagnostics.
- Systematic diagnostics involves continuous research of the technical and economic condition of the enterprise [8].

The main directions of functional diagnostics are as follows:

- production diagnostics;
- environmental diagnostics;
- diagnosis of financial functions;
- personnel diagnostics;
- innovation diagnostics;
- diagnostics of security functions [9].

The structure of functional diagnostics of quality control is presented in the following figure, its main components are described. All segments of diagnostics are interconnected. Each stage is a reporting point for the next stage. Thus, functional diagnostics is the study of the transition from one segment to another, which ensures the maximum detection of possible problems.

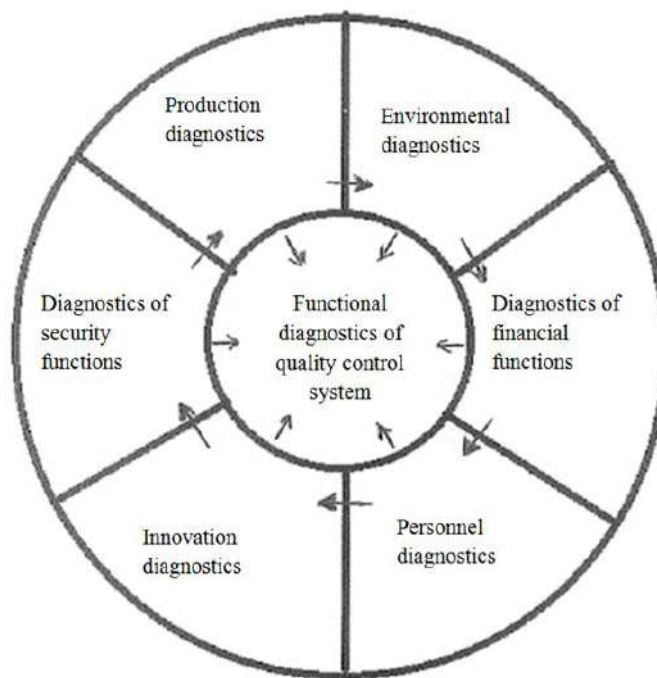


Figure – Structure of functional diagnostics of quality control system

Purpose of the article is identifying and analyzes the main problems of quality control, the quality of construction materials, the structure of the diagnostics of the quality management system have been offered, its main aspects have been considered.

Presentation of the main material. Unlike other areas, the construction sector has some differences, especially in the provision of resources. Security in construction is related to a particular object, its quality and nomenclature. In addition, many of the resources provided for in the projects are used as stockpiles as they enter the construction site. In general, the goal of quality control is the efficient use of material and technical resources and the implementation of strategic management decisions.

In this paper, the structure of concrete is reviewed, and the analysis of concrete components is presented from the viewpoint of diagnosing that structure. The diagnosis of a complex concrete structure entails the identification of concrete components – such as aggregate, paste, pores, etc. – and the estimation of concrete quality, existing damage, and possible causes of failures. The most effective methods for concrete diagnosis, such as microscopic image analysis, are briefly described. The importance of quantitative results of material analysis and image processing is highlighted. Let's discuss some quality control elements through concrete materials. For instance, aggregate is the most voluminous component of concrete, however, depending on the desired concrete properties, the mass of aggregate in concrete represents about 3.5 to 7.5 times the amount of cement used to bind it into a solid concrete composite. The quality of the aggregate and its chemical and mineralogical nature depend on its prior exposure to the environment and that during processing. These factors determine the micro-

structure of the aggregate [10]. Beside of aggregates, the water-to-cementitious-material or binder influences considerably the concrete strength, especially the total porosity of the concrete. It is assumed that approximately every additional percentage of pores corresponds to a 5 MPa decrease in the compressive strength [11]. Diagnosis of above parameters helps in the estimation of the concrete damage level and the prediction of the concrete's remaining service life.

In the diagnostic process, it is necessary to draw conclusions about the quality of performance of the function of providing resources for construction. These include the quality and uninterrupted supply of imported resources, the formation of volumetric reserves for the continuation of work, the provision of warehouse operations in accordance with all standards.

Human resources as the most important factor of production, reflect the resources of socio-economic development of the organization. All these parameters have a direct impact on the quality of construction work.

The following can be noted as diagnostic indicators of quality control in the context of personnel management:

- employee turnover ratio;
- average salary of an employee;
- average rank (category) of the employee;
- the share of consumption per employee for the repair of waste products;
- cost of professional development (education) per employee.

Systematic diagnostics of the enterprise, in its turn, allows to identify problem areas of quality control from the point of view of the team and employees, which is important for concentrations to ensure consistency in the priority of the problems, actions that will require linking financial investments, as well as finding solutions and efforts.

The diagnostic process should generally take into account the impact of external and internal environmental factors on quality. External factors, are competitors, pricing policy, demand, the state of the regional economy, etc. but internal factors, are resource supply, equipment quality, human resource professionalism, etc. Management of these factors within the organizational structure of the enterprise and within the boundaries of the quality control system is a key issue. By identifying the status of the identified factors in a timely manner and directing the work to the right source, it is possible to eliminate its negative effects and of course, its consequences.

In the field of quality control of construction materials, the following factors can be attributed to:

- level of human resources;
- level of organization of construction production in the field and technical-organizational training of construction production as a whole;
- quality of design estimates and progressive design decisions;
- quality of resources used - materials, structures and details;
- level of industrialization of construction;
- quality control system within the company;
- compliance of production technology and construction conditions.

Conclusions:

As a result, it is almost certainly that diagnostics of construction production and quality control of construction materials, is a tool that, provides the followings, if it is available and necessary:

- clarification of the main results of activities in the field of quality control of construction products;
- determination of the availability of advanced production technologies, the results of research and studies (patented inventions, industrial designs, etc.), the application of these studies and the organization of construction production;
- defining the goals and objectives of quality control management;
- in general, ensuring the efficient use of materials and human resources that ensure the quality characteristics of construction products;
- diagnosis of qualitative parameters is the most important issue in achieving its desired strength and durability of materials and it is tailored also in the estimation of the damage level and the prediction of the material's remaining service life.

References:

1. Drachev O.I., Zhilin A.A. *Statisticheskie metody upravleniia kachestvom* [Statistical quality management techniques]. Stary Oskol, TNT Publ., 2011. 148 p. (Rus.)
2. Kane M.M., Ivanov B.V., Koreshkov V.N. *Sistemy, metody i instrumenty menedzhmenta kachestva* [Quality management systems, methods and tools]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2008. 560 p. (Rus.)
3. Esetova A.M., Karibova I.Sh. Standarty kachestva kak faktor povysheniia konkurentosposobnosti stroitel'noi produktsii [Quality standards as a factor in increasing the competitiveness of construction products]. *Problemy sovremennoi ekonomiki – Problems of modern economics*, 2010, no. 1 (33) Available at: www.m-economy.ru/art.php?nArtId=2986 (accessed 03 February 2016). (Rus.)
4. Gumerov A.F., Skhirtladze A.G., Grechishnikov V.A. *Upravlenie kachestvom v mashinostroenii* [Quality management in mechanical engineering]. Stary Oskol, TNT Publ., 2011. 168 p. (Rus.)
5. *GOST R ISO 9000-2015. Sistema Menedzhmenta Kachestva. Osnovnye polozheniia i slovar'* [State Standart R ISO 9000-2015. Quality Management System. Fundamentals and vocabulary]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 69 p. (Rus.)
6. Dekach D.I. *Analiz proizvodstvenno-khoziaistvennoi deiatel'nosti podriadnykh stroitel'nykh organizatsii* [Analysis of production and economic activities of contractor construction organizations]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1999. 239 p. (Rus.)
7. Dorokhova A.V. Osnovnye problemy upravleniia kachestvom v stroitel'stve. *Materialy VI mezhdunar. stud. elektron. nauch. konf. «Studencheskii nauchnyi forum»* [The main problems of quality management in construction. Proceedings of VI-th Int. Stud. Sci. Conf. «Student Scientific Forum»]. Moscow, 2014. Available at: www.scienceforum.ru/2014/article/2014001648 (accessed 03 March 2016). (Rus.)
8. Glazov M.M. *Analiz i diagnostika finansovo-khoziaistvennoi deiatel'nosti predpriiatiia* [Analysis and diagnostics of the financial and economic activities of the enterprise]. Saint Petersburg, ООО «Andreevskii izdatel'skii dom» Publ., 2006. 448 p. (Rus.)
9. Chernyshev A.N. *Formirovanie kompleksnoi sistemy upravleniia kachestvom stroitel'noi produktsii*. Avtoref. diss. kand. techn. nauk [Formation of an integrated quality management system for construction products. Thesis of cand. tech. sci. diss.]. Rostov-on-Don, 2009. 24 p. (Rus.)
10. Skalny J., Marchand J., Odler I. *Sulfate Attack on Concrete*. CRC Press Publ., 2002. 232 p.
11. Brandt A.M., Jozwiak-Niedzwiedzka D. Diagnosis of Concrete Quality by Structural Analysis. *Advances in Civil Engineering Materials*, 2012, vol. 1 (1), pp. 1-21. doi: 10.1520/acem20120004.

Перелік використаних джерел:

1. Драчев О.И. Статистические методы управления качеством / О.И. Драчев, А.А. Жилин. – Старый Оскол : ТНТ, 2011. – 148 с.
2. Кане М.М. Системы, методы и инструменты менеджмента качества / М.М. Кане, Б.В. Иванов, В.Н. Корешков. – СПб. : Питер, 2008. – 560 с.
3. Эсетова А.М. Стандарты качества как фактор повышения конкурентоспособности строительной продукции [Электронный ресурс] / А.М. Эсетова, И.Ш. Карибова // Проблемы современной экономики. – 2010. – № 1 (33). – Режим доступа: <http://www.m-economy.ru/art.php?nArtId=2986> (дата обращения 03.02.2016).
4. Гумеров А.Ф. Управление качеством в машиностроении / А.Ф. Гумеров, А.Г. Схиртладзе, В.А. Гречишников. – Старый Оскол : ТНТ, 2011. – 168 с.
5. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Система Менеджмента Качества. Основные положения и словарь. – Введ. 2015-11-01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 69 с.
6. Декач Д.И. Анализ производственно-хозяйственной деятельности подрядных строительных организаций / Д.И. Декач. – М. : Финансы и статистика, 1999. – 239 с.
7. Дорохова А.В. Основные проблемы управления качеством в строительстве / А.В. Дорохова // Студенческий научный форум: VI междунар. студ. электрон. науч. конф. (15 февраля-31 марта 2014 г.; Москва). – Режим доступа: www.scienceforum.ru/2014/article/2014001648.
8. Глазов М.М. Анализ и диагностика финансово-хозяйственной деятельности предприятия / М.М. Глазов. – СПб. : ООО «Андреевский издательский дом», 2006. – 448 с.
9. Чернышев А.Н. Формирование комплексной системы управления качеством строительной

продукции : автореф. дис. ... канд. экон. наук. : 08.00.05 / Чернышев Анатолий Николаевич. – Ростов-на-Дону, 2009. – 24 с.

10. Skalny J. Sulfate Attack on Concrete / J. Skalny, J. Marchand, I. Odler. – CRC Press, 2002. – 232 p.
11. Brandt A.M. Diagnosis of Concrete Quality by Structural Analysis / A.M. Brandt, D. Jozwiak-Niedzwiedzka // Advances in Civil Engineering Materials. – 2012. – Vol. 1 (1). – Pp. 1-21. – Mode of access: [DOI: 10.1520/ACEM20120004](https://doi.org/10.1520/ACEM20120004).

Reviewer: S.F. Cafarov
PhD in Information measurement, associate professor,
Azerbaijan State Oil and Industry University

The article was admitted on 03.07.2020

БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 621.3:631.53.027.33

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226193

© Кунденко М.П.¹, Руденко А.Ю.²**АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ЗЕРНОВИХ ЗА КРИТЕРІЄМ ЕФЕКТИВНОСТІ**

Проаналізовано сучасні методи обробки зернової продукції за критерієм ефективності при зберіганні зернового матеріалу. Визначено основні переваги та недоліки хімічного, біологічного та електрофізичного методів обробки зернового матеріалу. Визначено, що перспективним напрямом розвитку знезараження та обробки зернових від шкідників є електрофізичний метод. Використання методу високої й надвисокої частоти опромінення дає високу ефективність дії проти шкідників, оскільки впливає на живі клітини шкідників, знищуючи їх зсередини. Немає протипоказань для людського організму і досягається поліпшення біологічних показників злаків, оскільки метод позитивно впливає на оброблене зерно та стимулює органели насінневої клітини при задоволенні сучасних потреб сільського господарства. Визначений один з основних недоліків обробки методом високої та надвисокої частоти опромінення.

Ключові слова: зберігання зерна, комірні шкідники, втрати зерна, обробка зерна, електромагнітне поле, ВЧ (висока частота), НВЧ (надвисока частота).

M.P. Kundenko, A.Yu. Rudenko. Analysis of modern methods of grain processing according to the efficiency criterion. Solving the problem of processing grain material during storage is a very important issue. After all, the issue of grain losses is a priority in the world; it being under the control of the Food and Agriculture Organization of the United Nations, and especially for the territory of Ukraine, as Ukraine is one of the largest exporters of grain in the world. Therefore, solving the problem of sound processing of grain products on retention of their varietal properties is a currently urgent problem. Based on the analysis of the existing scientific publications and research of modern methods of processing grain products according to the criterion of efficiency in storage of grain material, the advantages and disadvantages of chemical, biological and electrophysical methods of grain processing during storage have been considered. An alternative is to use extremely high frequency and ultra-high frequency method, which has advantages over the existing electrophysical, biological and chemical treatment methods. The use of the method of extremely high frequency and ultra-high frequency of irradiation is extremely efficient against pests, as it affects living cells by destroying them from inside. The method is not counter-indicative for the human body and the biological indicators of cereals have been improved, because the method has a positive effect on the processed grain by stimulating the organelles of the seed cell and satisfying the modern needs of agriculture. The article forms a table with the analyzed methods of seed treatment, which includes the advantages and disadvantages of each method. The data presented in the materials of the article can be used to effectively choose the method of processing depending on the conditions and subsequent use of grain.

¹ д-р техн. наук, професор, ХНТУСГ ім. П. Василенко «Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка», м. Харків, ORCID: 0000-0002-5841-4367, p.p.kundenko@ukr.net

² асистент, МНАУ «Миколаївський національний аграрний університет», м. Миколаїв, ORCID: 0000-0001-9000-6606, andrey0911r@gmail.com

Key words: grain storage, collar pests, grain losses, grain processing methods, electro-magnetic field, high frequency, ultrahigh frequency.

Постановка проблеми. Світове господарство стикнулося з головною проблемою зберігання зернових запасів. Щороку у світі при транспортуванні та зберіганні зерна, в залежності від оснащення та ефективності засобів для зберігання, втрати зернового матеріалу складають від 5 до 25%. За інформацією Продовольчої й сільськогосподарської організації Об'єднаних Націй (ФАО), в якій йдеться про щорічні втрати зернової продукції (рис. 1, а), такі втрати наближаються до 10% всього запасу виробленого зерна, а в нерозвинених країнах цифри наближаються до 30-50%.

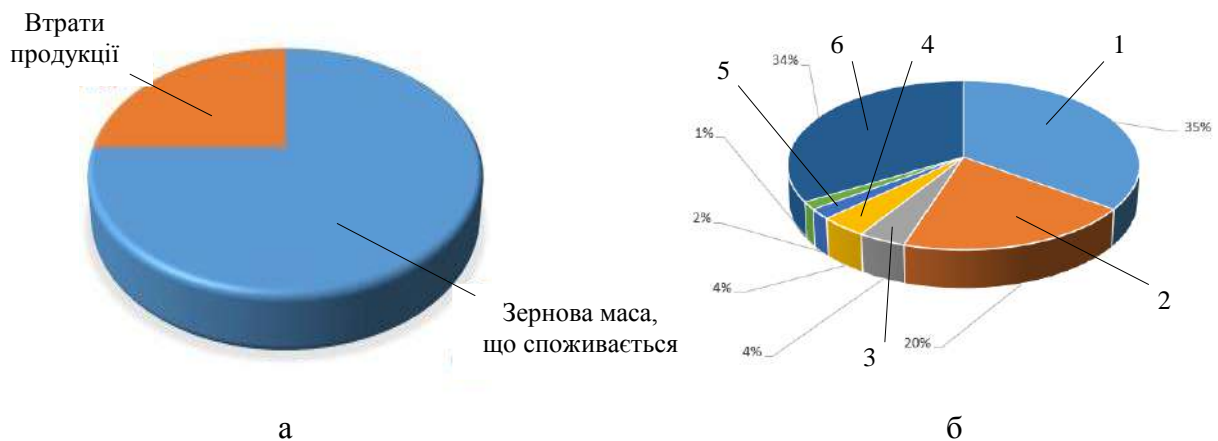


Рис. 1 – Щорічні втрати зернової маси (а) та процентне відношення втрат (б): 1 – комірні шкідники; 2 – транспортування; 3 – технологічні збитки; 4 – людський фактор; 5 – збирання врожаю; 6 – вологість

В Україні згідно з ФАО втрати зерна сягають 5 млн т хліба при 55-60 млн т/рік вирощеної продукції через нерозвинену матеріально-технічну базу зберігання та перероблювання. В інших розвинених державах, зокрема в Сполучених Штатах Америки, втрати зерна сягають 8 млн т при виробництві 600 млн т/рік, а в Євросоюзі (ЄС) вказані втрати становлять приблизно 8-9 млн т при виробництві 250-280 млн т/рік. Загалом втрати зерна супроводжуються зниженням якості зернової продукції.

Основною проблемою втрат зерна є порушення технології його зберігання. Після приблизно 2-5% втрат при транспортуванні при зберіганні втрачається 10-15% зібраного зерна, з яких складова втрат від комірних шкідників складає до 35% (рис. 1, б). При зберіганні без спеціальних заходів істотно знижуються харчові, фуражні та посівні якості зерна. За даними ФАО світові втрати хлібних запасів оцінюються до 10 млн т [1].

Загальна популяція комірних шкідників – понад 400 видів, з яких в Україні налічується, за даними національної академії аграрних наук України (НААНУ), 116 видів комірних шкідників. Серед них: кліщів – 34%, комах – 60% (жуків – 51, метеликів – 9), мишоподібних – 6%. Потенційну загрозу можуть становити також карантинні шкідники, які проникають на територію нашої країни [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найпоширенішими та найнебезпечнішими шкідниками зерна та зернової продукції в Україні є комірний і рисовий довгоносики, великий і малий хрущаки, гороховий і квасолевий зерноїд, зерновий точильник, рудий коротковусий і суринамський борошноїд, зернова міль, млинова та південна комірні вогнівки, борошняний кліщ, хатня миша, сірий та чорний пацюки [2].

За даними держконтролю сільськогосподарської продукції середнє пошкодження зерна від комірних шкідників минулого року в господарствах Степу складало, в середньому, 4,9%; в Кіровоградській, Дніпропетровській, Миколаївській, Херсонській областях відповідно: 6,5; 6,8; 6,6; 5%; в окремих районах Кіровоградської, Миколаївської, інших областях – 18-30%. В окре-

мих партіях з незахищених посівів було пошкоджено 27-60%. У Лісостепу в цілому цей показник – 3,2%, а зокрема в Київській та Харківській областях – 4,3% та 4,8% відповідно. Втрати зернової продукції відбулися через ігнорування своєчасного обробітку посівного матеріалу, через нерентабельність цього заходу в пригнічених умовами весняно-літньої посухи посівах саме в тих областях, де відбулося накопичення комірних шкідників. Це вплинуло на погіршення хлібопекарських якостей борошна зернових культур, яке спостерігалось у наведених вище регіонах. Нанесення пошкоджень дорослими особинами зерну в період вегетації призводить до погіршення якості зерна та насамперед призводить до зниження білкової частки (у цьому випадку мало шуплих зерен, видимі лише укуси комірних шкідників).

Установити шкідливість та втрати врожаю від пошкодження можливо такими методами: порівнянням урожаю пошкоджених і непошкоджених рослин; визначенням ненажерливості шкідника; моделюванням пошкоджень (штучне пошкодження) [3, 4].

Мета роботи – Проаналізувати сучасні методи обробки зернових за критерієм ефективності обробки у період зберігання.

Виклад основного матеріалу. Проведені дослідження впливу шкідників на зерно дозволяють стверджувати, що найнебезпечнішим шкідником є комахи. Однією з найбільших проблем останніх 10 років є зниження ефективності використання хімічних та біологічних засобів боротьби зі шкідниками [5].

При розгляді стану сучасної проблеми зберігання та передпосівної профілактики зернових культур впливає, що існує потреба в аналізі сучасних методів обробки зернової продукції. Методи розділяють за типом використання активного компонента: хімічні, біологічні та електрофізичні.

Застосування хімічних методів обробки зернових залишається одним з найбільш розповсюджених методів. Загально прийняте знезараження запасів проводиться стандартними препаратами. Загалом для вдалої обробки застосовують досить сильні концентрації діючих речовин. Обробка проводиться певними препаратами, котрі повинні відповідати безлічі факторів навколишнього середовища, які, в свою чергу, впливають на комбінацію речовин [6]. Внесення хімічних засобів захисту безпосередньо в ґрунт може обмежити можливості фермерських господарств у варіативності вирощування сільськогосподарських культур. Обробка посівного матеріалу перед висадкою або в момент висадки є не досить ефективною тому, що вона піддається температурним і іншим чинникам, що знижують ефективність дії речовин. Крім того, всі препарати мають негативний вплив на організм людини та навколишнє середовище, що веде до зменшення їх застосування або взагалі виключення з обігу.

Біологічні об'єкти виробляють імунітет до хімічних методів знезараження. Використання засобів хімічної дезінфекції зерна призводить до звикання вже через 20 поколінь, потім процес звикання тільки пришвидшується, доки пестициди взагалі не перестануть діяти. Однак популяції шкідливих організмів адаптуються повільно тільки до фосфорорганічних препаратів, до інших груп звикання проходить значно швидше, бо в комах виробляється перехресна стійкість до інших хімікатів.

Біологічні, зокрема ентофагічні методики, в якості експерименту впроваджуються лише в США. Ентомофаги – це паразити, які вбивають шкідників, використовуючи останніх як джерело живлення свого потомства. При цьому в ентомофагів є чудова якість – вони абсолютно індиферентно ставляться до сільськогосподарських рослин. Застосування ентомофагів повинно відповідати умовам відсутності протипоказань. Використання ентомофагів є допоки основним методом боротьби з комірними шкідниками [6, 7].

Іншим біологічним перспективним методом впливу на комірних шкідників є використання найпростіших. Але проти деяких видів вони не гарантують 100% результат. Використання бактерицидних препаратів веде до забезпечення біологічної ефективності зерносховища з кукурудзою до 90% та з пшеницею до 86%. Можливе збереження інфекції на строк не більше одного року [7].

Переваги біологічного методу, що заснований на використанні природних ворогів, які зменшують популяцію комірних шкідників: значно менша шкода навколишньому середовищу, можливість застосування для профілактики, зниження ймовірності втрати зерна при зберіганні, суттєве зниження забрудненості ґрунту шкідливими речовинами.

Одним з основних недоліків біологічного методу, що зупиняє темпи його застосування в сільському господарстві, є значна складність застосування, адже даний різновид захисту від шкідників вимагає досить поглиблених знань в певних галузях наук. Складності додає те, що задля використання даного методу знезараження зернової продукції потрібно чітко визначити вид, рід шкідника, методи поширення його популяції та правильно оцінювати загальні втрати. Додатковою проблемою використання біологічного методу обробки зерна сільськогосподарських культур є потреба використання не одного способу, а використання декількох способів, щоб збільшити ефективність дії на шкідників [6, 7].

Зростання вимог до якості зернової продукції та ціни на зернові культури спонукає світове господарство звернути більшу увагу на якість збереження та передпосівної обробки насінного матеріалу сільськогосподарських культур. Як сказано вище, хімічні та біологічні методи обробки мають досить важливі недоліки, що пов'язані зі способами їх застосування.

Більш доцільними для використання є електрофізичні методи обробки. Розповсюдження в зернових культурах комах-шкідників досягає 37% [7]. Тому виникає питання боротьби з ними за рахунок електрофізичних методів обробки зернових культур. При розгляді електрофізичних методів їх можна підрозділити за типами діючих впливів на оброблювану продукцію.

Передовому способу обробки зерна відповідає озонування. Взаємодія сполук озону комплексно впливає на складові живої клітин, пошкоджує її з середини та призводить до цілковитого знищення комах-шкідників зерна. Знезараження зерна даним методом покращує врожайність зернових на 10-16%, скорочує втрати від хвороб у 1,5-3 рази, зараженість грибами та найпростішими – на 70-80%. Основним недоліком названого методу є незбалансований розподіл озону в зерновому потоці, що в свою чергу не забезпечує повну проникність діючої речовини.

Альтернативним методом обробки зернової продукції є ультразвуковий метод. Обробка зерна ультразвуковим методом призводить до збільшення врожайності насіння та зменшує кількість комірних шкідників [8-10]. Перевагою даного методу є збільшення проростання та можливість обробки більшої кількості продукції [9]. Основним недоліком даного методу є велика ймовірність пошкодження ембріона зерна та руйнація оболонки. Задля запобігання нанесення пошкоджень зерновій масі потрібно ретельно слідкувати за часом обробки та потужністю ультразвукового поля. Ще одним недоліком є негативний вплив на людину.

Особливістю методу опромінення електромагнітним полем (ЕМП) високої частоти (ВЧ) та надвисокої частоти (НВЧ) є руйнівна дія на патогенну мікрофлору та комах-шкідників. При застосуванні випромінювання знезараження зернової маси досягається нагрівом НВЧ полем при 55-65°C та швидкістю $v = 0,6^\circ\text{C}/\text{c}$, а цілковите знезараження досягається при температурі 70-80°C. Опромінення проводиться за допомогою зміни параметрів часу та потужності потоку відповідно до біологічних особливостей організмів шкідників. Регулювання параметрів потоку збільшує якість знезараження зернової продукції. Згідно з [9] додатково після обробки даним методом досягається підвищення проростання та підвищення урожайності. Але метод опромінення ЕМП ВЧ та НВЧ має деякі недоліки, а саме застосування, зокрема виконання умови зволоження зернових культур для проведення обробки зерна та неможливість обробки за короткий час великих мас зернових культур.

На сучасному етапі методу електромагнітної обробки приділяється основна увага. Дана сфера альтернативних способів обробки зернових культур має досить великий спектр ще не до кінця досліджених характеристик випромінювання.

Додатково до ВЧ і НВЧ застосовується крайнє високочастотне (КВЧ) випромінювання, що надає можливість для подальших досліджень в сфері КВЧ та НВЧ випромінювань. Застосування КВЧ та НВЧ випромінювань у сільськогосподарському господарстві та інших галузях досить поширене. Проаналізувавши актуальні джерела інформації, де розкрито сутність впливу КВЧ випромінювання на живі організми та ефекти дії на організм, можна визначити, що присутні плюси та мінуси у їх застосуванні для рішення задачі знезараження. Вплив на живий організм випромінювання має багатоаспектний характер, при цьому контролюється досить погано. Регулювання зміни параметрів випромінювання змінює якість впливу на опромінений організм [11, 12].

Основним параметром, котрий впливає на якість опромінення, є частота. Були проведені дослідження, в яких змінюється частота від високої, що складає 27 Гц, до низької, 5 Гц. При цьому отримані показники життєздатності шкідників були зведені в діаграму (рис. 2).

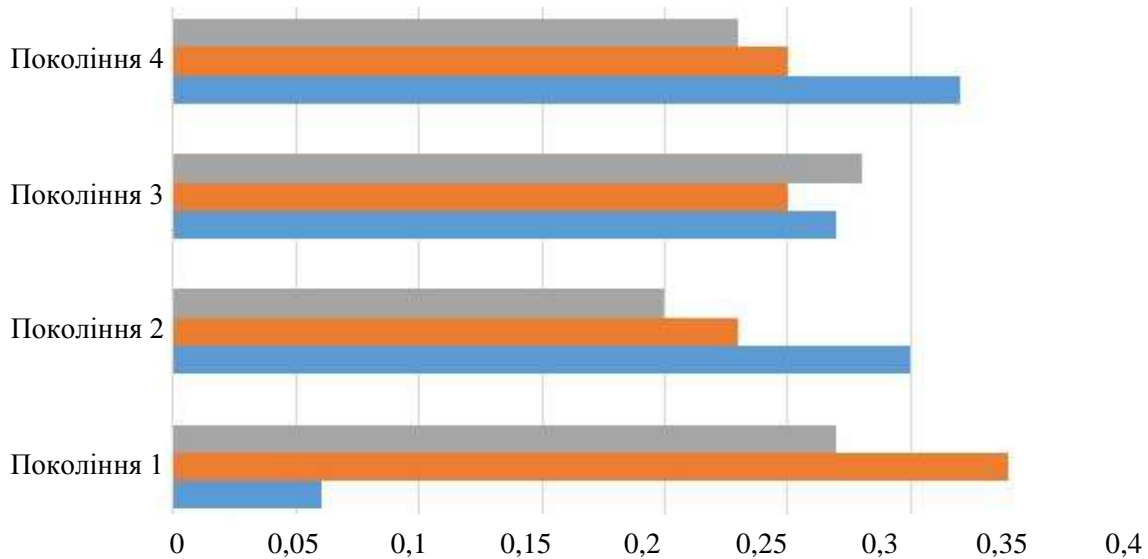


Рис. 2 – Смертність комірних шкідників при обробці електромагнітними полями низької та високої частот: ■ – контроль; ■ – низькочастотне поле; ■ – високочастотне поле

Дослідження й практичне підтвердження ефективності методу випромінювання [13], що проходили за участі А. Девяткова, С. Ситько, Є. Нефедова, Ф. Ізакова, Л. Кучина, показують, що процеси в біологічному об'єкті переплетені з певними фізичними параметрами. Основним параметром є діапазон хвиль ЕМП. Розглядаючи те, що інформаційним обміном є фізичний вплив взаємодії між біологічними об'єктами, можна припустити, що ЕМП передає інформацію. Слід розглянути гіпотезу, відносно до якої в клітині процес окиснення завершується не кислотою (АТФ), а утворенням високочастотного ЕМП та іонізуючого випромінювання. Відповідно вони і складають біополе живої клітини. Іонізуюче випромінювання виконує роль передавача енергії між ядрами атомів. Останні дослідження автентифікують можливість передачі генної інформації на електромагнітній основі. Активність генів проходить під впливом сигналів з цитоплазми та клітинного оточення. Вплив низькочастотного випромінювання пов'язують з його впливом на молекулярні зв'язки, адже вони не відзначаються надійністю. Дані помилки відіграють важливу роль при синтезі ДНК, так як ДНК складає генетичну інформацію клітини [14, 15]. Дія КВЧ випромінювання явно направлена на клітину і зв'язана на клітинному рівні з характеристиками поглинання. Характер поглинання виділяється тим, що між ядром та оболонкою клітини, які заряджені протилежно, знаходяться залізовмісні білки, що спроможні до прийому ЕМП. Випромінювання НВЧ діапазону сигналу діють на біопроцеси, що проходять на клітинному рівні. Розглядають КВЧ та НВЧ дії, що направлені на зміни мембранного потенціалу клітин на мембранах комах-шкідників. Надскладна система кровообігу постійно знаходиться в безупинному і рівномірному русі. Біологічні рідини організмів зі своїми елементами намагаються зберегти свої параметри. Зміна параметрів впливу НВЧ поля буде відбуватися зі збільшенням пропорцій клітини або в результаті взаємодії декількох клітин. Механізм взаємодії пояснюється тим, що іони, що оточують мембрани, досить слабо пов'язані з її поверхнею. За даними проаналізованих джерел виходить, що процеси передачі інформації з поверхні клітини до внутрішніх механізмів клітини спочатку поширюються по поверхні плазматичної мембрани, потім інформацію переносять по всім органелам клітини [15]. Інформаційне відображення вище наведеного огляду зведено до таблиці 1.

Розглядаючи електрофізичні властивості клітини, котрі характеризують тканинні клітини й елементи біологічних рідин, можливим є припущення, що електромагнітні поля зовнішнього

джерела впливу спричиняють на них безповоротну дію. Як наслідок впливу електромагнітного поля на живу клітину є зменшення ступеню зв'язку елементів та іонів у цитоплазматичній мембрані. Негативна дія електромагнітного випромінювання на комах є наслідком руйнації мембранних морфологічних складових біологічних рідин. Одним з показників такого впливу може бути порушення обміну іонами через мембрану. Електромагнітні поля можуть впливати на швидкість та рівновагу електричних зарядів на оболонці клітини.

Таблиця 1

Методи обробки зернових від комірних шкідників

Методи обробки	Спосіб обробки	Переваги	Недоліки
Хімічні	Волога дезінфекція	<ul style="list-style-type: none"> • Висока ефективність дії препаратів на шкідників; • надійний захист зернових запасів протягом тривалого часу. 	<ul style="list-style-type: none"> • Негативний вплив на біоту зерна, людину та ґрунт; • потрібний постійний контроль за дозуванням та особлива підготовка перед застосуванням для досягнення оптимальних результатів; • досить тривалий час після обробки зернової продукції, її не можливо використовувати для харчової переробки.
	Аерозольна дезінфекція		
	Газова дезінфекція (фумігація)		
Біологічні	Використання природніх ворогів	<ul style="list-style-type: none"> • Максимальний ефект за найменшої шкоди; • нешкідливі для людини та ґрунту; • можливість використання зернової продукції після. 	<ul style="list-style-type: none"> • Потреба додаткових досліджень роду шкідників та природніх впливів на них; • потреба використання комбінованої дії за для отримання максимального ефекту від методу; • зміна природнього балансу в екосистемі за рахунок введення нового організму.
	Використання найпростіших		
Електрофізичні	Обробка озоном	<ul style="list-style-type: none"> • Використання методу скорочує втрати від хвороб та зараженість грибками та найпростішими; • покращує врожайність зернових. 	<ul style="list-style-type: none"> • Процес ведення озону є основним недоліком, тому що його розміщення в зерновому потоці є нерівномірним. • неможливість обробки за короткий час великих мас зернових культур.
	Обробка ВЧ	<ul style="list-style-type: none"> • Висока ефективність дії методу за рахунок варіативності зміни факторів впливу на шкідників; • збільшує ефективність проростання зернової маси за рахунок стимуляції певних функцій зерна. 	<ul style="list-style-type: none"> • Умова зволоження зернових культур для проведення обробки зерна; • неможливість обробки за короткий час великих мас зернових культур.
	Обробка НВЧ	<ul style="list-style-type: none"> • Дана методика має широкий спектр застосування; • застосування методу КВЧ та НВЧ опромінення має високу ефективність дії проти шкідників, так як впливає на живі клітини, руйнуючи їх з середини; • методика обробки позитивно впливає на оброблюване зерно, стимулюючи органи клітини насіння. 	<ul style="list-style-type: none"> • Недостатньо вивчена методика обробки зернових, тому що не існує універсальних математичних моделей, що враховують всі складові явищ на клітинному рівні при обробці зернових від шкідників.
	Обробка КВЧ		
	Обробка ультразвуком	<ul style="list-style-type: none"> • Стимулює ембріон зернини; • даний метод електрофізичної обробки зерна впливає на якість зернової продукції та схожість зерна при посіві. 	<ul style="list-style-type: none"> • Велика ймовірність травмування зернової продукції за рахунок травмування ембріона в наслідок невідповідності показників змінних часу та частоти.

Висновки

1. З аналізу джерел можна прийти до висновку, що поки не існує універсальних моделей, які враховують всі складові явищ, що діють на клітинному рівні під час впливу на тканини та біологічні рідини.

2. Застосування інноваційних методів обробки зернової продукції являється актуальним напрямком досліджень. Найбільш перспективним, оптимальним та інноваційним є польовий метод обробки зернової продукції від комірних шкідників на основі застосування випромінювання КВЧ та НВЧ.

3. Метод КВЧ та НВЧ опромінення має переваги над кожним з вище вказаних методів і має широкий діапазон використання: немає протипоказань для людського організму та покращуються біологічні показники зернових культур (зберігання та пророщення), що задовольняє сучасним потребам сільського господарства.

Перелік використаних джерел:

1. Рибалко О.І. Якість пшениці врожаю-2008 / О.І. Рибалко // Хранение и переработка зерна. – 2008. – № 8. – С. 33.
2. Особливості збирання та зберігання врожаю ранніх зернових і технічних культур в умовах 2020 року : науково-практичні рекомендації / І.М. Семеняка [та ін.]. – Кропивницький, 2020. – 40 с. – Режим доступу: <http://apk.kr-admin.gov.ua/doc/0124062020.pdf>.
3. Орлова О. Шкідники у коморі [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://agravery.com/uk/posts/show/skidniki-u-komori-poradi-vid-derzprodspoizsluzbi>.
4. Хмельницький К.В. Шкідник клоп-черепашка [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <http://www.nibulon.com/r/files/1082;1083;1086;1087;1095;1077;1088;1077;1087;1072;1096;1082;1072;.pdf>.
5. Соколов Е.А. Биометод в борьбе с вредителями запасов карантинного значения / Е.А. Соколов // Защита и карантин растений. – 2010. – № 8. – С. 36-37.
6. Brower J.H. Trichogramma: potencial new biological control method for stored product Lepidoptera / J.H. Brower // Proceedings of the International Working Conference on Stored-Product Entomology. – 1987. – С. 23-27.
7. Вплив ультразвукового випромінювання на ріст зернових культур / В.М. Мельник, Л.І. Ружинська, С.В. Фесенко, В.В. Ільєнко // Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». – 2018. – № 20. – С. 11-20.
8. Risca I.M. Ultrasound effects contributions on the Norway spruce seeds germination (*Picea abies* (L.) Karsten) / I.M. Risca, L. Fartais, P. Stiuca // Analele Științifice ale Universității «Alexandru Ioan Cuza». – 2007. – Tom VIII. – Pp. 87-88. – (Secțiunea Genetică și Biologie Moleculară).
9. Kai Ying Chiu. Use of ultrasonication to enhance pea seed germination and microbial quality of pea sprouts / Kai Ying Chiu, Jih Min Sung // International Journal of Food Science & Technology. – 2013. – № 49 (7). – Pp. 1699-1706. – Mode of access: DOI: [10.1111/ijfs.12476](https://doi.org/10.1111/ijfs.12476).
10. Nazari M. Medicago scutellata seed dormancy breaking by ultrasonic waves / M. Nazari, A. Sharififar, H.R. Asghari // Plant Breeding and Seed Science. – 2015. – № 69 (1). – Pp. 15-24. – Mode of access: DOI: [10.1515/plass-2015-0002](https://doi.org/10.1515/plass-2015-0002).
11. Influence of the microwave radiation of different polarization state on transinactivation effect and viability of *Drosophila* / Y.G. Shkhorbatov [et al.] // IV International Conference on Antenna Theory and Techniques. – Sevastopol, 2003. – Pp. 823-824. – Mode of access: DOI: [10.1109/ICATT.2003.1238879](https://doi.org/10.1109/ICATT.2003.1238879).
12. Васильева Е.Г. Влияние высоко- и низкочастотного электромагнитных полей на насекомых (на примере *drosophila melanogaster*) / Е.Г. Васильева // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2008. – № 3. – С. 182-185.
13. Арсланов Т.А. Оценка эффективности неионизирующего излучения крайне высоких частот на уровне некоторых биологических характеристик *drosophila melanogaster* : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.01 / Арсланов Тимур Альтафович. – Обнинск, 2004. – 24 с.

14. Влияние генотипа на приспособленность дрозофилы при воздействии малых доз высокочастотного электромагнитного излучения / О.Г. Горенская, А.Б. Гаврилова, Ю.Г. Шкорбатов, В.А. Катрич // Вісник проблем біології і медицини. – 2010. – № 1. – С. 52-56.
15. Туровський А.О. Пристрої формування електромагнітного НВЧ-поля опромінення діелектричних сипучих матеріалів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.12.13 / Туровський Анатолій Олександрович. – Київ, 2015. – 27 с.

References:

1. Rybalko O.I. Yakist pshenytsi vrozhaiu-2008 [Quality of wheat harvest-2008]. *Khranenyє y pere-rabotka zerna – Storage and processing of grain*, 2008, no. 8, pp. 33. (Ukr.)
2. Semeniaka I.M., Haidenko O.M., Mashchenko Yu.V. *Osoblyvosti zbyrannia ta zberihannia vrozhaiu rannikh zernovykh i tekhnichnykh kultur v umovakh 2020 roku* [Personality of beating and storage of early grain and industrial crops in 2020]. Kropyvnytskyi, 2020. 40 p. Available at: <http://apk.kr-admin.gov.ua/doc/0124062020.pdf> (accessed 10 October 2020). (Ukr.)
3. Orlova O. *Shkidnyky u komori: porady vid Derzhprodspozhyvsluzhby Dzherelo* (Pests in the pantry: advice from the State Food and Consumer Services Source) Available at: <https://agravery.com/uk/posts/show/skidniki-u-komori-poradi-vid-derzprodspozivsluzbi> (accessed 10 October 2020). (Rus.)
4. Khmelnytskyi K.V. *Shkidnyk klop-cherepashka* (Pest bedbug-turtle) Available at: <http://www.nibulon.com/r/files/1082;1083;1086;1087;1095;1077;1088;1077;1087;1072;1096;1082;1072;.pdf> (accessed 20 September 2020). (Rus.)
5. Sokolov E. A. *Byometod v borbe s vredyteliamy zapasov karantynnoho znachenia* [Biological method in pest control of stocks of quarantine value]. *Zashchyta y karantyn rastenyi – Plant protection and quarantine*, 2010, no. 8, pp. 36-37. (Rus.)
6. Brower J.H. Trichogramma: potencial new biological control method for stored product Lepidoptera. *Proceedings of the International Working Conference on Stored-Product Entomology*, 1987, pp. 23-27.
7. Melnyk V.M., Ruzhynska L.I., Fesenko S.V., Ilienکو V.V. *Vplyv ultrazvukovoho vyprominiuvannia na rist zernovykh kultur* [Influence of ultrasonic radiation on grain growth]. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal «Internauka» – International Science Journal «Internauka»*, 2018, no. 20, pp. 11-23. (Ukr.)
8. Risca I.M., Fartais L., Stiucu P. *Ultrasound effects contributions on the Norway spruce seeds germination (Picea abies (L.) Karsten)*. *Analele Ştiinţifice ale Universităţii «Alexandru Ioan Cuza». Secţiunea Genetică şi Biologie Moleculară*, 2007, Tom VIII, pp. 87-88.
9. Kai Ying Chiu, Jih Min Sung. Use of ultrasonication to enhance pea seed germination and microbial quality of pea sprouts. *International Journal of Food Science & Technology*, 2013, no. 49 (7), pp. 1699-1706. doi: 10.1111/ijfs.12476.
10. Nazari M., Sharififar A., Asghari H.R. *Medicago scutellata* seed dormancy breaking by ultrasonic waves. *Plant Breeding and Seed Science*, 2015, no. 69 (1), 2015, pp. 15-24. doi: 10.1515/plass-2015-0002.
11. Shkorbatov Y.G., Evseeva M.V., Shakhbazov V.G., Popov A.I., Cheshko T.M., Grabina V.A., Fisun A.I., Belous O.I. Influence of the microwave radiation of different polarization state on transinactivation effect and viability of *Drosophila*. *IV International Conference on Antenna Theory and Techniques*, Sevastopol, 2003, pp. 823-824. doi: 10.1109/icatt.2003.1238879.
12. Vasyleva E.H. *Vlyanye vysoko- y nyzkochastotnoho elektromahnytnykh polei na nasekomykh (na prymere drosophila melanogaster)* [Influence of high and low-frequency electromagnetic fields on insects (on the example of *drosophila melanogaster*)]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Astrakhan State Technical University*, 2008, no. 3, pp. 182-185. (Rus.)
13. Arslanov T.A. *Otsenka effektivnosti neioniziruiushchego izlucheniia kraine vysokikh chastot na urovne nekotorykh biologicheskikh kharakteristik drosophila melanogaster*. Avtoref. diss kand. biol. nauk [Evaluation of efficiency of non-ionizing extremely high frequency radiation at the level of some biological characteristics of *drosophila melanogaster*. Thesis cand. biol. sci. diss]. Obninsk, 2004. 24 p. (Rus.)

14. Horenskaia O.H., Havrylova A.B., Shkorbatov Yu.H., Katrych V.A. Vliianie genotipa na prisposoblenost' drozofily pri vozdeistvii malykh doz vyso-kochastotnogo elektromagnitnogo izlucheniia [Influence of genotype on Drosophila adaptation under the influence of small doses of high-frequency electromagnetic radiation]. *Visnyk problem biolohii i medytsyny – Bulletin of problems of biology and medicine*, 2010, no. 1, pp. 52-56.
15. Turovskiy A.O. *Prystroji formuvannia elektromahnitnoho nvch-polia oprominennia dielektrych-nykh sypuchykh materialiv*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Devices for formation of electromagnetic microwave field irradiation of dielectric bulk materials. Thesis cand. tech. sci. diss.]. Kyiv, 2015. 27 p. (Ukr.)

Рецензент: Л.В. Вахоніна
канд. фіз.-мат. наук, доц., МНАУ

Стаття надійшла 02.10.2020

ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 621.671: 62-762.6:504.5

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226199

© Шевченко О.С.¹, Шевченко С.С.²

ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ УЩІЛЬНЕНЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ НАСОСІВ АЕС

Вузол ущільнення є складною системою, від якої багато в чому залежать надійність, безпека і довговічність насосного агрегату. Проведено аналіз існуючих конструкцій вузлів ущільнення насосів атомних електростанцій, який показав, що найбільшого поширення набули гідростатичні і механічні торцові ущільнення з поліпшеними умовами змащення. Найбільш перспективним є гідростатичне ущільнення з імпульсним урівноваженням аксіально рухомого кільця, яке при обертанні вала забезпечує безконтактну роботу з малими витокками, а при стоянці – повну герметичність. Побудована модель і методика розрахунку імпульсного торцового ущільнення як системи автоматичного регулювання торцового зазору і протікання, яка дозволяє виявити небезпечні області частот обертання і підібрати параметри ущільнення так, щоб амплітуди вимушених осьових коливань кільця не виходили за допустимі межі. Наведені приклади промислового застосування ущільнюючих систем, створених на основі імпульсних ущільнень, які забезпечують необхідну герметичність, надійність і екологічну безпеку в екстремальних умовах, характерних для насосного обладнання АЕС.

Ключові слова: вузол ущільнення, імпульсне ущільнення, модель, екологічна безпека.

O.S. Shevchenko, S.S. Shevchenko. Ways to improve seals to increase operational safety of NPP pumps. The sealing unit is a complex system, on which reliability, safety and durability of the pump unit is largely depend. An analysis of the existing designs of sealing units for nuclear power plants (NPP) pumps was carried out, which showed that the most widespread were hydrostatic and mechanical face seals with improved lubrication conditions. Hydrostatic seals are used as main seals for throttling high pressure. Mechanical face seals, due to their low leakage, are mainly used as closing seals. The most promising areas of sealing units design for NPP pumps have been identified. It has been determined that when choosing a seal design, it is necessary to take into account not only their direct function, that is to reduce leakages, but to provide the necessary vibration characteristics of the pump as well, it being their equally important function. The most promising is the hydrostatic seal with impulse balancing of the axially movable ring, which, when the shaft rotates, provides contactless operation with low leakage, and when stationary, it provides complete tightness. A unified approach to its computation has been developed, which is reduced to the plotting of static characteristics, that is, the dependence of the gap and flow rate on external influences, and the determination of the coefficients of static and dynamic stiffness. This makes it possible to identify dangerous ranges of rotation speeds and select the parameters of the seal so that the forced axial vibrations amplitudes of the ring should not go beyond the permissible limits. Some examples of industrial application of sealing systems based on impulse seals, that provide the necessary tightness, reliability and environmental safety in extreme conditions typical for NPP

¹ аспірант, Сумський державний університет, м. Суми, o.shevchenko@ecolog.sumdu.edu.ua

² канд. техн. наук, докторант, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, м. Київ, s.shevchenko@united productions

pumping equipment, have been given.

Keywords: *seal assembly, impulse seal, model, environmental safety.*

Постановка проблеми. Від вузла ущільнення вала – відповідального елемента насоса – багато в чому залежать надійність, безпека і довговічність насосного агрегата, тому створення надійних ущільнювальних систем служить предметом постійних зусиль провідних насособудівних фірм. Більшість вимушених зупинок насосів атомних електростанцій відбувається через вихід з ладу ущільнень вала. Вузол ущільнення є складною системою, що складається з внутрішнього, головного, замикаючого і аварійного ущільнень. Оскільки кожне з них виконує певну функцію і працює в різних умовах, то вузол є синтезом декількох типів ущільнень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел показав, що торцеві ущільнення широко застосовуються в насосах атомних електростанцій, в тому числі в головних циркуляційних, поживних, аварійних і спринклерних насосах першого контуру. У другому контурі АЕС використовуються насоси, що не відрізняються від застосовуваних на звичайних електростанціях. Однак до насосів систем охолодження і безпеки, що перекачують радіоактивні середовища, висувають вимоги, частина яких здійснюється лише з використанням спеціальних конструкцій. Виняткові і вимоги до них щодо умов роботи і безпеки [1]. Більшість аварійних відключень на атомних електростанціях пов'язано перш за все з проблемами герметизації, тому до торцевих ущільнень пред'являються особливі вимоги щодо конструкції, матеріалів і технології, що гарантують їх властивості. У ряді робіт описуються конструкції безконтактних торцевих ущільнень [2, 3], принцип роботи [4], методики розрахунку і експериментальних досліджень безконтактних торцевих ущільнень з динамічними канавками [5]. У таких конструкціях ущільнювальні пояски розвантажені і працюють з невеликим зазором в режимах тертя, близьких до рідинного. До них відносяться гідродинамічні і термогідродинамічні ущільнення. Принцип роботи термогідродинамічних ущільнень ґрунтується на використанні деформації кілець під дією термічних напружень в зоні контакту. В роботі [6] запропоновано конструкцію термогідродинамічного ущільнення, в якій на поверхні одного з кілець виконуються серпоподібні канавки, що сприяють утворенню мікрокліну за рахунок різниці температур, що утворюються внаслідок нерівномірного охолодження робочої поверхні кільця в окружному напрямку. У зоні мікрокліну при обертанні виникають додаткові підйомні сили, що дозволяють значно зменшити контактний тиск на робочих поверхнях і коефіцієнт тертя. Перевага цих ущільнень полягає в тому, що зі зростанням швидкості ковзання і перепаду тиску різниця температур між окремими ділянками робочої поверхні зростає. Під дією високих термічних напруг і викликаних ними деформацій розширюються зони, які займає мікроклін [7].

При високих перепадах тиску і швидкостях обертання, коли потрібен великий ресурс і допускаються незначні витоки, все ширше застосовуються ущільнення з безперервною рідиною плівкою. До них відносяться гідростатичні ущільнення, що складаються з тих же елементів, що і звичайні торцеві ущільнення [8]. При створенні гарантованого зазору між поверхнями ущільнювальних кілець в гідростатичних ущільненнях виток майже не залежить від відносного обертання кілець ущільнення, а визначається перепадом тиску. Тому під час стоянки виток залишається таким же, як і при роботі насоса. Для ущільнення валу при зупинці насоса доводиться встановлювати послідовно з основним додаткові стоянкові ущільнення, що ускладнює і здорожує конструкцію, її експлуатацію і ремонт. Для безконтактної роботи гідростатичні ущільнення вимагають певного перепаду тиску, при якому утворюється гарантований осьовий зазор. В іншому випадку кільця знаходяться в контакт і схильні до зносу під час роботи. У звичайних торцевих ущільненнях потужність тертя пропорційна ущільнюваному тиску і окружній швидкості, тому їх працездатність зберігається лише у вузькому, розрахунковому діапазоні робочих параметрів – ущільнюваного тиску і частоти обертання [9]. У конструкціях гідростатичних і гідродинамічних безконтактних торцевих ущільнень сила тиску замикаючого середовища сприймається аксіально-рухомим кільцем. При збільшенні тиску замикаючого середовища зазор збільшується [10, 11]. Імпульсні торцеві ущільнення позбавлені перелічених недоліків [12, 13]. Ущільнюючі системи, створені на основі імпульсних ущільнень, забезпечують необхідну герметичність, надійність і екологічну безпеку в екстремальних умовах експлуатації, характерних для насосного обладнання АЕС.

Мета статті – на основі аналізу існуючих конструкцій ущільнювальних вузлів насосів атомних електростанцій визначити найбільш перспективні напрямки проектування ущільнень, що забезпечують герметичність і екологічну безпеку роботи насосного обладнання АЕС.

Виклад основного матеріалу. Створення ущільнень валу для насосів АЕС є складним технічним завданням. Питання створення ущільнюючих систем, що мають високу надійність, герметичність і великий ресурс роботи, залишається до кінця не вирішеним. В основі проведених робіт лежить виявлення найбільш перспективних напрямків проектування ущільнюючих вузлів насосів АЕС на основі аналізу існуючих конструкцій і побудова моделі і схеми розрахунку ущільнення з саморегульованим зазором, як системи автоматичного регулювання. При виборі конструкції ущільнень потрібно враховувати не тільки їх пряме призначення – зменшувати об’ємні втрати, але і не менш важливу їх функцію – забезпечувати необхідні вібраційні характеристики насоса.

Розглянемо деякі результати, досягнуті в цьому напрямку стосовно ущільнень роторів насосів атомних електростанцій.

Огляд існуючих конструкцій. Блокова конструкція торцевого ущільнення типу Т представлена на рис. 1. Пару тертя утворюють два однакових кільця 8 із силіцированого графіту, вільно встановлені в аксіально рухомому обойму 6 і обойму, що обертається 9. Від провороту кільця утримуються поводками 7 і ущільнюються гумовими кільцями 5. Аксіально рухома обойма з пружинами 2 встановлена в корпусі 3 ущільнення і зафіксована від провороту гвинтами 13. Обойма, що обертається, пружинною шайбою 11 кріпиться на перехідній втулці 12 і утримується від відносного провороту поводком 10. Монтажна скоба 1 разом з перехідною втулкою забезпечують блочність конструкції вузла ущільнення. В якості вторинних ущільнень 4 використовуються гумові кільця круглого перетину.

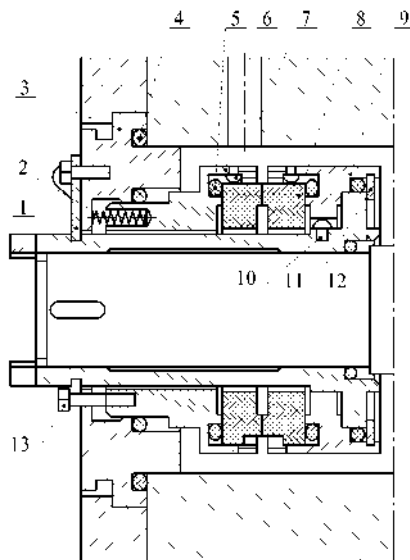


Рис. 1 – Механичне торцеве ущільнення типу Т

Конструкція обойми (коефіцієнт навантаження аксіально рухомої обойми 0,7) і спосіб установки кілець забезпечують їх мінімальні деформації. Середній діаметр ущільнюючих пасків від 75 до 120 мм, тиск ущільнюваної рідини до 6 МПа, окружна швидкість до 25 м/с.

Ущільнення використовуються в головних (ПЕА 1650-80) і резервних (ПЕА 250-80) поживних насосах енергоблоків АЕС, в конденсатних насосах КсВА 700-180 і КсВА 650-135, в насосах розхолодження, спринклерних та інших насосах з частотою обертання ротора до 3000 об/хв.

На рис. 2 показаний вузол кінцевого торцевого ущільнення головного циркуляційного насоса (ГЦН) реактора водо-водяного типу.

Фірма KSB застосовує в циркуляційних насосах на повний перепад тиску 9,5 МПа здвоєні термогідродинамічні ущільнення 1 і 2 (рис. 3), між якими тиск ділиться навпіл за допомогою дроселів 3 і 5 при організованих витоках через них 0,5 м³/год. Третя ступінь 4 ущільнення

аварійна і є торцевим ущільненням, яке в нормальних умовах за допомогою пружин залишається відкритим. При виході з ладу ступені 2, а отже, зі збільшення зовнішніх витоків через неї, аварійне ущільнення під дією виниклого перепаду тиску закривається і забезпечує необхідну герметичність всього вузла як при вибігу насоса, так і при його зупинці.

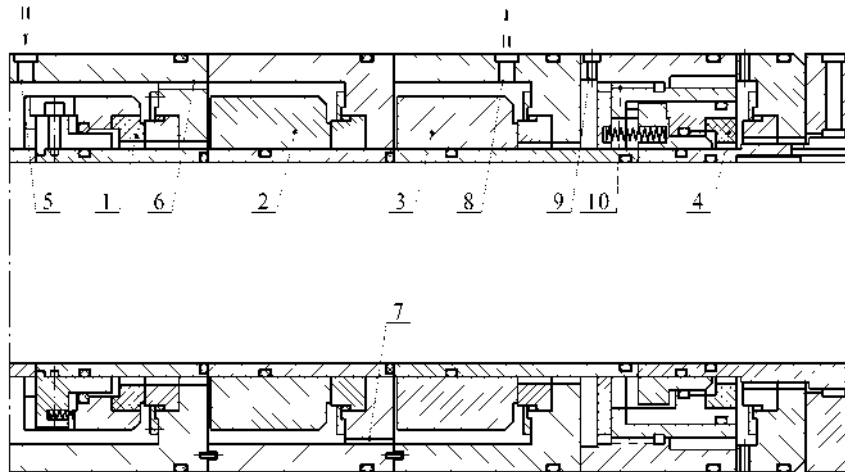


Рис. 2 – Блок вузлів торцевого ущільнення головного циркуляційного насоса для реактора водоводяного типу: 1, 2, 3 – перший, другий і третій ступень торцевих ущільнень; 4 – аварійний ступень, що спрацьовує при зворотному гідроударі; 5 – вхід замикаючої води; 6, 7 – перший і другий дросельні пристрої; 8 – вихід замикаючої води; 9 – дренаж витоків; 10 – дросельний пристрій аварійного ступеня

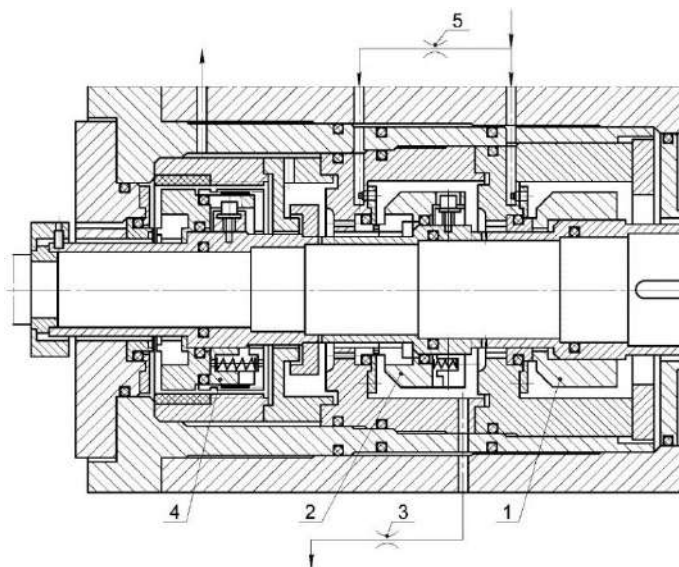


Рис. 3 – Комбіноване ущільнення вала ГЦН АЕС

Постійне вдосконалення конструкцій термогідродинамічних ущільнень дозволило останнім часом в деяких циркуляційних насосах використовувати комбіновані вузли ущільнень, в яких остання і передостання ступені термогідродинамічні. Такий вузол ущільнення застосовано в ГЦН фірми KSB для реактора ВВЕР потужністю 1300 МВт АЕС [14].

Модель і схема розрахунку саморегульованого ущільнення. Імпульсні торцеві ущільнення як альтернатива механічним і гідростатичним торцевим ущільненням з'явилися в процесі створення ущільнень роторів головних циркуляційних насосів АЕС [1].

Найпростіша конструкція одноступінчастого імпульсного ущільнення (рис. 4) відрізняється від механічного торцевого ущільнення тим, що на торцевій поверхні аксіально-

рухомого кільця 1 розташовані замкнуті камери 2, а на опорному кільці 6, що обертається, зроблено кілька радіальних каналів-живильників 5, відкритих в сторону ущільнюваної порожнини. Через ці канали ущільнюване середовище під тиском p_1 впорскується в камери за ті короткі проміжки часу $t_c = \beta_c / \omega$, протягом яких канали 5 проходять повз камери 2. В ці моменти тиск p_2 в камерах стрибкоподібно підвищується до величини $p_{2\max} = p_1$ за вирахуванням інерційного напору $p_* = 0,5\rho(r_3^2 - r_2^2)\omega^2$, що виникає в обертових радіальних каналах – живильниках.

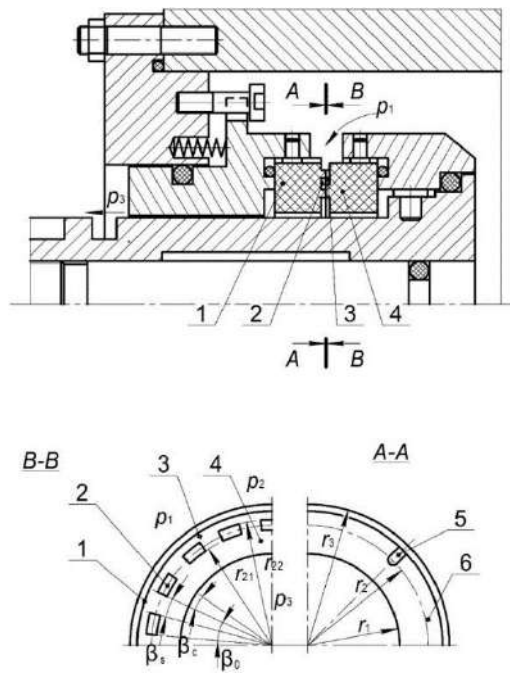


Рис. 4 – Схема імпульсного торцевого ущільнення

Для вибору конструктивних параметрів, що забезпечують необхідні характеристики ущільнень в заданому діапазоні зміни тиску, необхідна розробка методів їх розрахунку.

Розглядаючи ущільнення у вигляді систем автоматичного регулювання (рис. 5), можна виробити єдиний підхід до їх розрахунку, який зводиться до побудови статичних характеристик, тобто залежності зазору і витрат від зовнішніх впливів, і визначенню коефіцієнтів статичної та динамічної жорсткості.

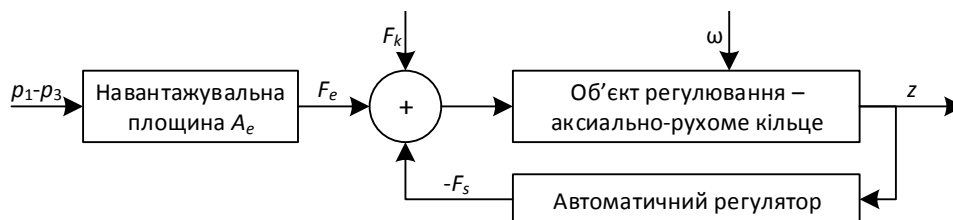


Рис. 5 – Модель імпульсного ущільнення як системи автоматичного регулювання

Основні формули для розрахунку імпульсних ущільнень наведені в таблиці.

Приклади промислового застосування імпульсних ущільнень. Уніфікований вузол імпульсного торцевого ущільнення для високооборотних насосів АЕС показаний на рис. 6. Ущільнення пройшло промислову перевірку в складі турбоживильних насосів ПТА 3800-70 і застосовується при модернізації насосів продувки-підживлення ЦН 60-180 та інших високооборотних насосів АЕС.

Таблиця

Характеристики імпульсних ущільнень

Обумовлені характеристики	Вирази
Статична характеристика	$u = \left\{ \frac{\alpha_{e1} \frac{\bar{T}_p}{T_n} \Omega}{\frac{\chi}{\Delta\psi} + K - \alpha_{e3} - \alpha_{e1} \frac{t_{cn} - \bar{T}_c \Omega_c}{T_n}} \right\}^{1/3}$
Видаткова характеристика	$\bar{Q} = u^3 \Delta\psi \alpha_{e3} \left[1 + \alpha_{31} \frac{t_{cn}/\Omega - \bar{T}_c + \bar{T}_p/u^3}{T_n} \Omega \right]$
Умова динамічної стійкості без урахування в'язкого тертя	$V_0 < \frac{A_s E z_0 g_{s0}}{3(1+n_i)(k_1 g_{30} - k_3 g_{10})(p_{10} - p_{30})}$
Постійні часу, вагові коефіцієнти, безрозмірні тиски і провідності	$T_c = \frac{\bar{T}_c}{G(u)}, \bar{T}_c = \frac{V_0}{E g_i}, G(u) = 1 + (\alpha_{1i} + \alpha_{3i}) u^3; T_p = \frac{\bar{T}_p}{u^3}, \bar{T}_p = \frac{V_0 \alpha_{e3}}{E g_{1n}};$ $G_c = \frac{1}{G} \left[(1 + \alpha_{1i} u^3) p_1 + \alpha_{3i} u^3 p_3 \right], G_p = \alpha_{e3} p_1 + \alpha_{e1} p_3;$ $\alpha_{e3} = \frac{g_{en}}{g_{3n}}, \alpha_{e1} = \frac{g_{en}}{g_{1n}} = 1 - \alpha_{e3};$ $\alpha_{1i} = \frac{g_{1n}}{g_i}, \alpha_{3i} = \frac{g_{3n}}{g_i}, \alpha_{31} = \frac{g_{3n}}{g_{1n}}; g_{en} = \frac{g_{1n} g_{3n}}{g_{1n} + g_{3n}}, g_e = g_{en} u^3.$

Позначення:

Ω – безрозмірна частота обертання ротора; K – коефіцієнт навантаження; $\Delta\psi$ – безрозмірний перепад тиску; χ – безрозмірне зусилля попереднього стиснення пружин; t_{cn} – час, протягом якого живильник проходить повз камери; $T = 2\pi/n_i\omega$ – час між черговими впрысками; T_c, T_p – постійні часу стиснення і розширення; u – безрозмірний торцевий зазор; V_0 – об’єм камери; A_s – площа розглянутого елемента торцевого зазору; z – осьова координата або торцевий зазор; g_{s0} – сумарна провідність для сталого зазору; n_i, n_c – число живильників і камер, відповідно; k_1, k_3 – вагові коефіцієнти; g_i, g_1, g_3 – гідравлічні провідності живильника, внутрішнього і зовнішнього торцевих дроселів; G, G_c, G_p – безрозмірні провідності; p_1, p_3 – ущільнюваний тиск і протитиск; Q – витоки через ущільнення; E – модуль пружності рідини;

нижні індекси: n – номінальні значення; 0 – усталене значення; c – належність до періоду стиснення рідини в камері; p – належність до періоду розширення рідини в камері.

Насос ЦН 60-180 використовується в першому контурі водо-водяних реакторів для борного регулювання, подачі замикаючої води на ущільнення ГЦН, а також для впрыскування необхідних добавок, що знижують корозійну активність теплоносія.

Енергоблок ВВЕР-1000 комплектується трьома такими насосами, з яких один працює, а два знаходяться в резерві. Температура перекачуваної води не перевищує 70°C. Тиск ущільнюваної рідини 0,6-1,0 МПа, частота обертання ротора 8900 об/хв, діаметр вала під ущільненням 0,07 м, середня окружна швидкість контактної поверхні торцевого ущільнення 50 м/с.

Внаслідок великої окружної швидкості насоси спочатку мали щільні ущільнення, протікання через які в трьох насосах становили близько 25 м³/год. Підготовка витоків до повторного використання вимагала великих витрат, тому була розроблена конструкція імпульсного торцевого ущільнення.

Вибір основних геометричних розмірів ущільнення проводився за викладеною вище методикою, в якості оптимального торцевого зазору прийнято значення 2 мкм, при якому забезпечується стійке граничне змащення з низьким коефіцієнтом тертя, завдяки чому ущільнення не вимагають зовнішніх систем охолодження. Тепловідведення від пари тертя здійснюється

перекачуваною водою, циркуляція якої через камеру ущільнення забезпечується осьовим імпульсом 1. У застійних зонах поверхні з плином часу покриваються кристалами бору, тому потрібна періодична промивка цих поверхонь. Для зменшення витрати конденсату на промивку порожнина за аксіально-рухомим кільцем 2 ущільнюється замикаючим щільним ущільненням 3, яке одночасно є аварійним при відмові основного ущільнення.

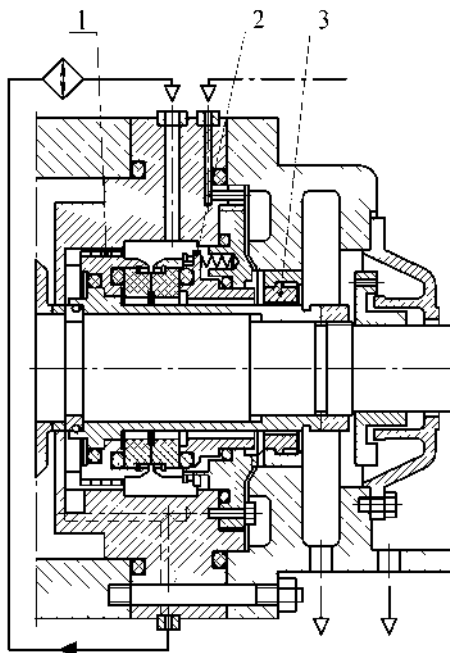


Рис. 6 – Імпульсне ущільнення високооборотного підживлювального насоса ЦН 60-180

При ущільненні перепадів тисків вище 15 МПа і для унеможливлення потрапляння перекачуваної насосом рідини в навколишнє середовище застосовуються торцеві ущільнення з двома або трьома ступенями поділу тиску. Приклад такого рішення вузла торцевого ущільнення імпульсного типу наведено на рис. 7 [15]. Вузол ущільнення працює в умовах високих температур (до 285°C). Для виключення витоків гарячої води в навколишній простір передбачена подача в вузол ущільнення охолоджуючої, а також затворної води з тиском, що на 0,05...0,1 МПа перевищує тиск в ущільнюваній порожнині насоса. Основними елементами системи ущільнення є внутрішнє щільне ущільнення 1, два ступені імпульсного торцевого ущільнення 2 і 4, контури охолодження 6 і 7, підведення затворної води 8 і відведення організованою витоків 5. При нормальній роботі кінцева ступінь торцевого ущільнення приймає на себе повний перепад тиску, а інша виконує функцію резервної (аварійної). Зовнішні витоків затвора рідини складають не більше 1 л/год, що в десятки разів менше, ніж для подібних вузлів ущільнень з плаваючими кільцями.

Обговорення результатів. Аналіз існуючих конструкцій ущільнень насосів атомних електростанцій показує, що найбільшого поширення набули гідростатичні і механічні торцеві ущільнення з поліпшеними умовами змащення. Гідростатичні ущільнення використовуються як головні і служать для дроселювання високих перепадів тиску з відносно невеликими організованими витоків (0,5-1 м³/год). Механічні торцеві ущільнення завдяки малим витоків використовуються головним чином як замикаючі. Останнім часом їх починають застосовувати і в головних ступенях ущільнень.

Перспективним є гідростатичне ущільнення з імпульсним урівноваженням аксіально рухомого кільця, яке при обертанні вала забезпечує безконтактну роботу з малими витоків, а при стоянці – повну герметичність. Ці якості імпульсного ущільнення дозволяють звести до мінімуму знос робочих поверхонь, організовані і зовнішні витоків і використовувати його у всіх ступенях вузла ущільнення.

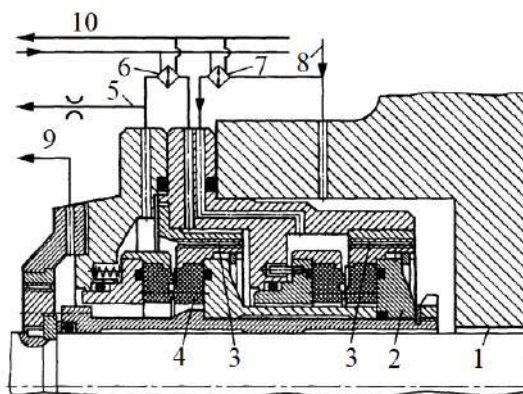


Рис. 7 – Двоступінчате імпульсне ущільнення насоса: 1 – щілинне ущільнення; 2, 4 – перша і друга ступені імпульсного торцевого ущільнення; 3 – лабіринтне ущільнення; 5 – лінія відведення організованого витоку; 6, 7 – холодильники; 8 – лінія підведення буферної води; 9 – лінія відведення витоку; 10 – лінія підведення і відведення охолоджуючої води

При розробці сучасних насосів атомних електростанцій на великі подачі і високі тиски намітилася тенденція до підвищення надійності вузлів ущільнень за рахунок скорочення кількості ступенів і спрощення системи замикання і охолодження. У зв'язку з цим актуальним є створення надійних ступенів ущільнень, що працюють при повних перепадах тиску. Для вирішення цього завдання необхідно подальше вивчення фізико-механічних процесів, що відбуваються в ущільненнях, вдосконалення матеріалів пар тертя, розробка ефективних і надійних методів охолодження і очищення ущільнюваного середовища, зниження деформацій основних елементів ущільнень роторів, розробка більш точних методів розрахунку.

Висновки

У порівнянні зі звичайними механічними торцевими ущільненнями безконтактні торцеві ущільнення з саморегульованим зазором, як системи автоматичного регулювання, мають істотні переваги. На відміну від звичайних торцевих ущільнень в імпульсних ущільненнях зі збільшенням частоти обертання торцевий зазор дещо збільшується, в результаті чого обмежується ріст потужності тертя. Вибором основних геометричних параметрів можна забезпечити оптимальне значення торцевого зазору і моменту тертя на ущільнюючих контактних поверхнях в широкому діапазоні ущільнюваних тисків і частот обертання ротора, тому їх застосування особливо ефективно для високооборотних насосів.

Побудована модель і методика розрахунку імпульсного торцевого ущільнення як системи автоматичного регулювання торцевого зазору і протікання дозволяє виявити небезпечні області частот обертання і підібрати параметри ущільнення так, щоб амплітуди вимушених осьових коливань кільця не виходили за допустимі межі.

Ущільнюючі системи, створені на основі імпульсних ущільнень, забезпечують необхідну герметичність, надійність і екологічну безпеку в екстремальних умовах, характерних для насосного обладнання АЕС.

Перелік використаних джерел:

1. Марцинковский В.А. Насосы атомных электростанций: расчет, конструирование, эксплуатация : монография / В.А. Марцинковский, С.С. Шевченко; под общ. ред. С.С. Шевченко. – Сумы : ЧФ «Издательство «Университетская книга», 2018. – 472 с.
2. Qiu Y. Thermohydrodynamic Analysis of Spiral Groove Mechanical Face Seal for Liquid Applications / Y. Qiu, M.M. Khonsari // Journal of Tribology. – 2012. – Vol. 134, iss. 2. – Pp. 1-11. – Mode of access: [DOI: 10.1115/1.4006063](https://doi.org/10.1115/1.4006063).
3. Ma C. Thermo-hydrodynamic characteristics of spiral groove gas face seals operating at low pressure / C. Ma, S. Bai, X. Peng // Tribology International. – 2016. – Vol. 95. – Pp. 44-54. – Mode of access: [DOI: 10.1016/j.triboint.2015.11.001](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.11.001).

4. Design and calculation of mechanical seals with self-adjusting clearance / J. Gaft, V. Martsinkovsky, A. Zagorulko, V. Gromyko // *Proceedings of XVII International Conference on Fluid Sealing*. – 2003. – Pp. 505-520.
5. Theoretical Analyses and Field Applications of Gas-Film Lubricated Mechanical Face Seals with Herringbone Spiral Grooves / Y. Wang, H. Yang, J. Wang, Ya. Liu, H. Wang, X. Feng // *Tribology Transactions*. – 2009. – Vol. 52, iss. 6. – Pp. 800-806. – Mode of access: [DOI: 10.1080/10402000903115445](https://doi.org/10.1080/10402000903115445).
6. Ding X. Theoretical analysis and experiment on gas film temperature in a spiral groove dry gas seal under high speed and pressure / X. Ding, J. Lu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – Vol. 96. – Pp. 438-450. – Mode of access: [DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.045](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.045).
7. Błasiak S. A numerical analysis of the grooved surface effects on the thermal behavior of a non-contacting face seal / S. Błasiak, C. Kundera // *Procedia Engineering*. – Vol. 39. – 2012. – Pp. 315-326. – Mode of access: [DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.037](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.037).
8. Zhu W.B. Research on sealing performance of hydrostatic pressure mechanical seal / W.B. Zhu, H.S. Wang, S.R. Zhou // *Journal of Marine Science and Technology*. – 2014. – Vol. 22, no. 6. – Pp. 673-679. – Mode of access: [DOI: 10.6119/JMST-014-0321-1](https://doi.org/10.6119/JMST-014-0321-1).
9. Development and application of double pulse gas-liquid seals / V. Martsynkovskyy [et al.] // *Proceedings of 16th International Conference on Fluid Sealing*. – 2000. – Pp. 255-269.
10. Analysis of buffer impulse seal / V. Martsynkovskyy, A. Zahorulko, S. Gudkov, S. Mischenko // *Procedia Engineering*. – 2012. – Vol. 39. – Pp. 43-50. – Mode of access: [DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.006](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.006).
11. Blasiak S. A parametric and dynamic analysis of non-contacting gas face seals with modified surfaces / S. Blasiak, A.V. Zahorulko // *Tribology International*. – 2016. – Vol. 94. – Pp. 126-137. – Mode of access: [DOI: 10.1016/j.triboint.2015.08.014](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.08.014).
12. Kundera C. Self-controlled face seal / C. Kundera, W.A. Marcinkowski // *Pomiary Automatyka Kontrola*. – 2008. – Vol. 54. – Pp. 270-272.
13. Theoretical and experimental investigations of buffer face impulse seals / J. Gaft, A. Zahorulko, V. Martsynkovskyy, Cz. Kundera // *Behaviour of Dynamic Seals in Unexpected Operating Conditions*. – 2012. – Pp. 70-80 – Mode of access: [DOI: 10.13140/RG.2.1.4062.9204](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4062.9204).
14. KSB Mechanical Seals for Reactor Coolant Pumps [Electronic resource]: [Website]. – Electronic data. – Mode of access: [www.ksb.com/ksb-us/Products_and_Markets/Energy/Nuclear Power Stations/KSB_mechanical_seals/ksb-mechanical-seals/250464/](http://www.ksb.com/ksb-us/Products_and_Markets/Energy/Nuclear_Power_Stations/KSB_mechanical_seals/ksb-mechanical-seals/250464/).
15. Мельник В.А. Торцевые уплотнения валов : справочник / В.А. Мельник. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.

References:

1. Martsinkovskiy V.A., Shevchenko S.S. *Nasosy atomnykh elektrostantsiy: raschet, konstruirovaniye, ekspluatatsiya* [Pumps of nuclear power plants: calculation, design, operation]. Sumy, Universitetskaya kniga Publ., 2018. 472 p. (Rus.)
2. Qiu Y., Khonsari M.M. Thermohydrodynamic Analysis of Spiral Groove Mechanical Face Seal for Liquid Applications. *Journal of Tribology*, 2012, vol. 134, iss. 2, pp. 1-11. **doi: 10.1115/1.4006063**.
3. Ma C., Bai S., Peng X. Thermo-hydrodynamic characteristics of spiral groove gas face seals operating at low pressure. *Tribology International*, 2016, vol. 95. pp. 44-54. **doi: 10.1016/j.triboint.2015.11.001**.
4. Gaft J., Martsinkovskyy V., Zagorulko A., Gromyko B. Design and calculation of mechanical seals with self-adjusting clearance. *Proceedings of XVII International Conference on Fluid Sealing*, 2003, pp. 505-520.
5. Wang, Y., Yang, H., Wang, J., Liu Ya., Wang H., Feng X. Theoretical Analyses and Field Applications of Gas-Film Lubricated Mechanical Face Seals with Herringbone Spiral Grooves. *Tribology Transactions*, 2009, vol. 52, iss. 6, pp. 800-806. **doi: 10.1080/10402000903115445**.
6. Ding X., Lu J. Theoretical analysis and experiment on gas film temperature in a spiral groove dry gas seal under high speed and pressure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 96, pp. 438-450. **doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.045**.

7. Błasiak S., Kundera C. A numerical analysis of the grooved surface effects on the thermal behavior of a non-contacting face seal. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 39, pp. 315-326. **doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.037.**
8. Zhu W.B., Wang H.S., Zhou S.R. Research on sealing performance of hydrostatic pressure mechanical seal. *Journal of Marine Science and Technology*, 2014, vol. 22, no. 6, pp. 673-679. **doi: 10.6119/jmst-014-0321-1.**
9. Martsynkovskyy V., Gaft Y., Gromyko B. Development and application of double pulse gas-liquid seals. *Proceedings of 16th International Conference on Fluid Sealing*, 2000, pp. 255-269.
10. Martsynkovskyy V., Zahorulko A., Gudkov S., Mischenko S. Analysis of buffer impulse seal. *Procedia Engineering*, vol. 39, 2012. pp. 43-50. **doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.006.**
11. Błasiak S., Zahorulko A.V. A parametric and dynamic analysis of non-contacting gas face seals with modified surfaces. *Tribology International*, 2016, vol. 94, pp. 126-137. **doi: 10.1016/j.triboint.2015.08.014.**
12. Kundera C., Marcinkowski W.A. Self-controlled face seal. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2008, vol. 54, pp. 270-272. **doi: 10.1016/j.triboint.2015.08.014.**
13. Gaft J., Zahorulko A., Martsynkovskyy V., Kundera Cz. Theoretical and experimental investigations of buffer face impulse seals. *Behaviour of Dynamic Seals in Unexpected Operating Conditions*, 2012, pp. 70-80. **doi: 10.13140/rg.2.1.4062.9204.**
14. KSB Mechanical Seals for Reactor Coolant Pumps Available at: [www.ksb.com/ksb-us/Products and Markets/Energy/Nuclear Power Stations/KSB mechanical seals/ksb-mechanical-seals/250464/](http://www.ksb.com/ksb-us/Products%20and%20Markets/Energy/Nuclear%20Power%20Stations/KSB%20mechanical%20seals/ksb-mechanical-seals/250464/) (accessed 15 August 2020).
15. Melnik V.A. *Tortsevyye uplotneniya valov: spravochnik* [Mechanical shaft seals. Directory. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2008. 320 p. (Rus.)

Рецензент: С.Д. Винничук

д-р техн. наук, старш. наук. співроб., ПІМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України

Стаття надійшла 16.11.2020

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

УДК 614.89

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226205

© Чеберячко С.І.¹, Чеберячко Ю.І.², Дерюгін О.В.³,
Славінський Д.В.⁴, Клімов Д.Г.⁵**ФІЛЬТРУВАЛЬНИЙ РЕСПІРАТОР З ПРИМУСОВОЮ
ПОДАЧЕЮ ПОВІТРЯ**

Фільтрувальний респіратор з примусовою подачею повітря є ефективним засобом індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) користувачів в особливо небезпечних умовах, насичених шкідливими речовинами, в яких не можна користуватись іншими типами захисного спорядження. Для вирішення поставленої задачі застосовувались методи раціонального вирішення винахідницьких задач. Зокрема, застосовувався підхід готового об'єкта (об'єкт не змінюється), в якому підсилюється одна ознака, а також застосовувався вибір одного об'єкта із декількох, тобто опрацьовувалась одна пошукова концепція із декількох. Розроблено конструкцію фільтрувального респілятора з примусовою подачею повітря, який відрізняється від відомих аналогів наявністю блоку контролю об'єму і якості очищеного повітря, що вдихається, з урахуванням частоти і глибини дихання користувача при виконанні фізичного навантаження. Встановлено, що об'єм повітряного потоку, який потрапляє у підмасковий простір до органів дихання користувача, лінійно залежить від частоти обертання крильчатки вентилятора, однак при досягненні опору повітряному потоку через фільтри більше 7-7,5 мБар залежність стає нелінійною, що пов'язано зі зміною характеру фізичного навантаження. Практична цінність полягає у розробці ефективної конструкції фільтрувального респілятора з примусовою подачею повітря, запропоновано алгоритм його роботи, який дозволяє контролювати об'єм і якість очищеного повітря, що вдихається, з урахуванням частоти і глибини дихання користувача при виконанні фізичного навантаження, а також захисні властивості фільтрувальних елементів пристрою.

Ключові слова: шкідливі речовини, фільтрувальний респіратор, півмаска, прилад очищення повітря, щільність прилягання, фільтр, вимірювач тиску.

S.I. Cheberyachko, Yu.I. Cheberyachko, O.V. Deryugin, D.V. Slavinskyi, D.G. Klimov.
Filtering respirator with forced air supply. The filter respirator with forced air supply is an effective means of individual protection of respiratory organs (MIPRO) of users under especially dangerous conditions with air saturated with harmful substances while it is impossible to use other types of protective equipment. To solve this problem, methods of rational solution of inventive problems have been used. In particular, the approach of the finished object has been used (the object does not change), in which one feature is amplified; and the choice of one object from several objects has been applied, i.e. one search

¹ д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-3281-7157, sicheb@ukr.net

² д-р техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-7307-1553, cheberiyachkoyi@ukr.net

³ канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-2456-7664, deryugin_o@ukr.net

⁴ асистент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-7540-2077, dimnikson@gmail.com

⁵ аспірант, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-3817-9697, stalker.klimov@gmail.com

concept from several has been worked out. The design of a filter respirator with forced air supply has been developed, which differs from the known analogues by the presence of a unit for controlling the volume and the quality of purified air inhaled, with regard to the frequency and depth of the user breathing at exercise. It has been established that the volume of air flow that enters the submask space and gets into the user's respiratory organs is linearly dependent on the speed of the fan impeller, but when the resistance to air flow through the filters is more than 7-7,5 mBar, the dependence becomes nonlinear; it changing with the nature of physical activity. The practical value involves the development of an effective design of a filter respirator with forced air supply, the algorithm for its operation, that makes it possible to control the volume and the quality of purified air inhaled and takes into account the frequency and depth of the user breathing at exercise; the proposed algorithm also makes it possible to control the protective properties of the filter elements of the device at work.

Keywords: *harmful substances, filter respirator, half mask, air purification device, fit, filter, pressure meter.*

Постановка проблеми. Слабким місцем фільтрувальних респіраторів з природною подачею повітря є висока ймовірність проникнення забрудненого повітря через щілини між півмаскою і обличчям користувача через створене розрідження у підмасковому просторі під час процесу вдихання-видихання. Поява щілин між обличчям і поверхнею півмаски пов'язано з антропометричними відмінностями обличчя користувача, рухами головою, послабленням притискних зусиль наголів'я та ін. Вважається, що у ЗІЗОД відповідного типу просочування в підмасковий простір забрудненого повітря, що вміщує шкідливі речовини, можуть сягати до 20% від загального об'єму повітря, що вдихається [1]. Тому захист органів дихання працівників підприємств зі шкідливими умовами виробництва, рятувальників та цивільного населення під час виникнення надзвичайних ситуацій (техногенних аварій, розповсюдження небезпечних вірусних інфекцій, бойових дій, терористичних актів, пожеж різної етимології, особливо в умовах наявності невідомого складу токсикантів у повітрі) є надзвичайно важливою і актуальною задачею. Один із шляхів її вирішення – розробка ефективних ЗІЗОД з примусовою подачею повітря, що відповідають наступним вимогам: багатофункціональність, простота конструкції, мінімальний час підготовки пристрою і користувача до експлуатації, контроль експлуатаційних параметрів захисної роботи пристрою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз комерційного ринку продажів подібних фільтрувальних респіраторів з примусовою подачею повітря вказує, що не так багато й виробників можуть дозволити виробництво відповідних приладів. Так, їх розробкою і виготовленням займаються відомі компанії-виробники, серед яких можна зазначити наступних: «Drager Sarety AG&Co. KGaA», «UVEX», «Delta Plus», «Sundström Safety AB», «ЗМ», «Mine Safety Appliances» [2]. Компанії-виробники широко використовують для проектування півмасок інформаційні технології для визначення антропометричних характеристик обличчя працівників, побудови 3D-моделі голови користувача і відповідної цифрової поверхні респіратору [3, 4]. Наступний крок – це підбір технологічного обладнання, пакету фільтрувальних матеріалів для забезпечення відповідної захисної ефективності ЗІЗОД. Також конструктори намагаються вирішити і низку супутніх задач, які пов'язані з негативним впливом носіння фільтрувальних респіраторів, надмірний опір диханню, дискомфорту, перегріву та ін. [5]. Нажаль до сьогодні невирішеною проблемою залишається накопичення тепла і поту в просторі захисної маски фільтрувального респіратора [6]. Незважаючи навіть на розташовані спеціальні повітродувки, які значно збільшують масу фільтрувального респіратора і збільшують незручності його використання [7, 8]. Ще однією досить суттєвою проблемою використання фільтрувальних респіраторів є психологічне навантаження на користувача, яке проявляється через посилення тривоги, і як наслідок, прояв різних психосоматичних розладів [9]. Їх поява серйозно впливає на працездатність працівника та змушує робити значну кількість перерв для відпочинку. Для вирішення цієї задачі компанії-виробники ведуть пошук нових еластомерних матеріалів, передбачають можливість індивідуальної підгонки півмаски з врахуванням антропометричних розмірів обличчя користувача, намагаються розробляти комплексні ЗІЗОД [10, 11].

Враховуючи, що з кожним роком підвищуються вимоги до захисту органів дихання кори-

стувачів, виникає необхідність у посиленні контролю за захисними властивостями ЗІЗОД під час їх експлуатації [12]. Особливо це стосується сучасних фільтрувальних респіраторів з примусовою подачею повітря. Досить складна конструкція фільтрувального респілятора вимагає постійного моніторингу за ефективністю роботи нагнітаючого вентилятора через значний опір потоку повітря, який виникає у повітропроводі, зумовлений невеликими розмірами повітряних каналів, необхідність роботи на підвищених обертах, що викликає значний шум та швидке зниження рівня заряду акумулятора. Крім того, неефективна робота системи управління фільтрувальним респіратором, яка у випадках різкого підвищення витрати повітря (більше 300 л/хв) при виконанні важкої роботи вмикає вентилятор із запізненням, що призводить до утворення під маскою від'ємного (негативного) тиску, а значить може призвести до підсмоктування нефільтрованого повітря за смугою обтюрації, а також до збільшення концентрації вуглекислого газу. Також низька усмоктувальна спроможність відцентрованого вентилятора, що не дозволяє його використання в атмосфері, забрудненій декількома різними шкідливими речовинами, що потребує для захисту встановлення одночасно декількох протигазових фільтрів, встановлених послідовно. Все перераховане вимагає розробки нової конструкції фільтрувального респілятора з примусовою подачею повітря.

Метою дослідження є розробка конструкції фільтрувального респілятора з примусовою подачею повітря з можливістю автоматичного регулювання об'єму повітряного потоку у відповідності до характеру фізичного навантаження користувача на протязі усього терміну роботи з підтриманням належного рівня захисних властивостей пристрою.

Виклад основного матеріалу. Запропоновано конструкцію фільтрувального респілятора з примусовою подачею повітря, яка відрізняється від відомих аналогів наявністю блоку контролю об'єму і якості очищеного повітря, що вдихається, який в автоматичному режимі корегує об'єм повітря у підмасковому просторі з урахуванням частоти і глибини дихання користувача при виконанні фізичного навантаження. Фільтрувальний респіратор з примусовою подачею повітря (рис. 1) складається із захисної шолом-маски (1), яка прилягає до обличчя користувача за допомогою обтюрації (2) і фіксується з можливістю регулювання сили притискання до обличчя за допомогою ремінців наголів'я (3). Шолом-маска (1), яка має клапани вдиху (6) та видиху (7), з'єднана гнучким гофрованим повітропроводом (5) з пристроєм очищення повітря (4).

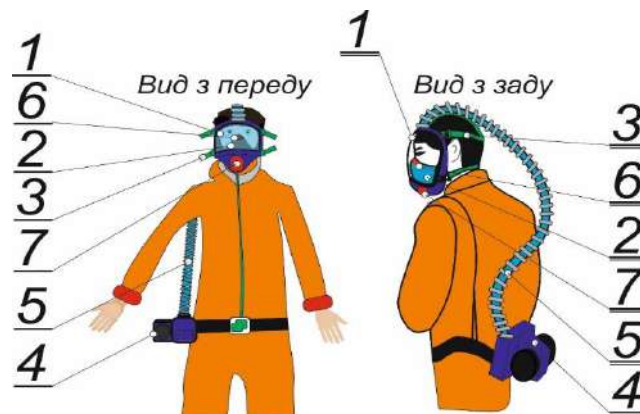


Рис. 1 – Загальний вид фільтрувального респілятора з примусовою подачею повітря на користувачі: 1 – шолом-маска; 2 – обтюратор; 3 – ремінці наголів'я; 4 – пристрій очищення повітря; 5 – гофрований повітропровід; 6, 7 – клапан вдиху/видиху

Конструкція пристрою для очищення повітря наведена на рис. 2. Схематично-конструктивна схема фільтрувального респілятора з примусовою подачею повітря складається з наступних елементів: шолом-маски (1), обтюрації (2), ремінців наголів'я (3), пристрою очищення повітря (4), гнучкого гофрованого повітропроводу (5), клапана вдиху (6), клапана видиху (7), корпусу пристрою очищення повітря (8), фільтрувальних елементів (9), блоку управління (10), тумблеру «Вмикання/вимикання» (11), кнопки № 1 (12) «Коригування інформації» (час, день тижня, місяць, температура навколишнього середовища, вологість); кнопки № 2 (13) «Коригування режиму» (автоматичний режим, турборежим, аварійний режим); кнопки

№ 3 (14) «Підсвітка дисплею»; світлових індикаторів: світловий індикатор червоного кольору (15) «Аварія», світловий індикатор синього кольору (16) «Турбо», світловий індикатор зеленого кольору (17); карти пам'яті (18) дисплею (19); гучномовцю (20); роз'єму для підзарядки елементів живлення (21); USB-роз'єму для підключення к ПЕОМ для налаштування і коригування програмного забезпечення роботи пристрою для очищення повітря (22); блоку контролю (23); блоку живлення (24), в склад якого входять три елемента живлення (25); каналу (26); вентилятора (27); контролера (28); тахометра (29); стабілізатора напруги (30); датчика контролю наявності пилу в атмосфері робочої зони (31); датчика контролю температури і вологості в атмосфері робочої зони (32); датчика контролю концентрації вуглекислого газу в атмосфері робочої зони (33); датчика контролю тиску в зоні низького тиску (34); датчика контролю тиску в зоні високого тиску (35); датчика контролю температури і вологості в зоні високого тиску (36); підігрівача очищеного повітря (37).

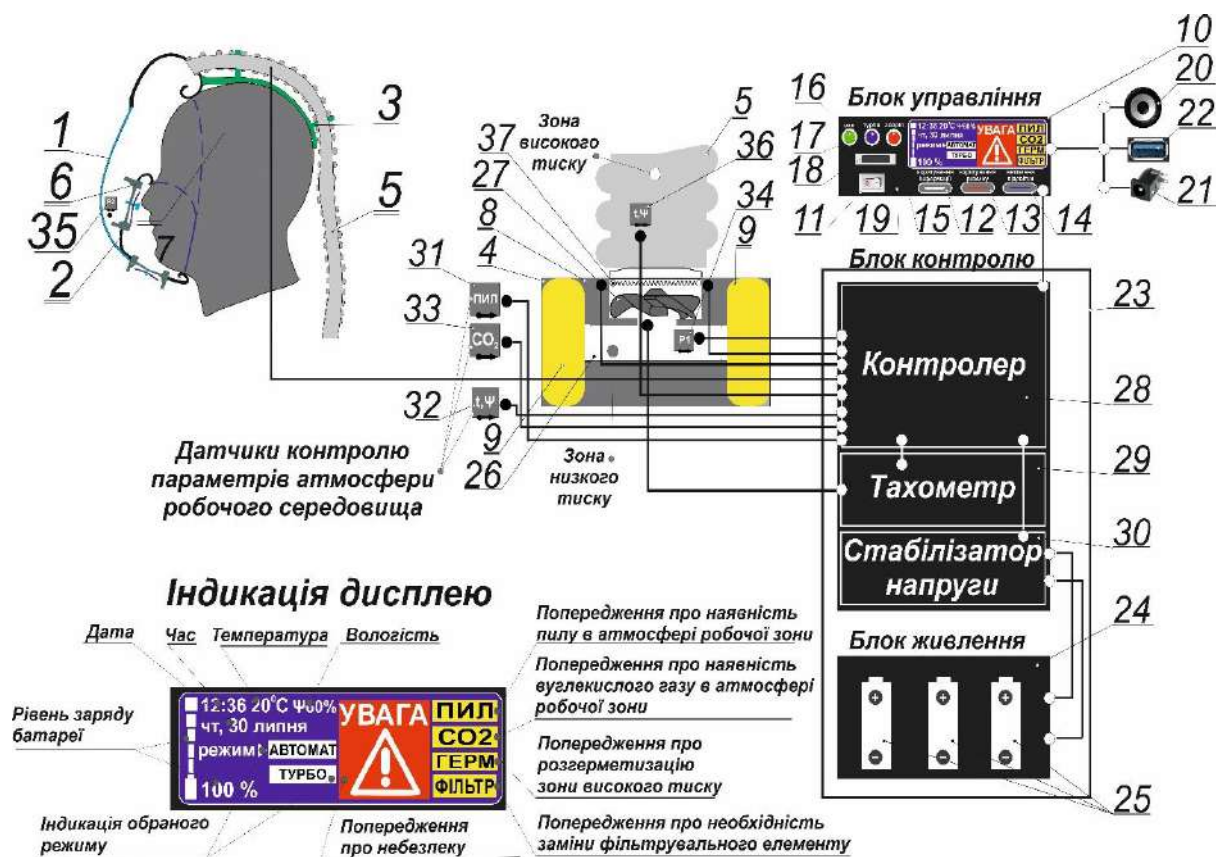


Рис. 2 – Схематично-конструктивна схема фільтрувального респіратору з примусовою подачею повітря

В корпусі пристрою очищення повітря розміщено блок управління, стабілізатор напруги з блоком живлення, блок контролю за параметрами повітряного потоку та багатофункційною системою датчиків, встановлених в корпусі пристрою (рис. 3), з можливістю регулювання основних параметрів повітряного потоку в підмасковому просторі через регулювання кількості обертів вентилятора у заданому діапазоні.

У фільтрувальному респіраторі з примусовою подачею повітря реалізовано декілька режимів роботи:

- автоматичний, що базується на вихідних сигналах з датчиків контролю параметрів повітря, інформація з яких надходить до контролера, де проводиться їх обробка за відповідним алгоритмом (рис. 4) та здійснюється управління обертами вентилятора, підігрівачем очищеного повітря, індикації та сигналізації, що висвітлюється на дисплеї блоку очищення повітря;

- режим «Турбо», який включається у випадку сильного забруднення фільтрувальних елементів для збільшення кількості обертів вентилятора, що регулюється контролером у випад-

ку надходження відповідних сигналів з датчиків контролю;

- аварійний режим, який включається при мінімальному заряду акумулятора чи при досягненні критичної величини перепаду тиску для швидкого виходу працівника з небезпечної зони.

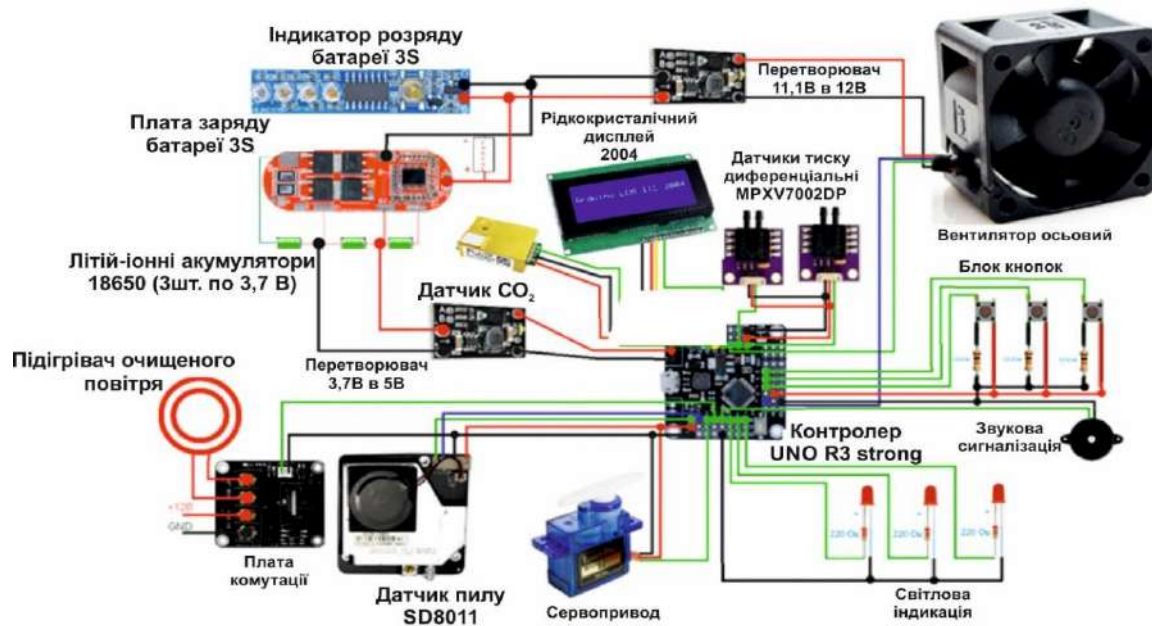


Рис. 3 – Схема блоку контролю за параметрами повітряного потоку

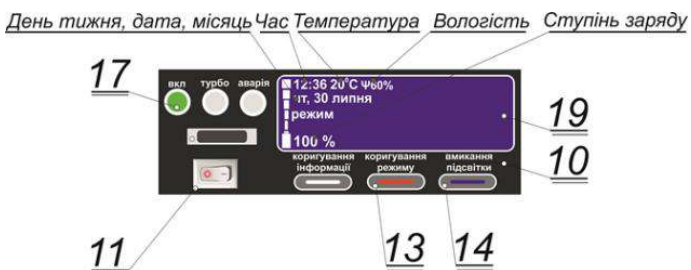



Рис. 4 – Алгоритм роботи блоку управління фільтрувального респіратору з примусовою подачею повітря

В таблиці 1 наведена детальна інформація про режими роботи фільтрувального респіра-тора з примусовою подачею повітря з відповідним зображенням на дисплеї.

Таблиця 1

Режими роботи фільтрувального респіра-тора з примусовою подачею повітря

Зображення інформації дисплею блоку управління в залежності від режиму роботи	Алгоритм вмикання пристрою у від-повідному режимі
1. Підготовка пристрою до роботи	
 <p>День тижня, дата, місяць Час Температура Вологість Ступінь заряду</p>	<p>Для підготовки пристрою до роботи необхідно натиснути на тумблер «Вмикання/вимикання» (11), при цьому на дисплеї (19) блоку управління (10) загориться світлодіод зеленого кольору «Вкл.» (17). Після проводиться коригування інформації, що виводиться на дисплей пристрою за допомогою кнопки «Коригування інформації» (12): день тижня, дата, місяць, час (години, хвилини). Перевіряється контроль температури і вологості повітряного простору робочої зони. Перевіряється підсвітка дисплею (19) шляхом натискання кнопки «Вмикання підсвітки» (14). Перевіряється ступінь заряду блоку живлення (24). Індикація стану елементів живлення (25) здійснюється за допомогою сигнальної індикації, яка миготить при залишковій ємності елементів живлення (25) не менше 25-30%; при зниженні напруги на стеку акумулятора до 2,8-3 В вентилятор (27) відключається.</p>
2. Продувка пристрою очищення повітря	
	<p>Для здійснення продувки пристрою необхідно натиснути тумблер «Вмикання/вимикання» (11), при цьому на дисплеї (19) блоку управління (10) загориться світлодіод зеленого кольору «Вкл.» (17). Натискається кнопка «Вмикання підсвітки» (14) і кнопка «Коригування режиму» (13). За допомогою кнопки «Коригування режиму» (13) виставляється режим «автоматичний». При цьому починає обертатися вентилятор (27) і нагнітати повітря із зовнішнього середовища в шолом-маску (1). При цьому вентилятор (27) обертається з постійною швидкістю. Користувач долонею руки перевіряє надходження повітря в шолом маску.</p>

Продовження таблиці 1

3. Робота пристрою в автоматичному режимі

Індикація дисплею при наявності пилу в атмосфері



Індикація дисплею при наявності в атмосфері CO₂



Індикація дисплею при наявності в атмосфері пилу і CO₂



Індикація дисплею при втраті герметизації пристрою



Включення пристрою для роботи в автоматичному режимі: натискається тумблер «Вмикання/вимикання» (11), при цьому на дисплеї (19) блоку управління (10) загориться світлодіод зеленого кольору «Вкл.» (17). Натискається кнопка «Вмикання підсвітки» (14) і кнопка «Коригування режиму» (13).

За допомогою кнопки «Коригування режиму» (13) виставляється режим «автоматичний». При цьому починає обертатися вентилятор (27) і нагнітати повітря із зовнішнього середовища в простір шолом-маски (1). Користувач одягає на обличчя шолом маску (1) і за допомогою ремінців наголів'я регулює щільне притискання шолом-маски (1) до голови і ретельно перевіряє комфортне притискання обтюратора до обличчя. Також користувач перевіряє герметичність з'єднання фільтрувальних елементів (9) з корпусом (8) очищувача повітря (4), з'єднання корпусу (8) очищувача повітря (4) з гофрованим повітроводом (5) і з'єднання гофрованого повітроводу (5) з шолом-маскою (1). Після перевірки пристрою очищення повітря користувач одягає шолом-маску (1), закріплює пристрій очищення повітря (4) на поясі за спиною для зручності.

4. Робота пристрою в режимі «Турбо»

Індикація дисплею при наявності в атмосфері пилу і CO₂



Включення пристрою для роботи в режимі «Турбо»: натискається тумблер «Вмикання/вимикання» (11), при цьому на дисплеї (19) блоку управління (10) загориться світлодіод зеленого кольору «Вкл.» (17). Натискається кнопка «Вмикання підсвітки» (14) і кнопка «Коригування режиму» (13). За допомогою кнопки «Коригування режиму» (13) виставляється режим «Турбо» і при цьому вмикається світлодіод синього кольору «Турбо» (16) і на дисплеї (19) загоряється попередження «УВАГА!», «ФІЛЬТР». При цьому починає обертатися вентилятор (27) на максимально можливих обертах і нагнітати повітря із зовнішнього середовища в простір шолом-маски (1) до органів дихання користувача.

Особливістю роботи фільтрувального респіратора з примусовою подачею повітря в автоматичному режимі роботи є постійний контроль перепаду тиску (розрідження) повітряного потоку через зміну рівня напруги в діапазоні від 0,5 В до 4,5 В за формулою:

$$V_{out} = VS \times (0,2 \times P + 0,5) \pm 6,25\%VFSS, \text{ В} \quad (1)$$

де V_{out} – рівень напруги вихідного сигналу, В; VS – наруга живлення, В, $VS = 5$ В; $VFSS$ – повний масштабний проміжок напруги, визначається як алгебраїчна різниця між вихідною напругою при повному номінальному тиску і вихідною напругою при мінімальному номінальному тиску, В; P – тиск (розрідження) у датчику, кПа. Сигнал від датчика перепаду тиску надходить до аналогового порту контролера, де перетворюються цілочисельні значення в межах від 0 до 1023 відповідно.

Одержані значення використовуються для корегування швидкості обертання вентилятора, яке відбувається наступним чином: якщо тиск зменшується (відбувається вдих), то швидкість обертання вентилятора, яка контролюється тахометром, підвищується, і навпаки, відбувається видих – швидкість вентилятора зменшується. Рішення про збільшення/зменшення швидкості повітряного потоку формується у контролері на основі порівняння дійсних та попередніх вимірних значень перепаду тиску у гофрованому повітропроводі, з урахуванням поточної швидкості обертання вентилятора, що визначається тахометром вентилятора. Знаючи частоту проходження імпульсів сигналу тахометра, можна розрахувати швидкість обертання вентилятора за формулою:

$$V = 30 \times f_m, \text{ об/хв.} \quad (2)$$

Сигнал з тахометра f_m подається в контролер, де порівнюється з частотою f_s , що відповідає необхідній витраті повітря, і в разі виникнення умови $f_m > f_s$, яка також задається режимом праці (відповідно програмного забезпечення на контролері): легкий режим роботи, який характеризується подачею повітря 140-160 л/хв (оберти вентилятора знаходяться в діапазоні 800-1000 хв⁻¹); середній режим роботи, який характеризується подачею повітря 170-180 л/хв (оберти вентилятора знаходяться в діапазоні 1100-1200 хв⁻¹); тяжкий режим роботи, який характеризується подачею повітря на рівні 190-220 л/хв, (оберти вентилятора знаходяться в діапазоні 1300-1700 хв⁻¹). Інформація з датчика перепаду тиску постійно надходить до блоку контролю та зберігається на карті пам'яті.

Робота блоку контролю фільтрувального респіратора з примусовою подачею повітря. Блок контролю параметрів повітряного потоку побудований на основі модуля «Arduino Uno R3 Strong» (розроблений на базі мікроконтролера «ATmega328P-AU»), який виконує наступні задачі:

- контроль та управління режимами роботи вентилятора;
- контроль тиску в зонах низького та високого тиску;
- контроль вмісту вуглекислого газу (CO₂) та пилу у вдихуваному повітрі;
- контроль температури та вологості повітря;
- сигналізація у вигляді світлових і звукових сигналів.

Блок контролю виконує наступні функції:

- забезпечує стабілізацію рівня заданої витрати повітряного потоку;
- приймає та перетворює згідно з програмним алгоритмом аналогові та цифрові сигнали рівня CO₂, наявності пилу, температури та вологості повітря;
- контролює перепади тиску на фільтрувальних елементах;
- видає відповідні сигнали для включення світлової та звукової індикації.

Принципова електрична схема модуля «Arduino Uno R3 Strong» (на базі мікроконтролера «ATmega328P-AU») представлена на рис. 5. Основні технічні параметри мікроконтролера наведені в табл. 2.

«ATmega328P-AU» – це мікроконтролер, який використовується в модулі «Arduino Uno R3 Strong» в якості основного контролера. «ATmega328P-AU» – мікроконтролер з сімейства AVR; це 8-бітовий пристрій, архітектура шини даних і внутрішні регістри якого призначені для обробки 8 паралельних сигналів даних.

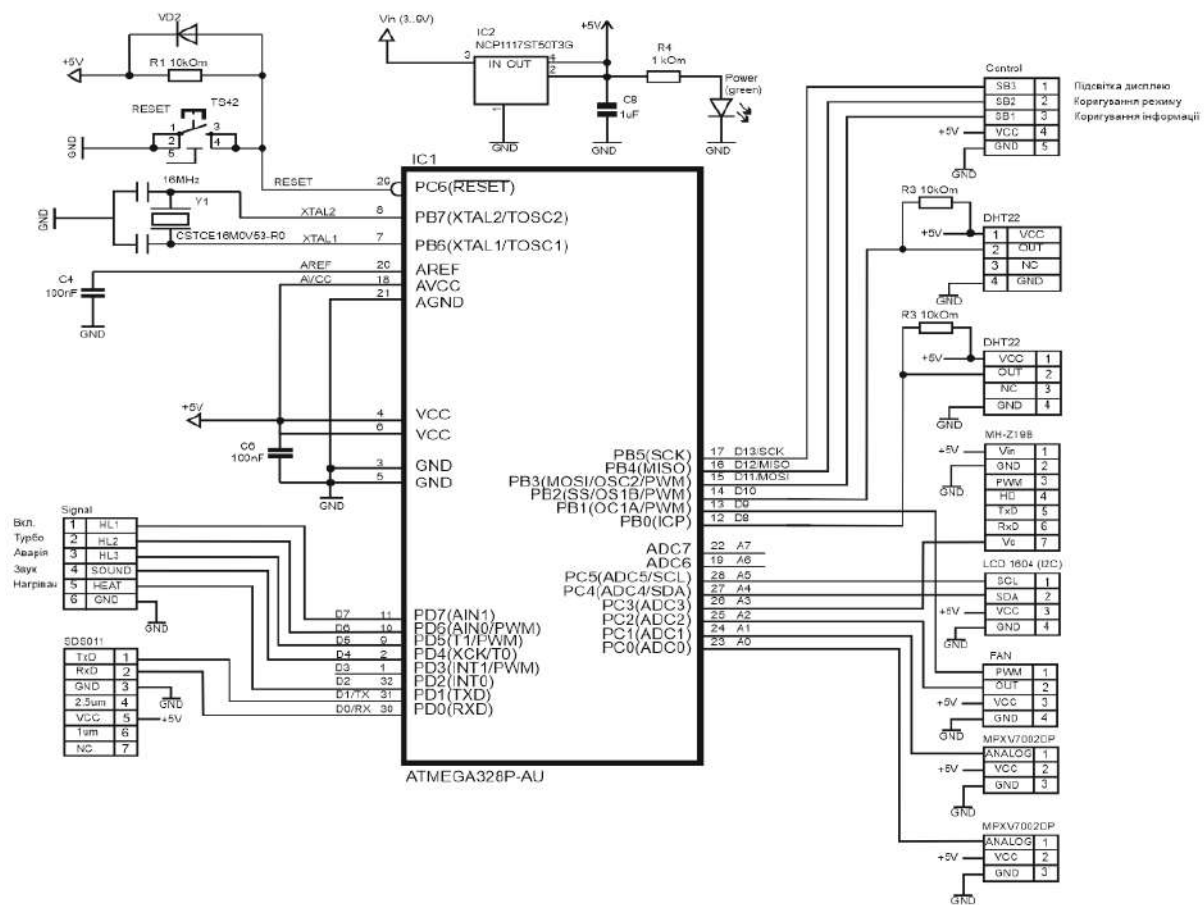


Рис. 5 – Принципова електрична схема блоку контролера «Arduino Uno R3 Strong»

Таблиця 2

Основні технічні характеристики мікропроцесора «АТmega328P-AU»

Ядро	8-бітний AVR
Частота процесора AVR	max 20МГц
Пам'ять	
EEPROM (ППЗП)	1 Кб
SRAM (ОЗП)	2 Кб
FLASH ROM	32 Кб
Таймери:	
8bit	2
16bit	1
RTC\Real Time Clock (реальний час)	1
PWM (ШИМ-перетворювачі 8bit, вихід)	6
Загальна кількість портів входу/виходу:	23
Аналогові, по 10bit (вхід)	8
Послідовний UART / Serial	1
Послідовний SPI Master/Slave	1
Послідовний I ² C	1
Цифрові входи\виходи	12
Живлення плати «Arduino Mega 2560»	1,8-5,5 В

В модулі «Arduino Uno R3 Strong» використано мікроконтролер «АТmega328P-AU» в корпусі TQFP-32, що означає, що він має 32 контакти в квадратному корпусі (SMD-тип для поверхневого монтажу). Ці контакти включають в себе контакти живлення і вводу/виводу. Біль-

шість контактів є багатфункціональними, що означає, що один і той же контакт може використовуватися в різних режимах в залежності від того, як він налаштований в програмному забезпеченні. Це зменшує необхідну кількість виводів, оскільки мікроконтролеру не потрібно окремих виводів для кожної функції.

Максимальна частота роботи мікроконтролера «ATmega328P-AU» сягає 20 МГц. Керамічний резонатор 16 МГц (CSTCE16M0V53-R0) підключається до портів мікроконтролера XTAL1 і XTAL2. Для роботи мікроконтролера на максимальній тактовій частоті (20 МГц) напруга живлення має бути не менше 4,5 В.

Живлення мікроконтролера може виконуватись через роз'єм micro-USB або через клеми підключення джерела постійного струму. Для живлення мікроконтролера може бути використане джерело постійного струму з напругою від 3 до 9 В. Стабілізація напруги на рівні 5 В забезпечується регулятором NCP1117ST50T3G. Для фільтрації «шуму» джерела живлення додані конденсатори C4 і C6 по 100 нФ. Конденсатори передають височастотні «шумові» сигнали на землю з низьким опором. Для захисту від електростатичного розряду від RESET до Vcc встановлено діод VD2. Також для запобігання помилковому скиданню в «шумному» середовищі використано резистор 10 кОм.

Мікроконтролер «ATmega328P-AU» має три порти: PORTC, PORTB і PORTD. Всі контакти цих портів можуть використовуватися для цифрового вводу-виводу загального призначення або для альтернативних функцій. Контакти PORTC від A0 до A5 можуть бути входами АЦП. Також є кілька контактів, які можна налаштувати як вихід ШІМ (PWM).

Сигнал від тахометра вентилятора надходить на контакт A2 контролера. Цей сигнал порівнюється з відповідним значенням у програмі (значення залежить від режиму роботи пристрою). На основі цього порівняння останній виробляє сигнал ШІМ для керування частотою обертання крильчатки вентилятора. Сигнал ШІМ надходить на контакт D9.

Для відображення інформації про роботу пристрою очищення повітря використано рідкокристалічний дисплей LCD 1604, що підключений до модуля «Arduino Uno R3 Strong» через інтерфейс I2C до контактів A4 (SDA) та A5 (SCL). I2C (Inter-Integrated Circuit) – послідовна шина даних, що використовує дві двонаправлені лінії, які підтягнуті до напруги живлення та керувані через відкритий колектор або відкритий сток – послідовна лінія даних (Serial DA) та послідовна лінія тактування (Serial CLock).

Аналоговий сигнал від датчика концентрації CO₂ надходить на контакт A3, де за допомогою модуля АЦП перетворюється у цифровий вигляд та порівнюється із заданим граничним значенням. В разі перевищення граничного значення на дисплеї відображається повідомлення «УВАГА!», «CO₂».

Інформація про температуру та вологість повітря в навколишньому середовищі та в гофрованому повітропроводі збирається за допомогою датчиків DHT22. Датчик DHT22 складається з двох частин – емнісного датчика температури і гігрометра. Перший використовується для вимірювання температури, другий – для вологості повітря. Чіп, що знаходиться всередині, виконує аналого-цифрові перетворення і видає цифровий сигнал, який зчитується за допомогою мікроконтролера. Датчики DHT22 підключені до контактів D8, D10.

Датчик наявності пилу SDS011 (лазерний) у повітропроводі підключений через контакти D0 і D1 (RX, TX) до послідовного інтерфейсу UART (універсальний асинхронний приймач/передавач). В разі наявності пилу в гофрованому повітропроводі на дисплеї висвітлюється інформація – «УВАГА!», «ПИЛ».

Для вибору режиму роботи пристрою та коригування інформації використані кнопки, що підключені до контактів D11, D12, D13.

Для швидкого інформування користувача використано світлодіодні індикатори (D5, D6, D7) та гучномовець (D4).

Для регулювання витрати повітря був використаний тахометричний перетворювач з аксіальною турбіною, створений на основі малогабаритного осьового безколекторного вентилятора загального призначення типу HA4010V4 [13]. Його відмінністю є наявність левітаційної магнітної системи («Magnetic Levitation System» [14]), котра нейтралізує власну вагу ротора і стабілізує його положення незалежно від просторового розташування, що виключає вібрацію в роботі вентилятора та дозволяє збільшити термін безаварійної роботи до 60000 годин при 40°C та 65% вологості [13]. У вентиляторах зазначеного типу положення ротора (крильчатки з 4-полюсним

(N-S-N-S) кільцевим магнітом визначається датчиком Холла, вбудованим до спеціальної мікросхеми типу «FS276», внутрішні комутатори якої використовуються для комутації обмоток збудження нерухомого статора. На виходах мікросхеми формуються два протифазних імпульси, кожен з яких може бути використаний для формування тахометричного сигналу. Для використання вентилятора «HA4010V4» в якості тахометра важливо не допустити протікання струму через обмотки збудження L1 і L2 (рис. 6, а), тобто перешкодити створенню магнітного поля в статорі, а, з іншого боку, зберегти ланцюг живлення мікросхеми D1, яке здійснюється через ті ж самі обмотки. Поставлена задача була вирішена заміною обмоток збудження статора резисторами R1 і R2 (рис. 6, б).

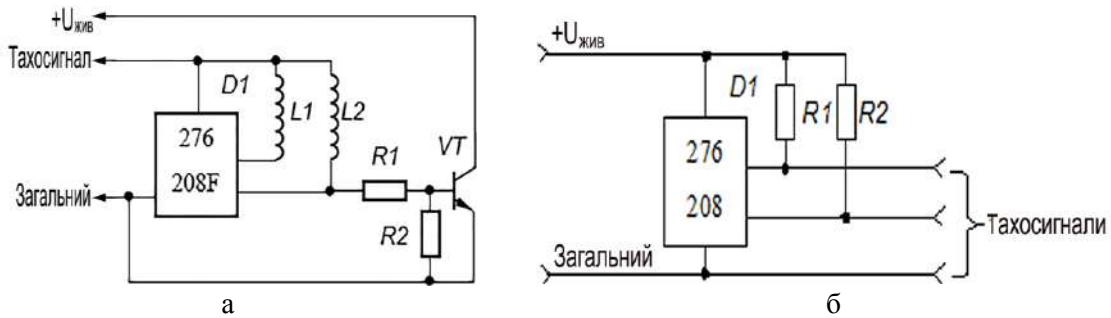


Рис. 6 – Схеми включення безколекторного вентилятора HA4010V4: а – звичайного; б – модернізованого

Лабораторні випробування працездатності блоку управління фільтрувального респіра-тора з примусовою подачею повітря. Проведення лабораторної перевірки працездатності макету блоку управління фільтрувального респіра-тора з примусовою подачею повітря проводили на спеціальному стенді (рис. 7).

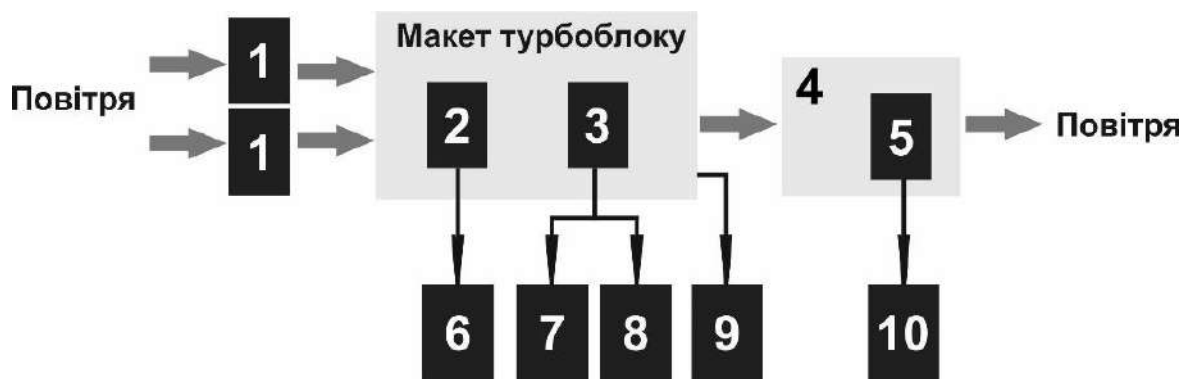


Рис. 7 – Блок-схема стенду для лабораторних випробувань макету блоку управління: 1 – імітатори опору повітряного потоку фільтрів; 2 – вентилятор; 3 – тахометричний датчик витрати повітря; 4 – гнучкий трубопровід для вимірювання швидкості потоку повітря; 5 – датчик анемометра; 6 – блок живлення; 7 – осцилограф; 8 – частотомір; 9 – диференціальний манометр; 10 – блок управління анемометром «DT-8880»

Блок-схема випробувального стенду представляє собою послідовне з'єднання фільтрів, спонукача витрати повітря, таходатчика, гофрованого трубопроводу, в якому розміщувався анемометр. Контроль за частотою обертання таходатчика і формою вихідних сигналів здійснювали за допомогою частотоміра електронно-лічильного «ЧЗ-57» і осцилографа «С1-94», відповідно. Швидкість повітряного потоку і перепад тиску вимірювали анемометром «DT-8880» (діапазон вимірів 0,1÷25,0 м/с; роздільна здатність 0,01 м/с; відносна похибка ±5%) і електронним дифманометром «Testo 512». Температуру повітря і атмосферний тиск контролювали, відпові-

дно, барометром-анероїдом «БАММ-1» (відносна похибка $\pm 0,8$ мм рт. ст.) та термометром «ТЛ-02» (відносна похибка $\pm 0,5^\circ\text{C}$). Для імітації зростання опору повітряному потоку фільтрів в діапазоні 4-10 мБар використовували спеціальний регулювальний конусоподібний шибер, який приєднувався до одного з вхідних патрубків в корпусі стенду [15]. При цьому враховувалося, що опір фільтрів, як правило, не перевищує 9...10 мБар [16-18].

Результати лабораторних випробувань макету блоку управління з вентилятором «НА4010V4», які наведені у табл. 3 та на рис. 8, показують, що необхідний рівень витрати повітря (не менш ніж 150-160 $\text{дм}^3/\text{хв}$) забезпечується у повному обсязі, а залежність частоти обертання крильчатки вентилятора має лінійний характер. Однак при зміні опору фільтрів вказана залежність стає нелінійною (рис. 9) і при досягненні опору повітряного потоку 7-7,5 мБар, витрата повітря падає менше 150 $\text{дм}^3/\text{хв}$, що є недопустимим і вимагає включення додаткового каналу для зменшення опору фільтрів.

Таблиця 3

Результати випробувань макета з вентилятором «НА4010V4»

Напруга живлення вентилятора, В	Частота обертання вентилятора, Гц	Швидкість повітряного потоку м/с	Об'ємна витрата повітря $\text{дм}^3/\text{хв}$	Перепад тиску на вході турбоблоку, мБар
вентилятор «НА4010V4» (звичайний)				
9,00	32,0	0,83	191,6	4,5
10,00	56,3	1,00	230,8	6,0
11,02	70,4	1,15	265,4	7,0
12,03	80,5	1,27	293,1	8,0
12,99	89,6	1,34	309,26	8,50
14,00	96,4	1,41	325,41	9,50
вентилятор «НА4010V4» (модернізований)				
10,92	33,1	0,49	152,3	4,0
11,99	51,6	0,55	177,7	4,5
13,06	57,8	0,59	191,6	5,0
13,23	66,5	0,6	203,1	5,0
13,82	73,8	0,63	210,0	5,4

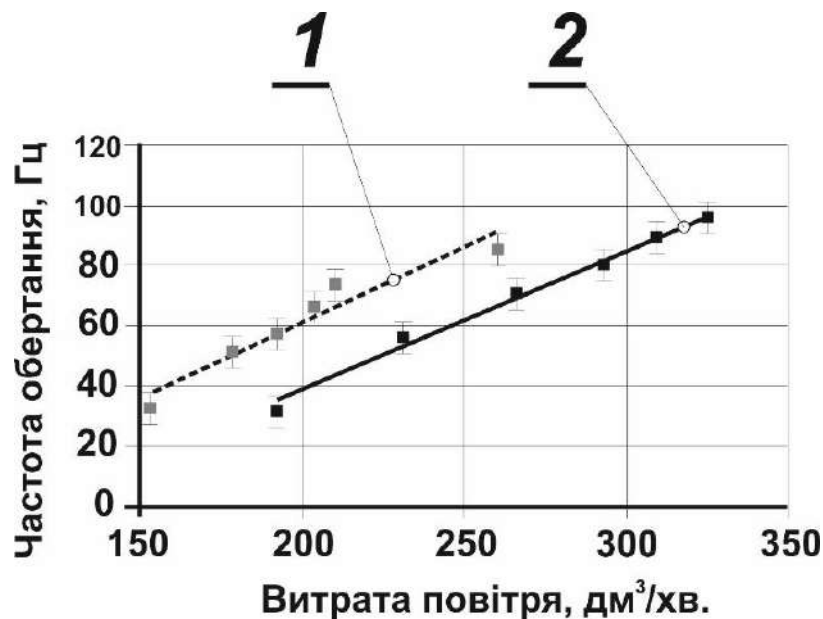


Рис. 8 – Графіки залежностей витрати повітря від частоти обертання вентилятора «НА4010V4» немодернізованого (1) і модернізованого (2) з заміною обмоток збудження статора резисторами

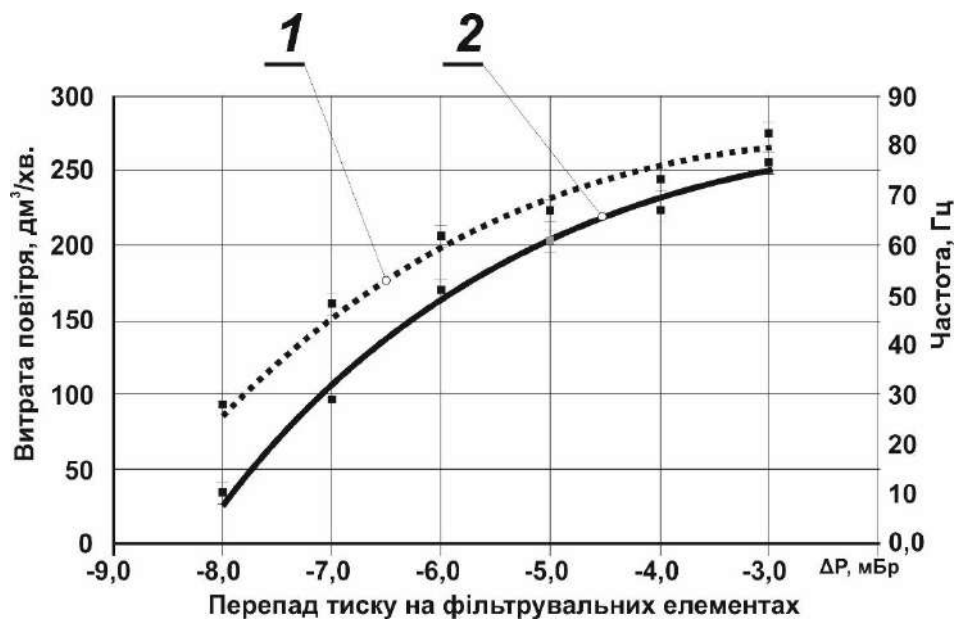


Рис. 9 – Графіки залежностей витрати повітря і частоти обертання вентилятора «НА4010V42 не модернізованого (1) і модернізованого (2) з заміною обмоток збудження статора резисторами від зміни величини опору фільтрів

З початку 90-х рр. минулого сторіччя стали активно розвиватись респіратори і протигази з механічним нагнітанням повітря в підмасковий або підшоломний простір через фільтрувальні елементи («Powered air purifying respirators» (PAPR)). Значною мірою поява таких моторових повітрянагнітальних фільтрувальних пристроїв (МПФП) [19] обумовлена тим, що за більш ніж столітній період конструювання респіраторів так і не вдалося створити універсальну маску зі смугою обтюрації, яка б на 100 відсотків щільно прилягала до обличчя будь-якого користувача [20]. Застосування МПФП, окрім зменшення впливу якості смуги обтюрації на захисні властивості ЗІЗОД та значного полегшення режиму дихання в порівнянні з використанням традиційних фільтрувальних ЗІЗОД, дозволяє створити комплексний ЗІЗ органів дихання, зору і слуху, голови та плечового поясу користувача. Оскільки ЗІЗОД з позитивним тиском створюють більш надійний захист при зменшеному опорі диханню, на даний час саме вони складають основну частку пристроїв з механічним нагнітанням повітря, що серійно випускаються для використання в умовах з особливо важкими умовами праці. Відомо [21, 22], що рухова активність людини та інтенсивність дихання взаємопов'язані: поглиблення і почастишення дихання в процесі роботи призводять до збільшення миттєвих об'ємних витрат повітряних потоків на фазах дихального циклу, зокрема їх максимальні величини. Так, якщо в режимі спокою вони дорівнюють приблизно $25\div 30$ дм³/хв, а при звичайній ходьбі людина споживає 50 дм³/хв (частота дихання 25 циклів/хв, разовий обсяг вдихуваного повітря 2 дм³), то при важких фізичних навантаженнях легенева вентиляція сягає 157 дм³/хв (максимальна величина) [22]. Отже, обсяг повітря, що прокачується через фільтр ЗІЗОД за допомогою МПФП, повинен становити не менше 60 дм³/хв. Тому виникла необхідність у забезпеченні моніторингу за витратою повітря саме за рахунок запровадження блоку управління з наявністю багатофункціональної системи датчиків, встановлених в корпусі пристрою. Блок управління є нескладним у виготовленні, має невисоку вартість, забезпечує повторюваність операцій і задані показники працездатності з вентилятором «НА4010V4». Разом з тим існує необхідність подальших досліджень, оскільки на величину витрати повітря значно впливають різноманітні домішки у повітряному потоці, які призводять до підвищеного зносу пар тертя і тим самим погіршують працездатність. Однак в даному випадку, враховуючи той факт, що в блоці управління вентилятор розташовується після досить ефективних газопилозахисних фільтрів, його запиленість можна вважати незначною [23]. В якості фільтрувальних елементів можна застосовувати стандартні протипилові, протигазові або комбі-

новані фільтри; обґрунтування їх вибору базується на розумінні величин об'ємних витрат повітря на фазах дихального циклу.

Основою технологічних передумов створення подібних блоків є досягнення в області конструювання малогабаритних безшумних турбовентиляторів, джерел електроживлення до них, а також розвиток мікроелектронних і мікромеханічних пристроїв, що дозволили суттєво зменшити масо-габаритні характеристики конструкції в цілому і оптимізувати дихальний режим в новому поколінні ЗІЗОД. В той же час більшість перетворювачів забезпечують точність вимірювання лише в тому випадку, коли розподіл швидкості в перерізі трубопроводу сформовано і відповідає режиму течії. Наявність в гофрованому трубопроводі місцевих опорів і, отже, деформації потоку призводить до збільшення похибки вимірювання. Наприклад, показання турбінного витратоміра можуть змінитися до 10% при наявності коліна перед перетворювачем в залежності від радіуса коліна і відстані між ним і перетворювачем.

Висновки

1. Запропонована конструкція фільтрувального респіратора з примусовою подачею повітря, в якому введений новий елемент – блок контролю параметрів повітряного потоку (об'єм, швидкість, температура, вологість), який надходить у підмасковий простір. Це дозволяє забезпечити необхідний об'єм повітря у підмасковий простір фільтрувального респіратора за рахунок управління кількістю обертів вентилятора у заданому діапазоні з врахуванням частоти та глибини дихання користувача в залежності від фізичного навантаження.

2. Встановлено, що об'єм повітряного потоку, який потрапляє у підмасковий простір до органів дихання користувача, лінійно залежить від частоти обертання крильчатки вентилятора, однак при досягненні опору повітряному потоку через фільтри більше 7-7,5 мБар залежність стає нелінійною, що пов'язано зі зміною характеру фізичного навантаження.

3. Практична цінність полягає у розробці удосконаленої конструкції фільтрувального респіратора з примусовою подачею повітря, який відрізняється від аналогів додатковим блок-контролем за параметрами повітряного потоку, який забезпечує контроль захисних властивостей фільтрів в результаті обробки даних системи датчиків, встановлених в корпусі пристрою.

Перелік використаних джерел:

1. Tannahill S.N. Workplace protection factors of HSE approved negative pressure full facepiece dust respirators during asbestos stripping: preliminary findings / S.N. Tannahill, R.J. Willey, M.H. Jackson // *The Annals of Occupational Hygiene*. – 1990. – № 34 (6). – Pp. 547-552. – Mode of access: DOI: [10.1093/annhyg/34.6.547](https://doi.org/10.1093/annhyg/34.6.547).
2. Wood G.O. Estimating Reusability of Organic Air-Purifying Respirator Cartridges / G.O. Wood, J.L. Snyder // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. – 2011. – № 8 (10). – Pp. 609-617. – Mode of access: DOI: [10.1080/15459624.2011.606536](https://doi.org/10.1080/15459624.2011.606536).
3. Петрачкова Н.М. Анализ эффективности средств индивидуальной защиты горнорабочих в зимних условиях / Н.М. Петрачкова // *Научные исследования и разработки молодых ученых*. – 2014. – № 1. – С. 106-109.
4. Гудков С.В. Изолирующие дыхательные аппараты и основы их проектирования : учебное пособие / С.В. Гудков, С.И. Дворецкий, С.Б. Путин, В.П. Таров. – М. : Машиностроение, 2008. – 188 с.
5. Mang C. Customized design and 3D printing of face seal for an N95 Filtering Facepiece Respirator / C. Mang, L. Hui, S. Shengnan, W. Yu, Y. Quan // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. – 2017. – № 15 (3). – Pp. 226-234. – Mode of access: DOI: [10.1080/15459624.2017.1411598](https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1411598).
6. Боровский Е. Новые датчики газа фирмы Figaro / Е. Боровский // *Компоненты и технологии*. – 2015. – № 1. – С. 122-124.
7. Barret L.W. Aerosol Loading Performance of Electret Filter Media / L.W. Barret, A.D. Rousseau // *American Industrial Hygiene Association Journal*. – 2010. – № 59 (8). – Pp. 532-539. – Mode of access: DOI: [10.1080/15428119891010703](https://doi.org/10.1080/15428119891010703).
8. Three-dimensional recording of the human face with a 3D laser scanner / L. Kovacs, A. Zimmermann, G. Brockmann, M. Gühring, H. Baurecht, N.A. Papadopoulos, K. Schwenzer-Zimmerer,

- R. Sader, E. Biemer, H.F. Zeilhofer // *Journal of Plastic Reconstructive & Aesthetic Surgery*. – 2006. – № 59 (11). – Pp. 1193-1202. – Mode of access: DOI: [10.1016/j.bjps.2005.10.025](https://doi.org/10.1016/j.bjps.2005.10.025).
9. СОУ МНС 75.2-00013528-002:2010. Стандарт МНС України. Безпека у надзвичайних ситуаціях. Фільтрувальні засоби індивідуального захисту органів дихання населення у надзвичайних ситуаціях. Класифікація й загальні технічні вимоги. – Введ. 2010-03-15. – К. : МНС, 2010. – 15 с.
 10. Designing an improved respirator for automotive painters / A.M.J.A. Gutierrez, M.D. Galang, R.R. Seva, M.C. Lu, D. Rose, S. Ty // *International Journal of Industrial Ergonomics*. – 2014. – № 44 (1). – Pp. 131-139. – Mode of access: DOI: [10.1016/j.ergon.2013.11.004](https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.11.004).
 11. Product design enhancement using apparent usability and affective quality / R.R. Seva, K. Grace, T. Gosiaco, M.C. Eurice, D. Santos, D.M.L. Pangilinan // *Applied Ergonomics*. – 2011. – № 42 (3). – Pp. 511-517. – Mode of access: DOI: [10.1016/j.apergo.2010.09.009](https://doi.org/10.1016/j.apergo.2010.09.009).
 12. Кириллов В.Ф. О средствах индивидуальной защиты органов дыхания работающих (обзор литературы) / В.Ф. Кириллов, А.А. Бучнев, А.В. Чиркин // *Медицина труда и промышленная экология*. – 2013. – № 4. – С. 25-31. – Mode of access: DOI: [10.17686/sced_rusnauka_2013-1033](https://doi.org/10.17686/sced_rusnauka_2013-1033).
 13. UL 2034. Standard for Single and Multiple Station Carbon Monoxide Alarms. – Publ. 2017-03-01. – Underwriters Laboratories, 2017. – Mode of access: <https://standardscatalog.ul.com/ProductDetail.aspx?productId=UL2034>.
 14. ДСТУ EN 50291-1:2015 (EN 50291-1:2010, IDT). Сигналізатори оксиду вуглецю для житлових споруд. Частина 1. Методи випробування та технічні вимоги. – Введ. 2016-01-01. – К. : Держстандарт України, 2016. – 23 с.
 15. Попов С.А. Физические аспекты применения лопастей обратной стреловидности на осевых вентиляторах / С.А. Попов, М.Х. Ву, Ю.А. Рыжов // *Электронный журнал «Труды МАИ»*. – 2013. – № 64. – С. 1-24.
 16. Кремлёвский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. – СПб. : Политехника, 2002. – 409 с.
 17. Лепявко А.П. Расходомеры и счетчики жидкости и газа. Поверка и калибровка : учебное пособие. – М. : АСМС, 2005. – 102 с.
 18. Бошняк Л.Л. Тахометрические расходомеры / Л.Л. Бошняк, Л.Н. Бызов. – Л. : Машиностроение, 1968. – 212 с.
 19. Бобровников Г.Н. Теория и расчет турбинных расходомеров / Г.Н. Бобровников, Л.А. Камышев. – М. : Издательство стандартов, 1978. – 128 с.
 20. Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Справочное руководство. / П.И. Басманов, С.Л. Каминский, А.В. Коробейник, М.Е. Трубицына. – СПб. : ГИИП Искусство России, 2002. – 400 с.
 21. ДСТУ EN 14378:2006. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Фільтри протигазові і фільтри скомбіновані. Вимоги, випробування, маркування (EN 14387:2004, IDT). – Введ. 2007-10-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2005. – 14 с.
 22. ДСТУ EN 143:2003. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Протиаерозольні фільтри. Вимоги, випробування, маркування (EN 143:2000, IDT). – Введ. 2003-10-01. – Київ : Держспоживстандарт України, 2004. – 24 с.
 23. Адсорбция паров йода некоторыми адсорбентами. / В.Г. Колобродов, А.А. Саньков, Л.В. Карнацевич, П.А. Березняк, Э.И. Винокуров // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2003. – № 6 (84). – С. 114-119. – (Серия : Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение).

References:

1. Tannahill S.N., Willey R.J., Jackson M.H. Workplace protection factors of HSE approved negative pressure full facepiece dust respirators during asbestos stripping: preliminary findings. *The Annals of Occupational Hygiene*, 1990, vol. 34, no 6, pp. 541-552. doi: [10.1093/annhyg/34.6.547](https://doi.org/10.1093/annhyg/34.6.547).
2. Wood G.O., Snyder J.L. Estimating Reusability of Organic Air-Purifying Respirator Cartridges. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2011, vol. 8, no. 10, pp. 609-617. doi: [10.1080/15459624.2011.606536](https://doi.org/10.1080/15459624.2011.606536).
3. Petrachkova N.M. Analiz effektivnosti sredstv individual'noy zashchity gornorabochikh v zimnikh usloviyakh [Analysis of the effectiveness of personal protective equipment for miners in win-

- ter conditions]. *Nauchnyye issledovaniya i razrabotki molodykh uchenykh – Research and development of young scientists*, 2013, no. 1, pp. 106-109 (Rus.)
4. Gudkov S.V., Butler S.I., Putin S.B., Tarov V.P. *Izoliruyushchiye dykhatel'nyye apparaty i osnovy ikh proyektirovaniya: uchebnoye posobiye* [Isolating breathing apparatus and the basics of their design: textbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008, 188 p. (Rus.)
 5. Mang C., Hui L., Shengnan S., Yu W., Quan Y. Customized design and 3D printing of face seal for an N95 Filtering Facepiece Respirator. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2017, vol. 15, no 3, pp. 226-234. doi: **10.1080/15459624.2017.1411598**.
 6. Borovskiy E. Novyye datchiki gaza firmy Figaro [New gas sensors from Figaro]. *Komponenty i tekhnologii – Components and technologies*, 2015, vol. 1, pp. 122-124. (Rus.)
 7. Barret L.W., Rousseau A.D. Aerosol Loading Performance of Electret Filter Media. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 2010, vol. 59, no 8, pp. 532-539. doi: **10.1080/15428119891010703**.
 8. Kovacs L., Zimmermann A., Brockmann G., Gühring M., Baurecht H., Papadopulos N.A., Schwenzer-Zimmerer K., Sader R., Biemer E., Zeilhofer H.F. Three-dimensional recording of the human face with a 3D laser scanner. *Journal of Plastic Reconstructive & Aesthetic Surgery*, 2006, vol. 59, no 11, pp. 1193-1202. doi: **10.1016/j.bjps.2005.10.025**.
 9. *SOU MNS 75.2-00013528-002:2010. Bezpeka u nadzvychaynykh sytuatsiyakh. Fil'truval'ni zasoby indyvidual'noho zakhystu orhaniv dykhannya naseleenny u nadzvychaynykh sytuatsiyakh. Klasyfikatsiya y zahal'ni tekhnichni vymohy* [Standard of the Ministry for Emergencies of Ukraine SME MEU 75.2-00013528-002: 2010. Emergency safety. Filter means of individual protection of respiratory organs of the population in emergency situations. Classification and general technical requirements]. Kiev, 2011. 15 p. (Ukr.)
 10. Gutierrez A.M.J.A., Galang M.D., Seva R.R., Lu M.C., Rose D., Ty S. Designing an improved respirator for automotive painters. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2014, vol. 44, no 1, pp. 131-139. doi: **https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.11.004**.
 11. Seva R.R., Grace K., Gosiaco T., Eurice M.C., Santos D., Pangilinan D.M.L. Product design enhancement using apparent usability and affective quality. *Applied Ergonomics*, 2011, vol. 42, no. 3, pp. 511-517. doi: **10.1016/j.apergo.2010.09.009**.
 12. Kirilov V.F., Boutchnev A.A., Tchirkin A.V. O sredstvakh individual'noy zashchity organov dykhaniya rabotayushchikh (obzor literatury) [On Individual protective means for workers' respiratory organs (review of literature)]. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya – Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*, 2013, no 4, pp. 25-31. doi: **10.17686/sced_rusnauka_2013-1033**. (Rus.)
 13. UL 2034. Standard for Single and Multiple Station Carbon Monoxide Alarms. Underwriters Laboratories, 2017. Available at: <https://standardscatalog.ul.com/ProductDetail.aspx?productId=UL2034>.
 14. *DSTU EN 50291-1:2015 (EN 50291-1:2010, IDT). Syhnalizatory oksydu vuhletsyu dlya zhytlovykh sporud. Chastyna 1. Metody vyprobuvannya ta tekhnichni vymohy* [State Standard EN 50291-1:2015 (EN 50291-1:2010, IDT). Carbon monoxide detectors for residential buildings. Part 1. Test methods and technical requirements]. Kiev, Derzhstandart Ukrayiny Publ., 2016. 23 p. (Ukr.)
 15. Popov S.A., Ryzhov Y.A., Man Hieu Vu. Fizicheskiye aspekty primeneniya lopastey obratnoy strelovidnosti na osevykh ventilyatorakh [Physical aspects of the use of reverse sweep blades on axial fans]. *Elektronnyy zhurnal «Trudy MAI» – Electronic journal «Trudy MAI»*, 2013, vol. 64, pp. 1-24. (Rus.)
 16. Kremlovskiy P.P. *Raskhodometry i schetchiki kolichestva: Spravochnik* [Flowmeters and counters of quantity: Handbook]. Sankt Peterburg, Politehnika Publ., 2002. 409 p. (Rus.)
 17. Lepyavko A.P. *Raskhodometry i schetchiki zhidkosti i gaza. Poverka i kalibrovka: Uchebnoye posobiye* [Flowmeters and meters for liquid and gas. Verification and Calibration: Tutorial]. Moscow, ASMS Publ., 2005. 102 p. (Rus.)
 18. Boshnyak L.L., Byzov L.N. *Takhometricheskiye raskhodometry* [Tachometric flow meters]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1968. 212 p. (Rus.)
 19. Bobrovnikov G.N., Kamyshev L.A. *Teoriya i raschet turbinnykh raskhodomerov* [Theory and calculation of turbine flow meters]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1978. 128 p. (Rus.)
 20. Basmanov P.I., Kaminsky S.L., Korobeinik A.V., Trubitsyn M.E. *Sredstva individual'noy zash-*

- chity organov dykhaniya. Spravochnoye rukovodstvo* [Personal respiratory protection. Reference Guide]. Sankt Peterburg, GIP Art of Russia Publ., 2002. 400 p. (Rus.)
21. *DSTU EN 14378:2006 (EN 14387:2004, IDT). Zasoby indyvidual'noho zakhystu orhaniv dykhannya. Fil'try proty hazovi i fil'try skombinovani. Vymohy, vyprobuvannya, markuvannya* [State Standart EN 14387:2004 (EN 14387:2004, IDT). Respiratory protection. Gas filters and filters are combined. Requirements, tests, markings]. Kiev, Derzhspozhyvstandart Ukrayiny Publ., 2005. 14 p. (Ukr.)
22. *DSTU EN 143:2003 (EN 143:2000, IDT). Zasoby indyvidual'noho zakhystu orhaniv dykhannya. Protyaerazol'ni fil'try. Vymohy, vyprobuvannya, markuvannya* [State Standart EN 143:2003 (EN 143:2000, IDT). Respiratory protective devices. Antiaerosol filters. Requirements, tests, markings (EN 143: 2000, IDT)]. Kiev, Derzhspozhyvstandart Ukrayiny Publ., 2005. 24 p. (Ukr.)
23. Kolobrodov V.G., Sankov A.A., Karnatsevich L.V., Bereznyak P.A., Vinokurov E.I. Adsorbtsiya parov yoda nekotorymi adsorbentami [Iodine vapor adsorption by some adsorbents]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnykh povrezhdeniy i radiatsionnoye materialovedeniye – Problems of atomic science and technology. Series: Physics of Radiation Effects and Radiation Materials Science*, 2003, vol. 6, no 84, pp. 1193-1202. (Rus.)

Рецензент: О.Є. Кружило

д-р техн. наук, старш. наук. співроб., Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці

Стаття надійшла 25.09.2020

УДК 622.235.6:622.234.57:622.807

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226208

© Савельєв Д.В.¹, Столбченко О.В.², Чеберячко І.М.³

ОЦІНКА ВМІСТУ НАДМАЛИХ ЧАСТИНОК В ПРОДУКТАХ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД НАСИЧЕНИХ ПОВЕРХНЕВО- АКТИВНИМИ РЕЧОВИНАМИ

Дрібнодисперсні фракції пилу, з розміром часток менше 3 мкм, утворюються в повітрі рудникової атмосфери під час вибуху, що є недопустимим по санітарним нормам умов праці робочих. З використанням рентгеноструктурного аналізу вивчено гранулометричний склад пилоподібних частинок пісковиків і вугілля, оброблених поверхнево-активними речовинами (ПАР). Зміна механізму руйнування вуглепородного масиву під дією ПАР сприяє зниженню концентрації пилу за рахунок швидкого осідання під дією сил гравітації.

Ключові слова: умови праці, дрібнодисперсний пил, рентгеноструктурний аналіз, поверхнево-активні речовини.

D.V. Saveliev, O.V. Stolbchenko, I.M. Cheberiyachko. Evaluation of the ultrafine particles content in the products of destruction of rocks saturated with surfactants. The paper considers the issue of reducing the fine fraction of dust (with a particle size of less than 3 microns), which is formed in the air of the mine atmosphere during drilling-and-blasting operations. These emissions form the working conditions of workers that are not

¹ канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-0738-3273, barm1907@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-2003-4382, elena_aot@ukr.net

³ канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-6193-5729, cheberiyachko.i.m@nmu.one

permissible according to sanitary standards. These studies are aimed at developing measures to reduce the intake of fine dust into the mine atmosphere, which causes occupational diseases of miners. With the help of X-ray structural analysis, the granulometric composition of the dust-like particles of the coal-rock mass, treated with surfactants, has been studied. X-ray structural studies were carried out on DRON-3 installation according to the standard technique; Cu-K α radiation tube being used as an X-ray beam source. Rocks, the destruction of which is carried out using the energy of the explosion, served as samples; they being hard monomineral limestones with an admixture of quartz and poly-mineral sandstones including quartz, feldspars, carbonates and pyrite. Blast loads destroyed dry samples and samples weakened by the action of various surfactants. The surfactant used was 10% solution of soda ash Na $_2$ CO $_3$ and sodium bicarbonate NaHCO $_3$, milk of lime with a 18.9% calcium hydroxide concentration. Analysis of the X-ray diffraction patterns of the destruction of the samples by the explosion showed that the number of ultra-small particles in the samples significantly decreases when they are treated with a 10% sodium bicarbonate solution (Na $_2$ CO $_3$). A change in the destruction mechanism of a coal-rock mass under the action of surfactants contributes to a decrease in the concentration of dust in an underground working due to the rapid settling of dust-like particles under the influence of gravitational forces. Studies show that X-ray diffraction analysis is a reliable way to monitor the effectiveness of various types of surfactants. The results of these studies can be used to develop new, safer ways of cutting exploration and excavation workings in coal mines.

Keywords: *working conditions, fine dust, X-ray structural analysis, surfactants.*

Постановка проблеми. Руйнування гірських порід та інших твердих середовищ механічними навантаженнями, тобто дроблення і подрібнення матеріалів, знаходить широке застосування в різних галузях промисловості і становить основу багатьох технологічних процесів. Зокрема, цей процес присутній при бурінні свердловин, дробленні гірських порід буропідричним способом і подальшій переробці з утворенням частинок з великим спектром крупності. Одним з головних недоліків такого способу є утворення значної кількості дрібнодисперсного пилу (0,5-5 мкм). Цей пил вважається таким, який важко пригнічується і є найбільш небезпечним для людини, а адсорбція на його поверхні отруйних газів підвищує агресивність цього пилу і сприяє розвитку у працюючих в шахтах профзахворювань, в тому числі пов'язаних з органами дихання.

Одним з основних показників оцінки якості вибуху є ступінь подрібнення гірських порід, що залежить від багатьох факторів. Встановлено, що дрібнодисперсний пил, який утворився при виконанні вибухових робіт в тупиковій виробці, поширюється по ній під дією аеродинамічних сил вентиляційного потоку. Частково цей пил осідає по довжині виробки за рахунок явища поперечної міграції часток до поверхні виробки і процесу їх турбулентної коагуляції. При цьому ефективність осідання часток за рахунок цих явищ для умов провітрювання тупикових виробок знаходиться на рівні 3,5% на 100 п.м. виробки. Зазначені фактори не впливають істотно на стан рудникової атмосфери в період проведення підричних робіт. В результаті цього газопилова хмара при її поширенні по всій довжині виробки містить в своєму складі дрібнодисперсну фазу, що представляє особливо небезпечну загрозу для здоров'я гірників, які працюють в даній виробці і в прилеглих сусідніх виробках шахтної вентиляційної мережі.

Пилопригнічення при бурових роботах в даний час здійснюється шляхом застосування промивання, а на навантажувальних роботах – зрошенням відбитої гірничої маси. Що ж стосується вибухових робіт, то, по суті, єдиним протипиловим заходом, застосовуваним на практиці, є активне провітрювання забою. Проте, одна лише вентиляція не може служити радикальним засобом боротьби з запиленістю гірничих виробок. Тому оцінка вмісту надмалих частинок, які містяться в атмосфері гірничих виробок при буропідричних роботах, актуальна.

В даний час створено новий перспективний напрямок зменшення запиленості шахтної атмосфери з використанням способів вибухового руйнування, які засновані на цілеспрямованому зменшенні міцності середовища на контактах «вибухова речовина-порода», «породоруйнувальний інструмент-порода», при впливі на руйнування полімінерального середовища поверхнево-активними речовинами (ПАР).

Сучасні петрографічні поляризаційні мікроскопи можуть забезпечити максимальне збі-

льшення порядку $\times 2250$ при використанні 90-кратного імерсійного об'єктива і 25-кратного окуляра. Проте, хроматичні і сферичні аберації, обумовлені хвильовою природою світла, не дозволяють по оптичним константам діагностувати мінеральний склад і адекватно вимірювати розміри частинок менше 1 мкм. Крім того, при великих збільшеннях (починаючи з $\times 2000$ і вище) під мікроскопом надмалі пилоподібні частинки розміром 1 мкм і менше можуть бути сплутані з дефектами поверхні предметного скла, на якому зазвичай розміщують пробу досліджуваного пилу. У зв'язку з цим, світлооптичний метод дослідження гранулометричного складу найдрібніших пилоподібних продуктів руйнування обмежений у своїх можливостях і не дозволяє оцінити вміст цих частинок в продуктах руйнування гірського масиву і в рудниковій атмосфері.

Рентгеноструктурний аналіз може бути використаний як надійний спосіб контролю ефективності різних видів ПАР, які застосовані для зниження рівня запиленості атмосфери шахт і рудників надмалими частинками породи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1-7] наведено результати досліджень по руйнуванню гірських порід, насичених різними видами ПАР. Зокрема, детально описана кінетика насичення породного масиву поверхнево-активними речовинами, дія яких заснована на адсорбційному зниженні поверхневої енергії, що полегшує розвиток тріщин. Показано також, що насичення порід активними розчинами визначається величиною і характером пористості порід, їх початковою вологістю, типом розчину ПАР, напруженим станом масиву та ін. Крім того, досліджено можливість спрямованої зміни властивостей гірської породи, яка руйнується вибухом, шляхом насичення середовища поверхнево-активною речовиною – розчином SARMA, хімічний склад якої не приведено. Внаслідок зменшення поверхневої енергії на контактах мінеральних зерен під дією ПАР знижується міцність гірських порід і збільшується ефективність їх дроблення енергією вибуху за рахунок цілеспрямованої зміни властивостей середовища. Слід зазначити, що в даних роботах не розглядається механізм руйнування полімінерального середовища, ослабленого дією поверхнево-активних речовин, на контакті «ВР-порода», тобто відсутні дані про вплив ПАР на мінеральні компоненти, що складають гірську породу. Як показали експериментальні дослідження, вплив лугів, наприклад, Na_2CO_3 , знижує міцність кварцу в 2-5 разів. Отже, використання лужних розчинів в якості ПАР дозволяє зменшити міцність гірських порід, які вміщують кварц, і змінити механізм їх руйнування вибухом.

Ступінь подрібнення порід вибухом визначає загальну кількість пилу, що утворюється. Вона, в свою чергу, при інших рівних умовах залежить від потужності, щільності і величини заряду вибухової речовини. Як показують дослідження, в легенях при антракозі і силікозі знаходиться приблизно 95% частинок пилу розміром менше 2 мкм, 5% – 2-4 мкм і незначна кількість – понад 5 мкм. Кількість пилу, що надійшла в атмосферу і яка складається з частинок діаметром менше 10 мкм на 1 м^3 підірваної гірничої маси, становить 80-500 г. Патогенна дія пилу вугільних шахт визначається головним чином його масою, структурним складом і дисперсністю [8].

Фракційний склад зруйнованої гірської породи визначається технологією руйнування, з одного боку, і властивостями порід – з іншого. Найнебезпечнішою для здоров'я людини і безпеки робіт є фракція, яка на 70-80% складається з частинок діаметром менше 10 мкм [9].

Дослідженнями встановлено, що частка пилу, яка виникає при буропідричних роботах і надходить в гірничу атмосферу, складає від 30 до 60%. Оцінка результатів вибухового руйнування порід, які вміщують кварц (кварцити, пісковики та ін.), відібраних в ближній зоні вибуху, показала, що найдрібніші фракції (1-2 мкм) на 70-80% представлені уламками кварцу, в яких вміст мінералу кварцу в пилоподібних частинках становить від 75 до 90% і більше, із середнім розміром фракцій – 8-9 мкм [10, 11].

В даний час не розроблені достовірні методи визначення масової частки пилоподібних частинок мікронного і субмікронного розмірів в лабораторних пробах, проте представляється можливим на якісному рівні виявити їх присутність в продуктах руйнування вуглепородного масиву методом рентгеноструктурного аналізу [12]. Це дозволить здійснювати порівняльний аналіз проб вуглепородного масиву, зруйнованого динамічними навантаженнями різної інтенсивності.

Мета дослідження – методом рентгеноструктурного аналізу з високою точністю визначити масову частку пилоподібних частинок мікронного і субмікронного розмірів при порівняльному аналізі проб вуглепородного масиву, який ослаблений дією різних ПАР і зруйнований динамічними навантаженнями різної інтенсивності.

Викладення основного матеріалу. Рентгеноструктурний або дифракційний метод є, як відомо, одним з методів діагностики властивостей твердих тіл [12]. Однак, буває важко вирішити, чи складається тверде тіло з дуже дрібних кристалів або є склом з аморфною структурою. При дослідженні даним методом найменших кристалічних частинок, наприклад, частинок кварцового пилу, на рентгенівському спектрі чітко виділяється так звана зона «аморфізації». Чим більше надмалих частинок є в аналізованій пробі, тим вище інтенсивність, вимірювана, зазвичай, в імпульсах в секунду, відбитого від частинки рентгенівського пучка. На рентгеноструктурних діаграмах зона «аморфізації», яка пов'язана з надмалими частинками породного пилу, по осі абсцис обмежена значеннями кута $2\theta = 5-20^\circ$.

На сьогодні у вітчизняних лабораторіях рентгенограми досліджуваних об'єктів одержують переважно за допомогою дифрактометрів серії ДРОН. Значна частина активно функціональних приладів ДРОН після різного рівня автоматизацій та модернізацій одержали нові аналітичні можливості і зручності для користувача. Комп'ютерне управління дифрактометром, збереження та попереднє оброблення даних, можливість застосування до них деяких спеціальних програм та інформаційних баз значно підвищують якість результатів та прискорюють їх оброблення.

Рентгеноструктурні дослідження проводилися на установці ДРОН-3 за стандартною методикою, при цьому як джерело рентгенівського пучка використовувалася трубка з Cu-K_α -випромінюванням. Використано загальну рентгенооптичну схему фокусування за Брегом-Брентано, що найбільш часто використовується при дослідженнях об'єктів на дифрактометрах [12].

В якості зразків були обрані породи вугленосної товщі, руйнування яких здійснюється з використанням енергії вибуху, тобто міцні мономінеральні вапняки з невеликою кількістю домішок, зазвичай кварцу і полімінеральні пісковики, до складу яких входить кварц (50-55%), польові шпати (плагіоклаз + ортоклаз – 20-25%), карбонати (кальцит – 20-25%), слюда (переважно мусковіт – 1,2%) і пірит (марказит – не більше 1-2%).

Так як в основу рентгеноструктурного аналізу покладено закон Брега, що описує дифракцію рентгенівських променів в кристалічній речовині, то дослідження на вугіллі, яке також руйнується менш інтенсивними динамічними навантаженнями (як правило, ударними) або різанням, не проводилися, оскільки вугілля не має кристалічної структури і є аморфною речовиною.

Відібрані зразки порід кубічної форми з розміром ребра 40 ± 2 мм піддавалися вибуховому руйнуванню зарядом ВР бризантної дії масою 150 мг. Вибуховими навантаженнями руйнували сухі зразки і зразки, ослаблені дією різних ПАР: 10%-го розчину кальцинованої соди Na_2CO_3 і бікарбонату натрію NaHCO_3 , вапняне молоко – концентрації 18,9% гідроксиду кальцію. Пиловидну фракцію продуктів руйнування (0-50 мкм) вивчали після просіювання на лабораторних ситах. На рис. 1 і 2 приведені рентгенівські дифрактограми продуктів руйнування вапняку і пісковика.

Аналіз рентгенівських дифрактограм зруйнованих вибухом зразків вапняку і пісковика, оброблених різними видами ПАР, проводили шляхом порівняння сумарної інтенсивності відбитого рентгенівського пучка в зоні «аморфізації», що знаходиться в інтервалі кутів $2\theta = 5-20^\circ$. Величину сумарної інтенсивності (імпл/с) визначали на рентгенівських дифрактограмах. Результати аналізу наведено в таблиці.

Аналіз рис. 1 і 2, а також даних, наведених в таблиці, дозволив встановити наступне:

– найбільша сумарна інтенсивність відбитого рентгенівського пучка в зоні «аморфізації» ($2\theta = 5-20^\circ$) спостерігається для сухих (не оброблених ПАР) зразків, зруйнованих дією вибуху, причому, для надмалих частинок пісковика вона більш ніж в 2 рази, ніж для вапняку;

– при вибуховому руйнуванні зразків вапняку і пісковика, насичених різними видами ПАР, сумарна інтенсивність відбитого рентгенівського пучка істотно знижується. При цьому максимальне зменшення сумарної інтенсивності спостерігається для вапняку і пісковика, оброблених 10% розчином бікарбонату натрію (Na_2CO_3), в 2,34 рази для вапняку і в 4 рази для пісковика.

Оцінка обсягу надмалих частинок в продуктах руйнування вуглепородного масиву методом рентгеноструктурного аналізу в цілому показала наступне. Утворення найдрібніших частинок, розмір яких менше 1 мкм, в міцних гірських породах вуглепородного масиву, таких як вапняки і пісковики, при їх руйнуванні інтенсивними динамічними навантаженнями обумовлено особливостями механізму дії вибуху в полімінеральних середовищах. При цьому на харак-

тер руйнування полімінерального середовища основний вплив надають два фактори: перший фактор – явище розгалуження зростаючої мікротріщини на хвильовій стадії вибуху, коли швидкість росту тріщини перевищує величину, що дорівнює 0,6 швидкості поперечної хвилі в породі, яка руйнується.

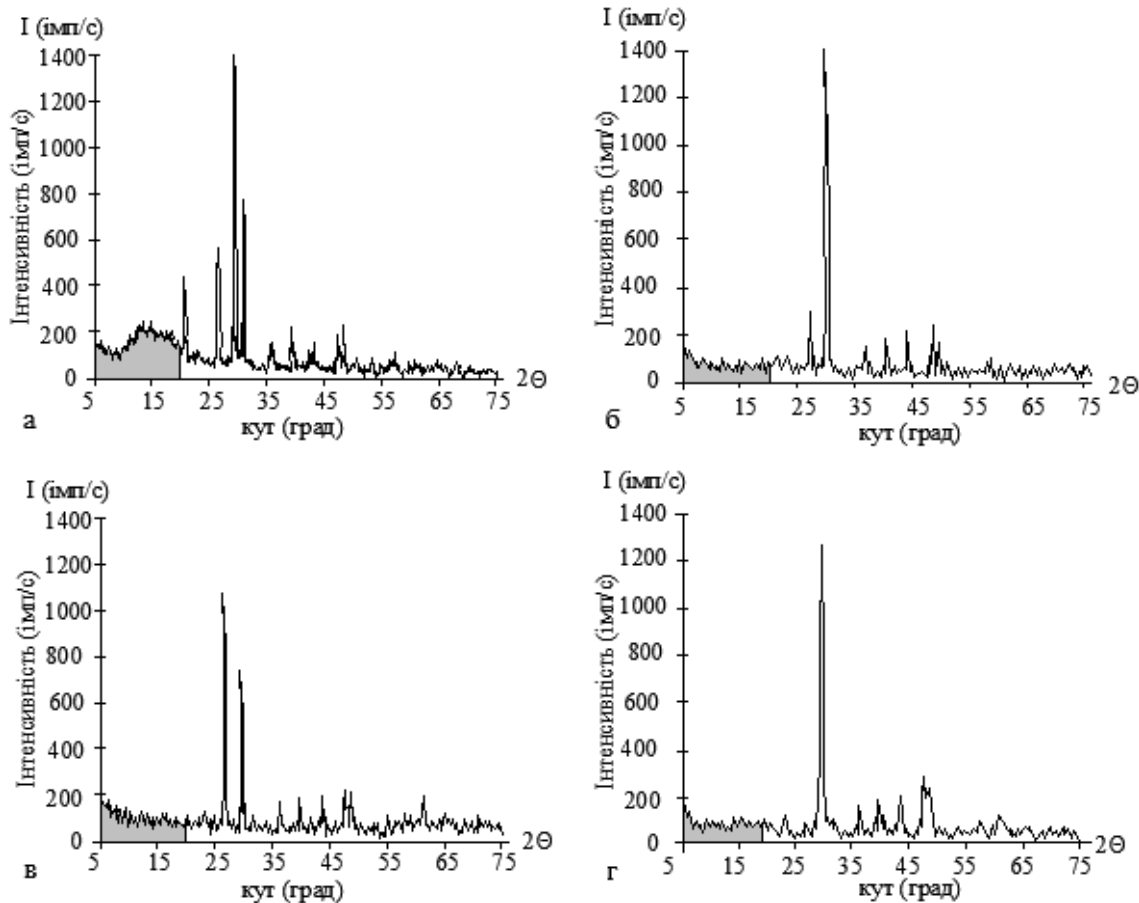


Рис. 1 – Рентгенівські дифрактограми надмалих частинок вапняку ПАТ «ДФДК» (Cu-K α -випромінювання), зруйнованого зарядом ТЕНа, масою 150 мг: а – сухий зразок; б, в – зразки, насичені 10% розчином Na $_2$ CO $_3$ і 10% розчином NaHCO $_3$, відповідно; г – зразок, насичений вапняним молоком. Затемнена область – зона «аморфізації»

Другий фактор – наявність дефектів в будові мінеральних зерен у вигляді внутрішньозернових і міжзернових мікротріщин, площин спайності мінералів, міжзернових контактів і різного роду включень (найдрібніших бульбашок газу і рідини), по яким розвиваються новоутворені поверхні руйнування.

У вапняках, як показав мікроструктурний аналіз, проведений на прозорих петрографічних шліфах, дефектами внутрішньої будови породи є, в основному, міжзернові контакти. В пісковиках дефектів внутрішньої будови значно більше і присутні вони як у вигляді контактів між зернами породоутворюючих мінералів, так і в самих мінеральних зернах у вигляді внутрішньозернових мікротріщин, площин газово-рідких включень в кварці і площин спайності в польових шпатах.

За даними роботи [13] в 1 см 3 кварцу, одного з головних породоутворюючих мінералів пісковика, може бути присутнім до 2 \times 10 9 різного роду включень (дефектів будови). Оскільки дефекти будови мінералів є однією з основних причин утворення надмалих частинок на контакті «вибухова речовина-порода», то їх сумарний обсяг в зруйнованому пісковіку повинен істотно перевищувати обсяг найдрібніших продуктів руйнування у вапняку, що підтверджується даними рентгеноструктурного аналізу.

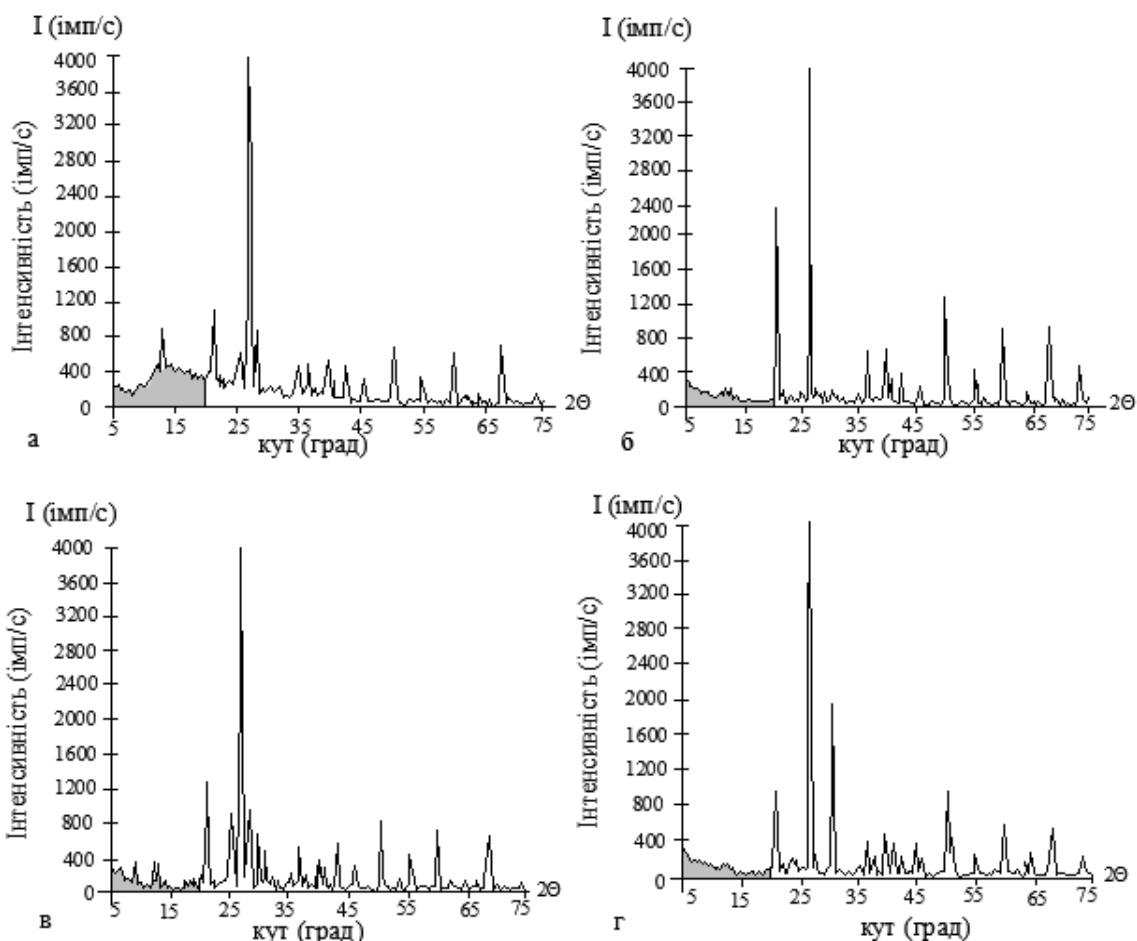


Рис. 2 – Рентгенівські дифрактограми надмалих частинок пісковика шахти Дніпрорівська (Cu-K_α-випромінювання), зруйнованого зарядом ТЕНа, масою 150 мг: а – сухий зразок; б, в – зразки насичені, 10% розчином Na₂CO₃ і 10% розчином NaHCO₃, відповідно; г – зразок, насичений вапняним молоком. Затемнена область – зона «аморфізації»

У породах, насичених ПАР, перетворення дефектів будови в тріщини при динамічному впливі на середовище, яке руйнується, найімовірніше відбувається в значній мірі по лінії контактів мінеральних зерен і, можливо, по внутрішньозерновим мікротріщинам. Внутрішньозернові дефекти будови (інтрагранулярні мікротріщини, площини спайності, т. ін.) не надають в ослабленій дією ПАР породі впливу на характер її вибухового руйнування.

Таблиця

Результати рентгеноструктурного аналізу зразків вапняку і пісковика, оброблених ПАР і зруйнованих вибухом заряду ТЕНа масою 150 мг

Тип породи і місце відбору зразка	Поверхнево-активна речовина	Сумарна інтенсивність відбитого рентгенівського пучка в зоні «аморфізації» (2θ = 5-20°), імпл/с
1	2	3
Вапняк дрібнозернистий, ПрАТ «Докучаєвський ФД комбінат», Центральний кар'єр	Сухий зразок	23377,96
	Вапняне молоко (водний розчин 18,9% Ca(OH) ₂).	12532,57
	10% розчин NaHCO ₃	14641,20
	10% розчин Na ₂ CO ₃	9998,65

Продовження таблиці

1	2	3
Пісковик дрібнозернистий, шахта «Дніпровська»	Сухий зразок	49995,91
	Вапняне молоко (водний розчин 18,9% Ca(OH) ₂).	17518,26
	10% розчин NaHCO ₃	16961,45
	10% розчин Na ₂ CO ₃	12425,96

Висновки

Застосування методу рентгеноструктурного аналізу для оцінки обсягу надмалих частинок в продуктах руйнування вуглепородного масиву дозволило встановити наступне:

– аналіз рентгенівських дифрактограм зруйнування зразків вибухом показав, що інтенсивність відбитого рентгенівського пучка в зоні «аморфізації», отже і кількість надмалих частинок, значно зменшується для зразків, оброблених 10% розчином бікарбонату натрію (Na₂CO₃). Причому, для вапняку це зменшення у 2,34 рази, а для пісковику в 4 рази, порівняно з сухими зразками;

– зміна механізму руйнування вуглепородного масиву під дією ПАР сприяє зниженню концентрації пилу в гірничій виробці, що утворюється під час проведення підричних робіт, за рахунок швидкого осідання пилоподібних частинок під дією сил гравітації і зменшенню сілікозо- і пневмоконіозонебезпечності;

– рентгеноструктурний аналіз може служити в якості одного з надійних способів контролю ефективності різних видів ПАР, що використовуються для зниження запиленості атмосфери шахт і рудників надмалими частинками породи.

Подальші дослідження в цій галузі дозволять розробляти нові більш екологічно безпечні способи проходки підготовчих і очисних виробок у вугільних шахтах.

Перелік використаних джерел:

- Кулинич В.Д. Исследование влияния поверхностно-активных веществ на прочностные характеристики скальных горных пород при различных типах воздействия / В.Д. Кулинич, В.В. Воробьев, В.Н. Чебенко // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – 2017. – Вип. 2/2017 (20). – С. 43-49.
- Жилин А.С. Использование поверхностно-активных веществ для повышения качества дробления горных пород / А.С. Жилин // Записки горного института. – Санкт-Петербургский горный университет. – 2003. – Т. 155, часть 2. – С. 62-65.
- Влияние поверхностно-активных веществ на изменение прочностных характеристик горных / Я.С. Долударева, Т.Ф. Козловская, В.Д. Лемижанская, А.И. Комир // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – 2012. – Вип. 1. – С. 8-16.
- Активизация процессов зарождения и развития трещин в поверхностно-активной среде при разработке пород невзрывчатыми разрушающими составами / О.Г. Латышев, И.С. Осипов, А.Н. Еремизин, К.А. Карасев // Известия вузов. Горный журнал. – 2012. – № 1. – С. 115-118.
- Латышев О.Г. Использование поверхностно-активных веществ в процессах бурения горных пород / О.Г. Латышев, О.О. Казак // Вектор Геонаук. – 2018. – Т. 1, № 2. – С. 29-37.
- Леушева Е.Л. Анализ способов понижения твердости горных пород и методик выбора поверхностно-активных веществ для повышения эффективности буровых работ / Е.Л. Леушева, Н.И. Николаев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 12. – С. 12-21.
- Леушева Е.Л. Методика оценки влияния поверхностно-активных веществ на эффективность разрушения горных пород при бурении скважин / Е.Л. Леушева, М.В. Турицына // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 1. – С. 237-239.
- Кременев О.Г. Закономерности дисперсного состава шахтной пыли в горных выработках угольных шахт Донбасса / О.Г. Кременев, В.Ю. Деревянский, В.А. Сергеев // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. – 2013. – № 2. – С. 152-164.

9. Mukherjee A.K., Bhattacharya S.K., Saiyed H.N. Assessment of respirable dust and its free silica contents in different Indian coalmines / A.K. Mukherjee, S.K. Bhattacharya, H.N. Saiyed // *Industrial health*. – 2005. – № 43. – Pp. 277-284.
10. Уменьшение пылегазового загрязнения атмосферы при производстве массовых взрывов на карьерах / И.Т. Мислибаев, Ш.Ш. Заиров, А.Б. Тухташев, М.Ж. Норматова // *Известия ВУЗов. Горный журнал*. – 2017. – № 2. – С. 39-43.
11. Rai R. Determination of dust generation potential number using rock properties / R. Rai, S. Gupta, S. Rattan // *Journal of Mines, Metals & Fuels*. – 2007. – № 53. – Pp. 65-68.
12. Данильченко С.М. Рентгенодифракційні методи дослідження кристалічних матеріалів / С.М. Данильченко, В.М. Кузнецов, І.Ю. Проценко. – Суми : Сумський державний університет. – 2019. – 135 с.
13. Вегман Е.Ф. Кристаллография, минералогия, петрография и рентгенография / Е.Ф. Вегман, Ю.Г. Руфанов, Н.Н. Федорченко. – М. : Металлургия, 1990. – 262 с.

References:

1. Kulinich V.D., Vorob'ev V.V., Chebenko V.N. Issledovanie vlijanija poverhnostno-aktivnyh veshhestv na prochnostnye harakteristiki skal'nyh gornyh porod pri razlichnyh tipah vozdeystvija [Study of the effect of surfactants on the strength characteristics of rocky rocks under various types of impact]. *Suchasni resursoenergozberigajuchi tehnologii girnichogo virobniictva – Modern resource-saving technologies of mining production*, 2017, no. 2/2017 (20), pp. 43-49. (Rus.)
2. Zhilin A.S. Ispol'zovanie poverhnostno-aktivnyh veshhestv dlja povyshenija kachestva droblenija gornyh porod [The use of surfactants to improve the quality of rock crushing]. *Zapiski gornogo instituta – Journal of Mining Institute*, 2003, no. 155/2, pp. 62-65. (Rus.)
3. Doludareva Ja.S., Kozlovskaja T.F., Lemizhanskaja V.D., Komir A.I. Vlijanie poverhnostno-aktivnyh veshhestv na izmenenie prochnostnyh harakteristik gornyh porod [Influence of surface-active substances on the change of strength properties of rocks]. *Suchasni resursoenergozberigajuchi tehnologii girnichogo virobniictva – Up-to-date resource- and energy – saving technologies in mining industry*, 2012, no. 1, pp. 8-16. (Rus.)
4. Latyshev O.G., Osipov I.S., Eremizin A.N., Karasev K.A. Aktivizacija processov zarozhdenija i razvitija treshhin v poverhnostno-aktivnoj srede pri razrabotke porod nevzryvchatymi razrushajushhimi sostavami [Activation of the processes of initiation and development of cracks in a surface-active medium during the development of rocks with non-explosive destructive compositions]. *Izvestiia vuzov. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2012, no. 1, pp. 115-118. (Rus.)
5. Latyshev O.G., Kazak O.O. Ispol'zovanie poverhnostno-aktivnyh veshhestv v processah burenija gornyh porod [The use of surfactants in the process of drilling rocks]. *Vektor Geonauk – Vector of Geosciences*, 2018, no. 2. pp. 29-37. (Rus.)
6. Leusheva E.L. Nikolaev N.I. Analiz sposobov ponizhenija tverdosti gornyh porod i metodik vybora poverhnostno-aktivnyh veshhestv dlja povyshenija jeffektivnosti burovnyh rabot [Analysis of methods for lowering the hardness of rocks and methods for selecting surfactants to improve the efficiency of drilling operations]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologija, neftegazovoe i gornoe delo – Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2014, no. 12, pp. 12-21. (Rus.)
7. Leusheva E.L. Metodika ocenki vlijanija poverhnostno-aktivnyh veshhestv na jeffektivnost' razrushenija gornyh porod pri burenii skvazhin [Methodology for assessing the effect of surfactants on the efficiency of destruction of rocks when drilling wells]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' – Mining informational and analytical bulletin*, 2013, no. 1, pp. 237-239. (Rus.)
8. Kremenev O.G., Derevjanskij V.Ju., Sergeev V.A. Zakonomernosti dispersnogo sostava shahtnoj pyli v gornyh vyrabotkah ugol'nyh shaht Donbassa [Regularities of the dispersed composition of mine dust in the mine workings of Donbass coal mines]. *Sposoby i sredstva sozdaniija bezopasnyh i zdorovyh uslovij truda v ugol'nyh shahtah – Ways and means of creating safe and healthy working conditions in coal mines*, 2013, no. 2, pp. 152-164. (Rus.)
9. Mukherjee A.K., Bhattacharya S.K., Saiyed H.N. Assessment of respirable dust and its free silica contents in different Indian coalmines. *Industrial health*, 2005, no. 43, pp. 277-284.

10. Mislibaev I.T., Zairov Sh.Sh., Tuhtashev A.B., Normatova M.Zh. Umen'shenie pylegazovogo zagrjaznenija atmosfery pri proizvodstve massovyh vzryvov na kar'erah [Reduction of dust and gas pollution of the atmosphere during the production of massive explosions in open pits]. *Izvestiia vuzov. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2017, no. 2, pp. 39-43. (Rus.)
11. Rai R., Gupta S., Rattan S. Determination of dust generation potential number using rock properties. *Journal of Mines, Metals & Fuels*, 2007, no. 53, 65-68.
12. Danyl'chenko S.M., Kuznecov V.M., Procenko I.Ju. *Rentgenodyfrakcijnij metody doslidzhennja krystalichnyh materialiv* [X-ray diffraction methods for the study of crystalline materials]. Sumy, Sums'kyj derzhavnyj universytet Publ., 2019. 135 p. (Ukr.)
13. Vegman E.F., Rufanov Ju.G., Fedorchenko N.N. *Kristallografija, mineralogija, petrografija i rentgenografija* [Crystallography, mineralogy, petrography and radiography]. Moscow, Metallurgija Publ., 1990. 262 p. (Rus.)

Рецензент: В.І. Голінько
д-р техн. наук, проф., НТУ «ДП»

Стаття надійшла 02.11.2020

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.223.2

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226210

© Кіріцева О.В.¹, Клецька О.В.², Іванченко Д.А.³,
Ігнатова А.С.⁴**МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАГОНІВ
НА МЕТАЛУРГІЙНОМУ КОМБІНАТІ**

У статті розглянуті особливості знаходження рухомого складу, який прибуває з зовнішньої мережі на металургійний комбінат. Його просування від «вхідної» станції до «вихідної» розбито поелементно для вивчення та аналізу «слабких місць», які впливають на збільшення часу знаходження вагонів на підприємстві поза встановленим нормативом. Детально розглянуті та проаналізовані операції за всіма багатofункціональними залізничними станціями промислового підприємства, на яких перебувають вантажні вагони. Усі дії з вагонами представлені у вигляді математичної моделі, цільова функція якої складається з суми операцій, які були виконані з вантажними вагонами за кожною станцією їх просування, а також затрат, використаних за ці операції. Запропонована модель дозволяє розраховувати витрати за вагон при урахуванні часу його знаходження на коліях виробничого комбінату. Функція має елементи розгалуження для коректного підрахунку витрат за різними обставинами, які виникають у роботі підприємства. Виявлені причини, які впливають на перепростой вагонів зверх нормативу і, як наслідок цього явища, збільшення вартості за використання вантажними вагонами.

Ключові слова: металургійне підприємство, рухомий склад, вантажний вагон, експлуатаційна робота, залізнична станція, спрощена модель, цільова функція.

O.V. Kiritseva, O.V. Kletska, D.A. Ivanchenko, A.S. Ignatova. Model of cars stay time determination at a metallurgical plant. The article considers the peculiarities of stay time of the rolling stock that arrives from the external network at the metallurgical plant. Its advance from the «input» station to the «output» is broken down element by element to study and analyze the «weak points» that result in the increase of the stay time of the cars at the enterprise above the established standard. The operations at all multifunctional railway stations of the industrial enterprise, where freight cars are located, have been considered and analyzed in detail. All the actions with the wagons are represented as a mathematical model, the objective function of which consists of the sum of operations that were performed with the freight wagons at each station of their advance, as well as the expenses for these operations. According to the methodology of functional-cost analysis, certain technical decisions must be made on the basis of total production and transport costs for one cycle of cargo processing and their total value for the entire volume. In doing so all production resources involved in cargo processing, the entire volume of transport work, as well as the technological time and the idle time of the car have been taken into account. The performed researches are based on the method of

¹ ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-2481-5883, evkiritseva@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-4682-860X, gurao@ukr.net

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ukrsart.erps@gmail.com

⁴ студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, 88ignatova88@gmail.com

mathematical statistics for the analysis of the main operational indicators of the transport of the metallurgical plant, the method of linear regression in the form of a bivariate normal distribution law. The proposed model makes it possible to calculate the expenses for the car, if its stay time on the tracks of the production plant is taken into account. The function has branching elements for the correct calculation of the expenses for various circumstances that arise in the work of the enterprise. The reasons that impact on the idle time of cars above the standard and as a consequence of this phenomenon, the increase in the cost of using freight cars. The developed model of step-by-step advancement of wagons at each station of the metallurgical plant helps in identifying «weak points» that influence the staying of the freight car above the standard on the tracks of the stations of the metallurgical enterprise.

Keywords: metallurgical enterprise, rolling stock, freight car, operational work, railway station, simplified model, target function.

Постановка проблеми. На сьогодні має вияв застаріла форма управління ресурсами залізничного транспорту на металургійних підприємствах. Така тенденція не є актуальною в умовах ринкового господарювання і значно знижує рівень конкурентоспроможності металургійної галузі. Одним з основних експортних товарів України є продукція металургійної промисловості. У 2019 році доля її у загальному експорті країни склала близько 23%. Через жорстоку конкуренцію на світовому ринку постає важливе завдання зменшення собівартості продукції металургійної промисловості за рахунок зниження транспортних витрат на виробництво.

Передбачається необхідність зниження витрат, які пов'язані з перепростою вагонів на коліях промислового підприємства. Спостереження над дослідженням елементів обігу вантажних вагонів доводить, що більше, ніж у 50% випадків вагони на початкових і кінцевих станціях маршруту простоюють. Таким чином, оберт вагону збільшується, підвищуються перепростої під час очікування вагонів під операціями розвантаження та завантаження готової продукції, до якої відносяться: рулони гарячекатані, пачки гарячекатані, рулони холоднокатані, пачки холоднокатані. Тому дослідження в напрямку визначення раціонального часу знаходження приватних вагонів на металургійних комбінатах є актуальними.

Знаходження приватних вагонів на металургійному комбінаті залежить від багатьох факторів: розміщення станцій обслуговування, їх кількості та обладнання, тягового рухомого складу, який їх обслуговує, та його технічного стану. Тобто задача знаходження вагонів на комбінаті являється багатофакторною задачею. Тому постає завдання визначення раціонального часу знаходження приватних вагонів з врахуванням заходів, які будуть направлені на зменшення собівартості продукції, яка випускається комбінатом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останній час пильну увагу науковці та практики приділяють проблемі управління парком вантажних вагонів на металургійних підприємствах. Але більшість існуючих робіт сконцентровано на вдосконаленні вже існуючих методів та технологій управління рухомим складом. Існуючі методи планування не повністю вирішують питання раціонального розподілу вантажних вагонів різних операторів, що значно впливає на конкурентоспроможність готової продукції на сучасному ринку. Виходячи з цього, у роботах [1-2] доктора технічних наук Д.Н. Козаченко вирішення питання регулювання вагонопотоків на залізниці запропоновано на основі впровадження ефективних методів розподілу рухомого складу на базі сучасних інформаційних технологій з розробкою автоматизованих систем підтримки прийняття рішень на основі принципів ресурсозбереження.

Питанням управління рухомим складом на магістральних залізницях України присвячено багато праць доктора технічних наук Т.В. Бутько. У роботах [3-4] автор пропонує сформовану математичну модель у вигляді оптимізаційної задачі з цільовою функцією, яка формалізує технологічний процес управління парком вантажних вагонів операторських компаній.

Недосконалістю підходів до прийняття рішень для визначення ефективності розподілу рухомого складу, а саме з урахуванням наявності вагонів необхідної категорії придатності для перевезення заданої номенклатури вантажів та їх кількості, займається доктор технічних наук Д.В. Ломотько. У роботі [5] автор запропонував підходи до удосконалення автоматизованої системи для забезпечення вантажовласників транспортними засобами відповідно до їх заявок.

Доктор технічних наук В.К. Губенко вивчав застосування «жорсткої» системи управління

транспортної системи промислових підприємств в умовах існуючої динаміки ринку металургії. Автором запропонований механізм управління експлуатаційною готовністю вагонного парку металургійного підприємства в умовах динамічності ринку металургії [6].

Як правило, усі запропоновані вдосконалення управління з експлуатації вантажних вагонів пропонуються для рухомого складу магістральної залізничної дороги [7]. Отже, питання з удосконалення експлуатації вантажних вагонів різних операторів на коліях промислового підприємства вивчене недостатньо.

Метою дослідження є розроблення математичного апарату та визначення на його основі раціонального часу обслуговування і знаходження приватних вагонів на металургійному підприємстві з врахуванням штрафних санкцій. Задачі дослідження:

- 1) виконати аналіз наукових та практичних робіт (праць) у напрямку визначення раціонального часу знаходження вантажних вагонів на промислових підприємствах з урахуванням особливостей їхньої роботи;
- 2) поелементно дослідити та проаналізувати операції, які виконуються з вантажними вагонами на кожній станції металургійного підприємства;
- 3) скласти модель циклу прасування вагонів;
- 4) визначити «слабкі місця», які впливають на знаходження вантажного вагону зверху нормативу на коліях станцій металургійного підприємства.

Виклад основного матеріалу. Особливість знаходження рухомого складу, який прибув на комбінат з зовнішньої мережі, передбачає поетапне обслуговування вантажних вагонів на декількох станціях та передачу його знову в зовнішню мережу. При цьому виникає задача визначення доцільності зменшення часу обробки вантажних вагонів у середині підприємства з урахуванням переplate АТ «Укрзалізниця» за перепростої вагонів [8]. Для її вирішення необхідно визначити основні чинники, які впливають на перепростої вагонів за час їх перебування на комбінаті з моменту «входу» до моменту «виходу» з комбінату. Для цього треба увесь цикл прасування вагону розбити на етапи їх обробки, які необхідно розподілити поелементно на станціях з моменту прибуття на станцію до моменту їхнього відправлення зі станції.

Дане завдання будемо вирішувати за допомогою розробленої моделі.

Розглянемо обробку вагонів на металургійному комбінаті, який включає п'ять станцій, серед яких приймально-сортувальні та вантажні.

Цикл прасування вагону можна записати у вигляді моделі, цільова функція якої має вигляд:

$$F(\tau) = C_1 \cdot t_1(\tau_1) + C_2 \cdot t_2(\tau_2) + C_3 \cdot t_3(\tau_3) + C_4 \cdot t_4(\tau_4) + C_5 \cdot t_5(\tau_5) + \chi \cdot C_6(\tau_\Sigma) + C_7(\tau_\Sigma) \cdot (1 - \chi) \Rightarrow \min, \quad (1)$$

- де t_1 – час, витрачений на операції з рухомим складом на станції 1, год;
 C_1 – витрати за користування на обробку вагонів на станції 1, грн;
 t_2 – час, витрачений на операції з рухомим складом на станції 2, год;
 C_2 – витрати за користування вагонами на станції 2, грн;
 t_3 – час, витрачений на вантажні операції у цехах вальцівки, год;
 C_3 – витрати за користування вагонами у цехах вальцівки, грн;
 t_4 – час, витрачений на операції з рухомим складом у цехах вальцівки, год;
 C_4 – витрати за користування вагонами, які закріпленні за цехом управління залізничним транспортом у цехах вальцівки, грн;
 t_5 – час, витрачений на операції з рухомим складом на станції 5, год;
 C_5 – витрати за користування вагонами, які формуються у потяг за відправленням на станцію 5, грн;
 $C_6(\tau_\Sigma)$ – функція плати за використання вагонів $T < 45$ год;
 $C_7(\tau_\Sigma)$ – функція плати за використання вагонів $T > 45$ год;

$$\chi - \text{булева змінна; } \chi = 1 \text{ якщо } \sum_{i=1}^5 t_i \leq T_{\text{норм}}; \chi = 0 \text{ якщо } \sum_{i=1}^5 t_i > T_{\text{норм}}.$$

Оскільки час, затрачений на виконання будь-яких операцій з вантажним вагоном, завжди буде більше нуля, існує обмеження моделі за часом. Мінімальний час знаходження вагону на комбінаті за технологічним процесом підприємства становить T_{\min} [9].

Цикл обробки вантажного вагона за станцією 1 розбивається на шість етапів. Перший

етап технологічного процесу включає у себе обробку та розформування составу, який прибуває з АТ «Укрзалізниця»; підбір вагонів за родом вантажа за призначенням вантажних фронтів. Другий етап технологічного процесу включає накопичення вагонів на сортувальних коліях станції й очікування подачі. Третій етап технологічного процесу включає подачу вагонів із сортувальних колій на вантажні fronti та розстановку за вантажними пунктами. Четвертий етап технологічного процесу включає вивантаження вагонів. П'ятий етап технологічного процесу включає забирання, виведення вагонів із вантажного фронту, розформування їх через сортувальний пристрій станції, очищення і надходження їх на сортувальні колії. Шостий етап технологічного процесу включає формування, перестановку у парку відправлення, обробку составу і відправлення поїзда зі станції.

Якщо всі ці етапи здійснюються на станції без затримки, згідно нормативу відведеному для цієї станції, тоді виконується наступний вираз, год:

$$t_1 = \sum_{i=1}^6 \tau_{1i} \Rightarrow T_{1норм}.$$

Загальні витрати на даній станції будуть визначені наступним виразом, грн:

$$C_1 = \sum_{i=1}^6 c_{1i} \cdot \tau_{1i}.$$

Далі, розглянемо цикл обробки вантажного вагона по станції 2, який розбивається на три етапи. Перший етап технологічного процесу включає у себе обробку та розформування составу, який прибуває; підбір «порожніх» вагонів за родом вантажа за призначенням вантажних фронтів у вальцівних цехах. Другий етап технологічного процесу включає накопичення вагонів на коліях станції й очікування подачі локомотиву. Третій етап технологічного процесу включає обробку составу і відправлення поїзда зі станції комбінату.

Якщо всі ці етапи здійснюються на станції без затримки, згідно нормативу відведеному для цієї станції, тоді виконується наступний вираз, год:

$$t_2 = \sum_{i=1}^3 \tau_{2i} \Rightarrow T_{2норм}.$$

Загальні витрати на даній станції будуть визначені наступним виразом, грн:

$$C_2 = \sum_{i=1}^3 c_{2i} \cdot \tau_{2i}.$$

Наступним етапом йде цикл обробки вантажного вагона на станціях у цехах вальцівки (станція 3, 4), які розбиваються на чотири етапи. Перший етап технологічного процесу включає у себе обробку та розформування составу, який прибуває, за родом вантажа за призначенням вантажних фронтів у вальцівних цехах. Другий етап технологічного процесу включає накопичення вагонів на коліях станції й очікування подачі їх під завантаження. Третій етап технологічного процесу включає завантаження вагонів металовальцюванням. Четвертий етап технологічного процесу включає забирання, виведення вагонів із вантажного фронту, формування составу, обробку составу і відправлення поїзда зі станції комбінату.

Якщо всі ці етапи здійснюються на станції без затримки, згідно нормативу відведеному для цієї станції, тоді виконується наступний вираз, год:

$$t_3 = \sum_{i=1}^4 \tau_{3i} \Rightarrow T_{норм};$$

$$t_4 = \sum_{i=4}^4 \tau_{4i} \Rightarrow T_{норм}.$$

Загальні витрати на даній станції будуть визначені наступним виразом, грн:

$$C_3 = \sum_{i=1}^4 c_{3i} \cdot \tau_{3i};$$

$$C_4 = \sum_{i=1}^4 c_{4i} \cdot \tau_{4i}$$

Заключною фазою буде цикл обробки вантажного вагона за станцією С-5, який розбивається на три етапи. Перший етап технологічного процесу включає у себе обробку составу, який

прибуває; подача вагонів до сортувального парку станції. Другий етап технологічного процесу включає накопичення вагонів на сортувальних коліях станції для формування поїзда. Третій етап технологічного процесу включає формування, перестановку у парку відправлення, обробку составу і відправлення поїзда зі станції комбінату на АТ «Укрзалізниця».

Якщо всі ці етапи здійснюються на станції без затримки, згідно нормативу відведеному для цієї станції, тоді виконується наступний вираз, год.:

$$t_5 = \sum_{i=1}^3 \tau_{5i} \Rightarrow T_{5норм}.$$

Загальні витрати на даній станції будуть визначені наступним виразом, грн:

$$C_5 = \sum_{i=1}^3 c_{5i} \cdot \tau_{5i}.$$

Якщо усі нормативні показники відрізняються від заданих, необхідно провести розрахунки за відхиленнями. Для цього введена булева змінна χ , яка приймає значення 1, якщо $\sum_{i=1}^{16} \tau_i > T_{норм}$, χ приймає значення 0, якщо $\sum_{i=1}^{16} \tau_i < T_{норм}$. У залежності від булевої величини виконуються розрахунки для показників, які не входять у нормативи: якщо не перевищує $C_6(\tau_\Sigma)$; якщо перевищує $C_7(\tau_\Sigma)$.

Згідно попередніх даних досліджень приймаємо, що при моделюванні для характеристики імовірнісних значень тривалості виконання робіт, пов'язаних з переробкою вагонів на сортувальних та вантажних станціях, можуть використовуватися різні закони розподілу: нормальний, логарифмічно-нормальний, гамма-розподіл, рівномірний, експоненціальний, тощо [10].

За попередніми даними АТ «Укрзалізниця» по часу та вартості від утримання вагонів на металургійному комбінаті вираз (1) можна записати у наступному виді:

$$F(\tau) = (3,1 \cdot 13,8) + (2,1 \cdot 2,4) + (3 \cdot 11,6) + (2,6 \cdot 8,4) + (2,36 \cdot 6,2) + \chi \cdot (2,39\tau - 0,55) + (1 - \chi) \cdot (42,4\tau - 1362,2) \Rightarrow \min.$$

Знайшовши оптимуми даної функції, бачимо, що розрахунки для показників, які не перевищують нормативи, складають: $C_6 = (0,1926\tau^2 - 1,7317\tau + 18,53) \cdot \chi$; і показників, які перевищують нормативи, складають: $C_7 = (42,221\tau - 1354) \cdot (1 - \chi)$. Дана умова виражена на рисунку 1.

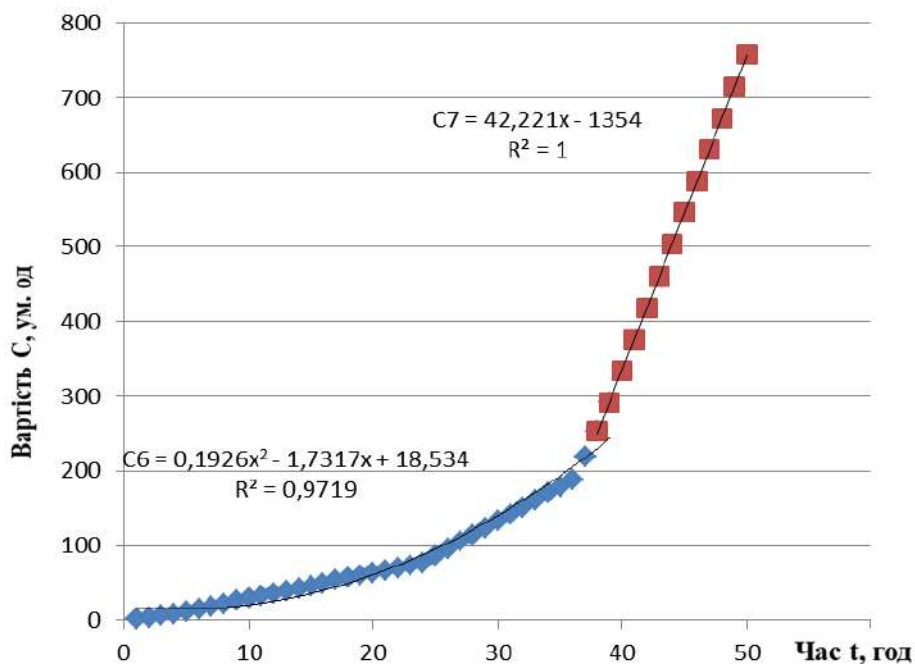


Рис. 1 – Ставки витрат по металургійному комбінату за користування приватними вантажними вагонами до 50 годин: ◆ C6 – вартість за нормативом; ■ C7 – вартість зверх нормативу

Згідно методології функціонально-вартісного аналізу певні технічні рішення повинні прийматися на основі загальних витрат виробництва та транспорту за одним циклом вантажо-переробки та їх сумарного значення за увесь обсяг. При цьому враховуються усі виробничі ресурси, задіяні у вантажопереробці, увесь обсяг транспортної роботи, який враховує технологічний час та тривалість простою вагону [11]. Дана умова виражена на рисунку 2.

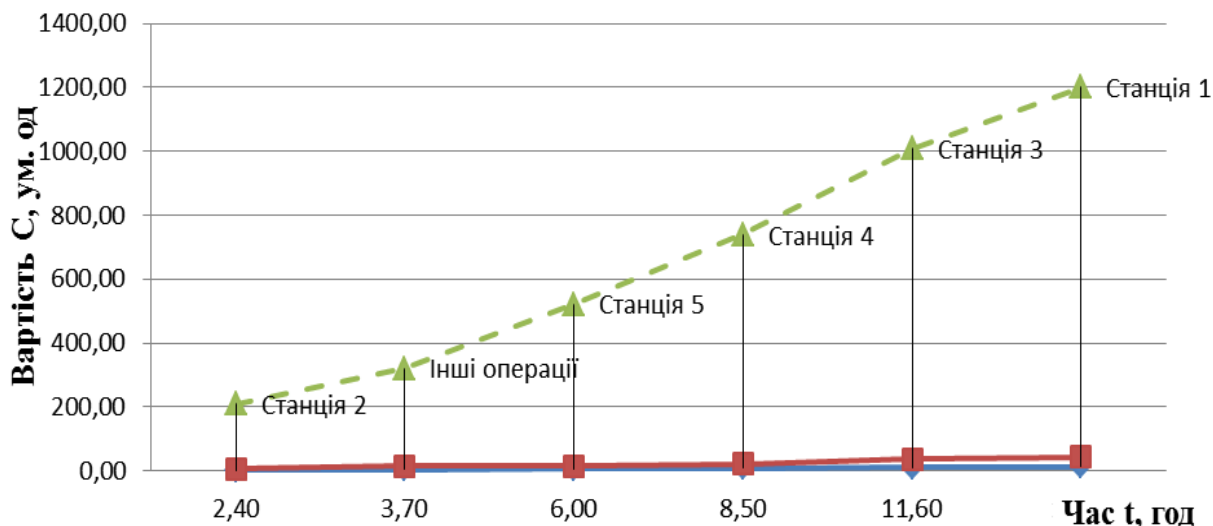


Рис. 2 – Розподіл витрат за приватний вантажний вагон по кожній станції металургійного підприємства: — ромб — витрати за вагон по кожній станції; — квадрат — знаходження вагонів по станції за нормативом; — трикутник — внутрішні витрати по станції

З діаграми видно, що вагон знаходиться на кожній станції згідно його нормативу і витрати за вагон значно відрізняються від витрат, які пов'язані з усіма виробничими ресурсами.

Виконані дослідження базуються на використанні методу математичної статистики для проведення аналізу основних експлуатаційних показників роботи транспорту металургійного комбінату, методу лінійної регресії у вигляді біваріативного нормального закону розподілу.

Висновки

На основі зробленого аналізу та отриманих результатів можна зробити наступні висновки:

1. Виконано аналіз наукових та практичних робіт провідних спеціалістів у даній галузі, який показав, що питання у напрямку визначення раціонального часу знаходження вантажних вагонів на коліях промислового підприємства висвітлене неповністю та потребує більш уважного поетапного розгляду.

2. Виконано поелементний аналіз операцій, що виконуються на кожній станції з вантажними вагонами, який показав, що всі операції розбиті на етапи. У свою чергу, якщо всі ці етапи здійснюються на станції без затримки, згідно нормативного показника для цієї станції, то загальна сума витраченого часу буде дворівнева або буде прагнути до нормативного показника.

3. Розроблена модель поетапного просування вагонів по кожній станції металургійного комбінату. За допомогою неї визначені «слабкі місця», які впливають на знаходження вантажного вагону зверх нормативу на коліях станцій металургійного підприємства. Встановлені (виявлені) причини, з яких виникають перепростої вагонів, а саме:

- тривалість технологічних операцій і міжопераційних простоїв залежить від обсягу роботи, потужності апаратів обслуговування, кількості маневрових локомотивів і технології розформування;

- тривалість накопичення й очікування подачі залежить від потужності призначення, величини і числа подач, кількості маневрових локомотивів та їх спеціалізації та завантаженості вантажного фронту;

- тривалість подачі і розстановки залежать від відстані, швидкості і величини подачі і ступеня розпорошеності подачі за пунктами; тривалість очікування і виконання цієї операції залежить від звільнення вантажного фронту попередньою подачею, кількості поданих вагонів і навантажувально-розвантажувальних механізмів;

- тривалість операцій на 5 етапі і простоїв залежить від числа вантажних пунктів вагонів, відстані, швидкості збирання, розформування і прямування по станційних коліях;

- тривалість операцій на 6 етапі і міжопераційних простоїв залежить від величини состава, числа і спеціалізації маневрових локомотивів, відстані і швидкості перестановки, потужності апаратів обслуговування у парку відправлення і системи забезпечення відправлення поїздів локомотивами і наявності вільної нитки графіка.

4. У подальшому доцільно зайнятися питаннями виявлених «слабких» місць в управлінні та експлуатації вантажних вагонів на конкретних станціях. Також необхідно приділити більше уваги не тільки питанням у роботі самої станції, а і взаємодії між станцією та цехом, який обслуговує дана станція.

Перелік використаних джерел:

1. Козаченко Д.Н. Проблемы стимулирования отправительской маршрутизации на железнодорожном транспорте / Д.Н. Козаченко // Вісник Східноукраїнського національного Університету імені Володимира Даля. – 2013. – № 3 (192). – С. 207-211.
2. Козаченко Д.М. Програмний комплекс для імітаційного моделювання роботи залізничних станцій на основі добового плану-графіка / Д.М. Козаченко, Р.В. Вернигора, Р.Г. Коробйова // Залізничний транспорт України. – 2008. – № 4. – С. 18-20.
3. Бутько Т.В. Формалізація процесу управління парком вантажних вагонів операторських компаній / Т.В. Бутько, О.Е. Шандер // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2 (3). – С. 55-58.
4. Formation of an automated technology of cargo transportation control on the direction / T. Butko, O. Kostiennikov, L. Parkhomenko, V. Prohorov, G. Bogomazowva // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2019. – Vol. 1, № 3 (97). – Pp. 6-13. – Mode of access: DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156098.
5. Ломотько Д.В. Аналіз та удосконалення існуючих підходів до раціонального розподілу транспортних ресурсів / Д.В. Ломотько, А.О. Ковальов, О.В. Ковальова // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2015. – Вип. 156. – С. 45-47.
6. Губенко В.К. Общий курс промышленного транспорта : учебник для ВУЗов / В.К. Губенко, В.Э. Парунакян. – М. : Транспорт, 1994. – 199 с.
7. Investigation into the bimodal transportation process by modelling rail module states / O. Lavrukhin, V. Zapara, Y. Zapara, O. Shapatina, G. Bogomazova // Transport Problems. – 2017. – Vol. 12, iss. 2. – Pp. 99-112. – Mode of access: DOI: 10.20858/tp.2017.12.2.10.
8. Кирицева Е.В. Система планирования и управления порожними вагонопотоками на внутризаводских перевозках / Ю.В. Гусев, Е.В. Кирицева // Scientific World Journal. – 2017. – Iss. 15, vol. 2. – С. 74-80.
9. Кирицева Е.В. Анализ продвижения внешнего вагонопотока в транспортной логистике металлургического предприятия / Е.В. Кирицева, Ю.В. Гусев // Modern engineering and innovative technologies. – 2019. – Iss. 8, part 1. – С. 79-85. – Mode of access: DOI: 10.30890/2567-5273.2019-08-01-015.
10. Кірицева О.В. Спрощена модель визначення слабких місць вагонопотоків металургійного комбінату / О.В. Кірицева, О.В. Клецька, М. Тимофеєнко // Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2020: 11 міжн. наук.-практ. конф. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2020. – С. 309-311.
11. Кірицева О.В. Підхід до визначення ефективних заходів підвищення якості роботи залізнич-

ного транспорту металургійного підприємства / О.В. Кірицева, О.В. Клецька, Г.Л. Новак // Енергоефективність на транспорті: міжн. наук.-практ. конф. (18-20 листопада 2020 р.; Харків). – С. 23-25.

References:

1. Kozachenko D.N. Problemy stimulirovaniia otpravitel'skoi marshrutizatsii na zheleznodorozhnom transporte [Problems of Incentives for Sender Routing in Railway Transport]. *Visnik Skhidnoukrains'kogo natsional'nogo Universitetu imeni Volodimira Dalia – Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 2013, no. 3 (192), pp. 207-211. (Rus.)
2. Kozachenko D.N., Vernigora R.V., Korobjova R.G. Programnij complex dlja imitacijnogo modejuvannjarobotizalznichnih stancij na osnovs dobovogo planu-grafika [Software package for simulation of railway stations based on a daily schedule]. *Zalznichnj transport Ukraine – Railway transport of Ukraine*, 2008, no. 4, pp. 18-20. (Ukr.)
3. Butko T.V., Shander O.E. Formalizacija procesu upravlinnja parkom vantazhnih vagoniv operatorskih kompanij [Formalization of the process of fleet management of freight cars of operating companies]. *Vostochno-Evropskii zhurnal peredovykh tekhnologii – Eastern-European of journal of enterprise technologies*, 2014, no. 2 (3), pp. 55-58. (Ukr.)
4. Butko T., Kostienikov O., Parkhomenko L., Prohorov V., Bogomazova G. Formation of of an automated technology of cargo transportation control on the direction. *Eastern – European of journal of enterprise technologies*, 2019, vol. 1, no. 3 (97), pp. 6-13. doi: **10.15587/1729-4061.2019.156098**.
5. Lomotko D.V., Kovalov A.O., Kovalova O.V. Analis ta udoskonalennja isnujuchih pidhodiv do rnear rational allocation of transport resources [Analysis and improvement of existing approaches to the rational allocation of transport resources]. *Zbirnik naukovikh prats' Ukraïns'kogo derzhavnogo universitetu zalznichnogo transportu – Collected scientific works of Ukrainian state university of railway transport*, 2015, iss. 156, pp. 45-47. (Ukr.)
6. Gubenko V.K., Parunakjan V.E. *Obshij kurs promishlennogo transporta: uchebnik dlja vuzov* [General course of industrial transport: textbook for universities]. Moscow, Transport Publ., 1994. 199 p. (Rus.)
7. Lavrukhin O., Zapara V., Zapara Y., Shapatina O., Bogomazova G. Investigation of into the bimodal transportation process by modelling rail module states. *Transport Problems*, 2017, vol. 12, iss. 2, pp. 99-112. doi: **10.20858/tp.2017.12.2.10**.
8. Kiriceva E.V., Gusev Ju.V. Sistema planirovanija i upravlennja porozhnimi vagonopotokami na vnutrizavodskih perevozkah [Planning and management system for empty car flows in intra-plant transportation]. *Scientific World Journal*, 2017, iss. 15, vol. 2, pp. 74-80. (Rus.)
9. Kiriceva E.V., Gusev Ju.V. Analiz prodvizhenija vneshnego vagonopotoka v transportnoj logistike metalurgicheskogo predprijatija [Analysis of the promotion of external railcar traffic in the transport logistics of a metallurgical enterprise]. *Modern of engineering and innovative technologies*, 2019, iss. 8, pp. 79-85. doi: **10.30890/2567-5273.2019-08-01-015**. (Rus.)
10. Kiriceva E.V., Kletska O.V., Timofeenko M. Sproshchena model' viznachennia slabkikh mist's' vagonopotokiv metalurgiinoogo kombinatu. *Materiali 11 mizhn. nauk.-prakt. konf. «Suchasni energetichni ustanovki na transporti, tekhnologii ta obladnannia dlia ikh obslugovuvannia»* [Simplified model for determining the weak points of car flows of the metallurgical plant. Proceedings of 11-th Int. Sci.-pract. conf. «Modern power plants for transport, technologies and equipment for their maintenance»]. Kherson, 2020, pp. 309-311. (Ukr.)
11. Kiriceva E.V., Kletska O.V., Novak G.L. Pidhid do viznachennja effektivnih zahodiv pidvichennja jakosti roboti zalznichnogo transportu metalurgijnogo pidprijemstva. *Materiali Mizhn. nauk.-prakt. konf. «Energoefektivnist' na transporti»* [Proceedings of the Int. Sci.-pract. conf. «Energy efficiency in transport»]. Kharkiv, 2020, pp. 23-25.

Рецензент: А.П. Фалендиш
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 13.10.2020

УДК 629.4

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226212

© Вихопень І.Р.¹, Клецька О.В.², Кіріцева О.В.³,
Сумцов А.Л.⁴, Барібін М.А.⁵**ВИПРОБУВАННЯ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА, МОДИФІКОВАНОГО
ПРИСАДКОЮ DFC2020**

Зменшення об'ємів витрати палива будь-якими транспортними засобами із силовою установкою на основі двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) було, є і буде одним із самих актуальних завдань, на вирішення якого спрямовані зусилля великої кількості вчених із різних областей науки. Одним із самих простих, в плані технічної реалізації, способом вирішення даної задачі являється використання різного роду присадок. Стаття присвячена висвітленню процесу виконання еколого-енергетичних випробувань дизельного палива, модифікованого шляхом додавання присадки, яка згідно заявлених виробником властивостей здійснює вплив на протікання процесу сумішоутворення та згорання в циліндрах дизеля, повноту згорання палива, чим забезпечує підвищення паливної економічності дизеля та зниження кількості шкідливих викидів в атмосферу, тобто покращення екологічного рівня викидів дизелем тепловоза. На основі отриманих результатів сформульовано висновок щодо перспектив використання даного типу присадки для дизельного палива.

Ключові слова: присадка до палива, дизельне паливо, витрата палива, маневровий тепловоз, параметри роботи дизеля, випробування двигунів внутрішнього згорання, шкідливі викиди в атмосферу.

I.R. Vikhopen, O.V. Kletska, O.V. Kiritseva, A.L. Sumtsov, M.A. Baribin. Test of diesel fuel modified by an additive of DFC2020. Reducing fuel consumption by any vehicle with a propulsion plant based on an internal combustion engine (ICE) has been, and is to remain one of the urgent tasks of science; the efforts of a large number of scientists from various fields of science around the world are directed towards finding the optimum solution of the problem. The current level of ICE design, has not yet reached the maximum allowable level, but has approached right up to it. And it makes it almost impossible to solve the problem of reducing fuel consumption due to the changes in the design of the internal combustion engine. The easiest way to bring about the solution of this problem is to use different types of fuel additives that affect the operation of the internal combustion engine, directly or indirectly by adjusting the various parameters of its operation. However, the effectiveness of such additives depends on many factors. The article describes the environmental and energy tests of diesel fuel modified by additives. The additives according to the properties declared by the manufacturer have a positive effect on the process of mixing and combustion in diesel cylinders thus providing much better fuel combustion, increasing fuel efficiency and reducing the amount of harmful emissions into the atmosphere. The of tests were performed using the TGM-4 shunting locomotive, with the D211 standard diesel with the power of 552 kW (750 hp) in accordance with the requirements of the developed test methodology using standard methods for determining fuel consumption and controlling the concentration of harmful emissions into the atmosphere

¹ інженер, Львівська залізниця, м. Львів, crownwick@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-4682-860X, gurao@ukr.net

³ ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0002-2481-5883, evkiritseva@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0002-3121-9545, sal-hiit@i.ua

⁵ аспірант, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, kanifoli4.92@gmail.com

with exhaust gases. Based of on the obtained test data, calculations have been performed and their results have been analyzed. Conclusions on the prospects of using this type of additive for diesel fuel for locomotives in order to increase fuel efficiency and to reduce the concentration of harmful emissions with exhaust gases have been drawn. The effectiveness of the additive on the diesel locomotive engine work has been proved.

Keywords: *additive to the fuel, diesel fuel, fuel expense, shunting locomotive, diesel work parameters, internal combustion engines tests, harmful emissions into the atmosphere.*

Постановка проблеми. Основним і незмінним паливом для тепловозних енергетичних установок було і залишається дизельне пальне. В наслідок того, що витрати на паливо складають порядку 40-70% від загальних витрат на експлуатацію тепловозів, підвищення паливної економічності тепловозних дизелів залишається однією із найважливіших задач для вирішення [1].

Покращення паливної економічності дизелів, в ідеалі, повинно супроводжуватись зниженням рівня викидів шкідливих речовин в атмосферу з випускними газами, збільшення величини ресурсу його роботи і т. п.

Одним із найбільш доступних в плані технічної реалізації способів із підвищення економічності тепловозних дизелів являється оптимізація протікання робочого процесу в двигуні шляхом покращення параметрів паливоподачі, сумішоутворення та повноти згорання.

Дослідження впливу використання дизельного палива з додаванням в нього присадки на експлуатаційні параметри роботи дизелів тепловозів являється актуальним та перспективним завданням для науковців.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для більш повного розуміння досліджуваного питання було проаналізовано роботи вітчизняних та закордонних науковців.

Аналіз випробувальних стендів та приладів в роботі [2] показав, що сьогодні для проведення випробувань з виміру шкідливих речовин у випускних газах та димності достатньо використовувати портативний газоаналізатор або димомір, а для випробувань з виміру потужності та витрати палива необхідно використовувати спеціальні випробувальні стенди.

В матеріалах статті [3] приведено порівняння підходів до розрахунків викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами тепловозних дизелів та їх аналіз, отримані результати розрахунку викидів.

Проаналізовано роботу [4] на тему випробувань модифікованого дизельного палива; автор приводить методику обробки отриманих даних. На основі результатів здійснено висновок про перспективу використання даного типу присадок до дизельного палива з метою підвищення паливної економічності двигунів внутрішнього згорання.

Як приклад оформлення та обробки результатів випробувань проаналізовано звіт [5] про результати моторних стендових випробувань дизельного палива модифікованого присадкою «PowerGuard 6528 Futura». Метою роботи було виявлення впливу присадки на технічні, економічні та екологічні показники автомобільного дизельного двигуна, а також на зміни рівня забруднення елементів паливної та випускної системи та камери згорання двигуна.

В статті [6] автор приводить встановлений масив малої кількості контрольних показників та умови їх отримання, які забезпечують визначення надійності роботи модернізованого маневрового локомотиву з необхідною точністю та достовірністю.

Використання методу Херста для аналізу технічного стану й паливної економічності тепловозу описано в роботі [7]. На основі розрахунку й оцінки показника Херста для часового ряду витрат палива тепловозами запропонована організація моніторингу технічного стану й створений метод для розрахунку залишкового ресурсу паливної апаратури.

В матеріалах статті [8] представлено результати аналізу дослідів, спрямованих на виявлення впливу частоти, навантаження, положення паливної рейки на склад випускних газів дизельних двигунів внутрішнього згорання. З проведених досліджень відзначено, що найбільш ефективний режим роботи дизеля спостерігається при середньому навантаженні (50-70%).

В статті [9] розглянуті основні фактори, які впливають на кількісний та якісний склад викидів забруднюючих речовин від тепловозних дизелів.

З метою визначення ефективності хімотологічних заходів підвищення ефективності тепловозів в експлуатації в роботі [10] пропонується здійснювати застосування сучасного вимірювального комплексу, який дозволяє при відносно невеликих витратах отримати якісний

пристрій. Застосування комплексу дає можливість підвищити якість як при випробуваннях тепловозів, так і при діагностуванні на технічному обслуговуванні та ремонті.

В роботі [11] обговорюється вплив палива, збагаченого наноматеріалами, на характеристики двигуна і його підсистеми, а також пов'язані з цим можливості, виявлені на основі результатів лабораторних випробувань, отриманих в останні роки.

У роботі [12] представлені результати спільного спалювання H2-дизеля в дизельному двигуні, що працює в двопаливному режимі з додаванням і без додавання присадки (ді-трет-бутилпероксида) в дизельне паливо.

Було відмічено, що при заміні на 14% водню і 1% присадки чисте тепловиділення і температура знизилися на 2 і 10% відповідно, в той час як NO_x збільшується на 60% в умовах високого навантаження в порівнянні з роботою на дизельному паливі.

Остаточо дійшли висновку, що мінімальний рівень утворення NO_x досягається при додаванні 1% DTBP з 14% водню в двопаливному дизельному двигуні.

Дослідження [13] присвячено експериментам з новою кисневмісною присадкою, отриманою з відходів діацетат-етиленгліколю. Ця кисневмісна паливна суміш може привести до значного зниження викидів як оксидів азоту, так і діоксиду вуглецю, але може привести до небажаного збільшення викидів незгорілих вуглеводнів в порівнянні з дизельним паливом без присадок. Таким чином, розроблена кисневмісна добавка може бути використана для риформінгу дизельного палива з метою істотного зниження викидів оксидів азоту.

Слід відзначити досить конкретну специфіку наукових робіт, виконаних закордонними науковцями, а саме, дослідження параметрів роботи дизельних двигунів з використанням різного виду альтернативних видів палива.

Не зважаючи на значний внесок вітчизняних та закордонних науковців в дослідження параметрів роботи дизельних двигунів, актуальною залишається задача з отримання достовірних даних випробувань безпосередньо в експлуатації з врахуванням всіх можливих факторів, які здійснюють вплив на них.

Мета статті – виявлення результатів впливу від використання модифікованого дизельного палива присадкою на параметри роботи дизельного двигуна тепловозу. Для досягнення поставленої мети потребують вирішення наступні задачі: збір техніко-експлуатаційних показників роботи дизеля тепловозу з присадкою до палива та без неї; оброблення та аналіз зібраних результатів; обґрунтування отриманих результатів із виділенням та поясненням причин їх зміни.

Виклад основного матеріалу. Із-за неможливості організації цілодобового контролю потрібних параметрів на протязі тривалого часу, виконання випробування організовано за принципом періодичного контролю.

Безпосередньо перед початком проведення випробувань проведено загальний огляд технічного стану тепловозу, перевірка та огляд стану паливної та масляної системи тепловозу. Проведено фіксацію параметрів умов проведення випробувань: величини атмосферного тиску, температури навколишнього середовища, відносної вологості повітря.

Основним характерним параметром роботи дизеля тепловозу являється витрата палива; для її визначення було застосовано ваговий метод.

Суть методу полягає у визначенні витрати палива дизелем тепловозу за фіксований проміжок часу. Кількість витраченого палива визначається шляхом зважування палива у резервуарі до початку відліку фіксованого відтинку часу та після його завершення. Після, шляхом віднімання першого значення маси палива та другого, отримуємо масу палива, витрачену дизелем за певний відтинок часу [14].

Для реалізації обраного методу вимірювання було проведено роботи із втручання в паливну систему тепловозу [15]. Принципову схему паливної системи тепловоза з внесеними змінами зображено на рисунку 1.

Окрім параметрів, приведених вище, також відбувався контроль параметрів, які свідчать про нормальну роботу дизеля: температури охолоджуючої рідини; частоти обертів колінчатого валу дизеля і т. п. Основною вимогою до цих параметрів було їх знаходження в допустимих межах.

Під час виконання вимірювання за ваговим методом фіксуються наступні величини: вага палива в мірному резервуарі на початку проведення вимірювань і в кінці (кг); позиція ручки контролера машиніста; частота обертів колінчатого валу дизеля (об/хв); час роботи дизеля на позиції (хв). Тривалість проведення кожного вимірювання на кожній з позицій становить рівно

4 хв. Дані заміри виконують по 3 рази на кожній із наступних позицій: 2, 4, 6, 8 та в режимі холостого ходу (XX) – на 0-ій позиції [16].

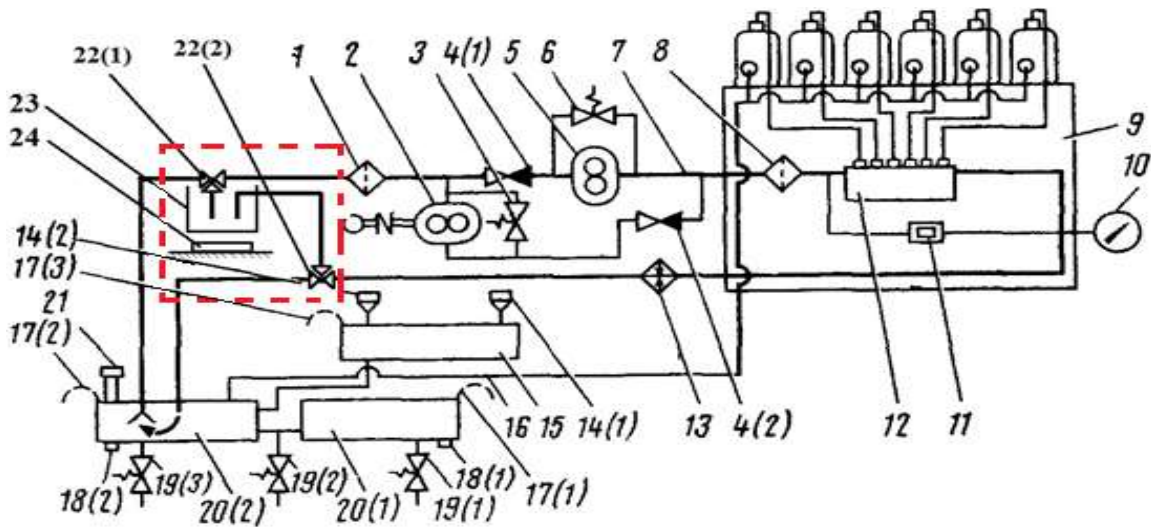


Рис. 1 – Схема підключення обладнання для визначення витрати палива ваговим методом до паливної системи дизеля маневрового тепловоза ТГМ-4А: 1 – фільтр грубої очистки; 2 – паливopідкачууючий агрегат; 3 – клапан перепускний; 4(1), 4(2) – зворотні клапана; 5 – насос паливopідкачууючий; 6 – перепускний клапан; 7 – паливopровід; 8 – фільтр тонкої очистки; 9 – дизель; 10 – манометр дистанційний; 11 – демпфер; 12 – паливний насос високого тиску; 13 – паливо підігрівач; 14(1), 14(2) – заливні горловини; 15 – паливний бак підкабінний; 16 – зливна труба; 17(1)-17(3) – вентиляційні труби; 18(1), 18(2) – зливні пробки; 19(1)-19(3) – клапани зливу палива; 20(1), 20(2) – паливні баки підвісні; 21 – труба паливоміру; 22(1), 22(2) – кран трьохходовий; 23 – резервуар для палива; 24 – ваги

Паралельно виконанню вимірювань параметрів витрати палива проводяться заміри концентрації токсичних речовин: оксиду вуглецю (CO), вуглеводнів (CH), оксиду азоту (NO), діоксиду азоту (NO₂), коефіцієнту ослаблення світлового потоку (N – димність) у випускних газах дизеля тепловозу. Для визначення концентрації даних забруднюючих речовин використовувалися газоаналізатори та димомір МЕТА-01МП 0.43Т.4 [17].

Дані, отримані в результаті проведених вимірювань під час еколого-енергетичних випробувань тепловозу ТГМ-4А, приведено в таблиці.

Таблиця
Результати вимірювань, проведених в процесі еколого-енергетичних випробувань тепловозу ТГМ-4А

№ Режиму	Позиція контролера	Витрата палива, кг	Потужність Допоміжного устаткування, кВт	Потужність, кВт	Показник N, %	C _{CO2} , ppm	C _{NO} , ppm	C _{NO2} , ppm	C _{CO} , ppm	C _{NOx} , ppm	C _{CH} , ppm
19.10.2018											
1	0	4,2	22,06	0	2,03	18,83	131,33	19,33	747,67	150,67	43,00
2	2	5,6	22,06	0	2,87	18,73	200,67	41,67	554,00	242,33	46,66
3	4	7,3	22,06	0	6,43	18,20	379,33	66,67	333,00	446,00	70,00
4	6	9,1	22,06	0	11,10	17,60	482,33	84,33	376,00	566,67	102,66
5	8	10,3	22,06	0	23,30	16,87	470,33	75,00	307,67	545,33	151,00

Продовження таблиці

14.11.2018											
1	0	6,77	22,06	0	5,33	19,13	102,67	22,00	549,00	124,67	30,66
2	2	8,85	22,06	0	5,03	18,40	172,33	35,33	681,67	207,67	61,66
3	4	14,59	22,06	0	17,00	17,63	380,00	64,33	379,67	444,33	101,00
4	6	19,24	22,06	0	14,37	17,37	485,00	73,33	283,00	558,33	117,00
5	8	26,16	22,06	0	36,30	16,17	609,00	82,00	569,00	691,00	207,66
28.11.2018											
1	0	7,11	22,06	0	7,27	18,63	213,92	40,75	587,00	254,67	51,00
2	2	8,85	22,06	0	5,53	18,23	177,24	33,76	696,67	211,00	70,00
3	4	13,57	22,06	0	9,67	17,40	366,80	69,87	444,00	436,67	116,00
4	6	18,9	22,06	0	44,77	16,40	444,92	84,75	533,00	529,67	188,67
5	8	29,85	22,06	0	20,63	15,47	554,68	105,65	583,00	660,33	271,67

Показником, який є основою для відображення всіх інших параметрів, являється середня витрата палива дизелем тепловозу. Для зручності результат розрахунку параметру витрати палива дизелем представлено у вигляді діаграми на рисунку 2.

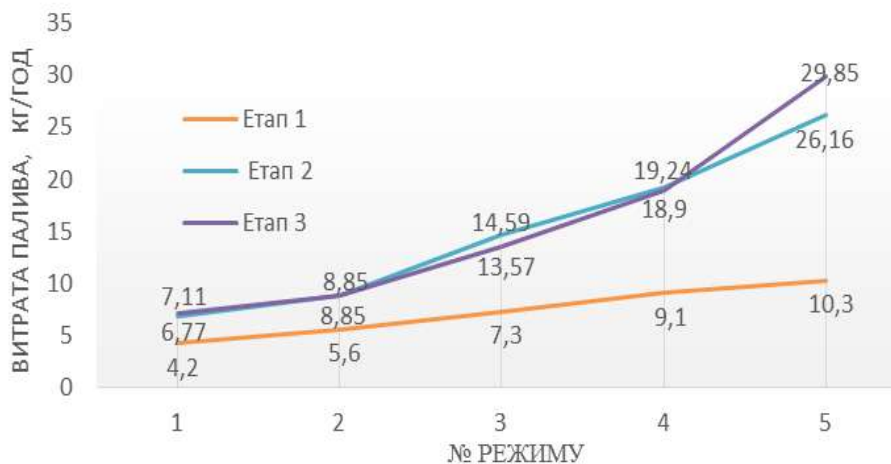


Рис. 2 – Діаграма витрати палива дизелем тепловозу ТГМ4А

Розрахунок інших параметрів проводиться у відповідності до ВНД 32.0.06.001-99 (г/м³, мг/м³, мг/л) або в об'ємних (% , ppm – частина на мільйон) одиницях. Взаємозв'язок між одиницями вимірювання концентрацій відображається наступною формулою

$$C_{об. \%} = 0,0001 \cdot C_{ppm} = 2,24 \cdot C / \mu, \quad (1)$$

де C – концентрації вимірюваної забруднюючої речовини; μ – молекулярна маса вимірюваної забруднюючої речовини.

Величину концентрації викидів твердих частинок у випускних газах $C_{тч}$ в залежності від вимірюваного коефіцієнту ослаблення світлового потоку N стандартно визначають за графіком залежності викидів твердих частинок $C_{тч}$ від коефіцієнту ослаблення світлового потоку N .

Однак, цей метод являється доволі приблизним. Тому для збільшення точності значення величини концентрації викидів твердих частинок $C_{тч}$ було проведено апроксимацію графіка залежності методом найменших квадратів та отримано поліном 4-го ступеня, який має наступний вигляд

$$C_{тч} = 0,0062937063 + 0,0035081585 \cdot N + 0,000025903263 \cdot N^2 - 0,00000013403263 \cdot N^3 + 0,000000061188811 \cdot N^4, \text{ г/(кВт} \cdot \text{год)}, \quad (2)$$

де N – коефіцієнт ослаблення світлового потоку, %.

Результати розрахунків середньоексплуатаційних питомих викидів забруднюючих речовин дизелем тепловозу ТГМ-4А графічно відображено на рисунку 3.

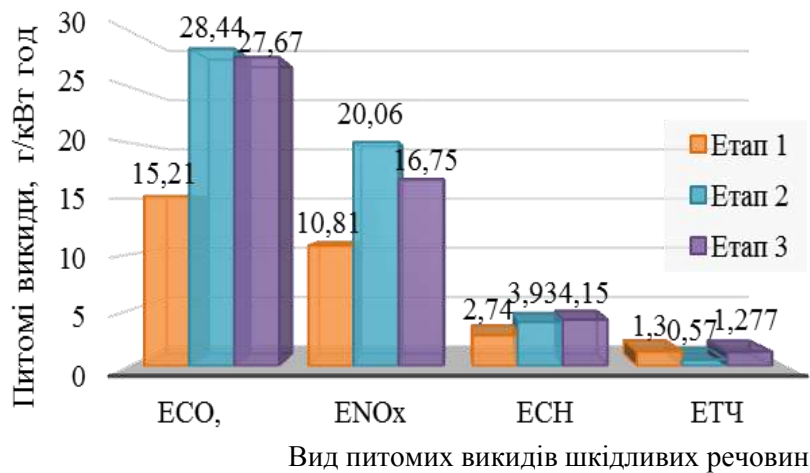


Рис. 3 – Стовпчаста діаграма середньоексплуатаційних питомих викидів забруднюючих речовин дизелем тепловозу ТГМ-4А

Висновки

Як висновок, слід зазначити негативний вплив використання палива, модифікованого присадкою DFC2020 дизелем тепловозу ТГМ4А. Спостерігається зростання витрати палива із відповідним паралельним зростанням концентрації шкідливих викидів у випускних газах.

Зниження величини параметрів концентрації вуглецю (CO) та оксидів азоту (NO_x) в період між 14 та 28 листопада можливо пояснити впливом зміни величини температури навколишнього повітря T_0 з $+9^{\circ}\text{C}$ до -3°C . Зниження температури повітря приводить до зменшення температури повітряного заряду в циліндрі двигуна, температури кінця стиснення T_c та максимальної температури горіння.

В дизельних ДВЗ коефіцієнт надлишку повітря змінюється в широкому діапазоні, що пов'язано з властивим цим двигуна принципом регулювання потужності за рахунок зміни складу (або «якості») робочої суміші. Однак середній склад робочої суміші залишається на всіх режимах «бідним». В цих умовах утворення термічного NO залежить лише від максимальної температури робочого циклу. Тому зона максимальної концентрації NO переміщується до зовнішньої швидкісної характеристики дизеля.

В загальному важко зробити остаточний висновок щодо оцінки використання присадки DFC2020 для модифікації дизельного палива, так як термін проведення випробувань малий і тому наявних статистичних даних недостатньо. Однак, слід відзначити про наявність впливу даної присадки на параметри роботи дизеля, незважаючи на такий короткий термін її використання, а, відповідно, є сенс провести подальші випробування з метою отримання більшої кількості статистичних даних, при наявності яких вже набагато точніше можна буде говорити про доцільність використання присадки та оцінку її впливу.

Перелік використаних джерел:

1. Безюков О.К. Динамика потребления энергетических ресурсов и повышение эффективности их использования / О.К. Безюков, Е.В. Ерофеева, В.А. Жуков // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2015. – № 1 (214). – С. 41-48. – Mode of access: DOI: 10.14489/hb.2015.01.pp.041-048.
2. Модель вибору ственду для проведення еколого-енергетичних випробувань дизельного рухомого складу / А.П. Фалендиш, В.О. Гатченко, О.В. Клецька, Д.І. Сулежко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2018. – № 2 (243). – С. 208-215.
3. Фалендиш А.П. Аналіз підходів до розрахунку викидів забруднюючих речовин з відпрацьованими газами дизелів тепловозів / А.П. Фалендиш, В.О. Гатченко, О.В. Клецька // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2017. – № 3 (233). – С. 228-233.

4. Жуков В.А. Моторные испытания модифицированного дизельного топлива / В.А. Жуков, О.К. Безюков, М.М. Махфуд // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 4 (38). – С. 122-131. – Mode of access: [DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-122-131](https://doi.org/10.21821/2309-5180-2016-8-4-122-131).
5. Сравнительные исследования моторных и экологических показателей дизельного топлива с присадкой «PowerGuard 6528 Futura» на базе стендовых моторных испытаний: отчет о научно-исследовательской работе. – СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2015. – 49 с.
6. Міхєєв С.О. Обґрунтування контролю малої кількості параметрів модернізованого тепловозу при проведенні експлуатаційних випробувань на надійність / С.О. Міхєєв // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2015. – № 1 (218). – С. 244-246.
7. Дробаха В.І. Аналіз технічного стану й паливної економічності тепловоза з використанням методу Херста / В.І. Дробаха, О.Д. Трихліб // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 6/8 (72). – С. 25-28. – Mode of access: [DOI: 10.15587/1729-4061.2014.29353](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.29353).
8. Крылов В.Н. Анализ состава выхлопных газов дизельного двигателя / В.Н. Крылов // Современные техника и технологии : XIX Междунар. научн.-практ. конф. (15-19 апреля 2013 г.; Томск). – Томск, 2013. – С. 58-59.
9. Каграманян А.О. Дослідження впливу основних факторів експлуатації дизелів тепловозів на викиди забруднюючих речовин / А.О. Каграманян, П.В. Рукавішніков // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. – 2010. – № 21. – С. 160-170.
10. Тартаковський Е.Д. Визначення ефективності хімотологічних заходів підвищення ефективності тепловозів в експлуатації / Е.Д. Тартаковський, Д.О. Аулін, Д.С. Андросов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2011. – № 5. – С. 67-71.
11. Nanomaterial's as fuel additives in diesel engines: A review of current state, opportunities, and challenges / T. Kegl, A. Kovac Kralj, B. Kegl, M. Kegl // Progress in Energy and Combustion Science. – 2020. – Vol. 83. – Pp. 1-22. – Mode of access: [DOI: 10.1016/j.peccs.2020.100897](https://doi.org/10.1016/j.peccs.2020.100897).
12. Blushan Kumar Ch.. Effect of di-tert butyl peroxide (DTBP) on combustion parameters and NO_x in dual fuel diesel engine with hydrogen as a secondary fuel / Ch. Blushan Kumar, D.B. Lata // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – Vol. 46, iss. 5. – Pp. 4507-4525. – Mode of access: [DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.235](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.235).
13. Effects of waste-derived ethylene glycol diacetate as a novel oxygenated additive on performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel/biodiesel blends / S. Amid, M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, A. Hajiahmad, B. Najafi, H.S. Ghaziaskar, H. Rastegari, H. Hosseinzadeh-Bandbafha, P. Mohammadi // Energy Conversion and Management. – 2020. – Vol. 203. – Pp. 1-15. – Mode of access: [DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112245](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112245).
14. Методичні вказівки з підготовки і проведення приймальних випробувань тягового рухомого складу та його складових / Е.Д. Тартаковський, А.П. Фалендиш, С.Г. Грищенко, М.І. Сергієнко. – Київ : ТОВ «Швидкий рух», 2005. – 80 с.
15. Тепловозы ТГМ4 и ТГМ4А : руководство по эксплуатации и обслуживанию / Людиновский тепловозостр. з-д. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1980. – 182 с.
16. Програма-методика проведення експлуатаційних випробувань тепловозу ТГМ4 при використанні присадки до дизельного палива DFC2020. – Харків : УкрДУЗТ, 2018. – 15 с.
17. Програма-методика еколого-енергетичних випробувань дизеля тепловозу ТГМ4 при використанні присадки дизельного палива DFC2020. – Харків : УкрДУЗТ, 2018. – 16 с.

References:

1. Bezjukov O.K., Erofeeva E.V., Zhukov V.A. Dinamika potrebleniia energeticheskikh resursov i povyshenie effektivnosti ikh ispol'zovaniia [Dynamics of consumption of energy resources and increasing the efficiency of their use]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal – Handbook. An Engineering journal with appendix*, 2015, no. 1 (214), pp. 41-48. doi: 10.14489/hb.2015.01.pp.041-048. (Rus.)
2. Falendish A.P., Gatchenko V.O., Kletska O.V., Sulezhko D.I. Model' viboru stendu dlia provedeniia ekologo-energeticheskikh viprobuvan' dizel'nogo rukhomogo skladu [Model of stand

- selection for ecological and energy tests of diesel rolling stock]. *Visnik Skhidnoukraińs'kogo natsional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalia – Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 2018, no. 2 (243), pp. 208-215. (Ukr.)
3. Falendish A.P., Gatchenko V.O., Kletska O.V. Analiz pidkhodiv do rozrakhunku vikidiv zabrudniuiuchikh rechovin z vidprats'ovanymi gazami dizeliv teplovoziv [Analysis of approaches to the calculation of pollutant emissions from diesel diesel locomotives]. *Visnik Skhidnoukraińs'kogo natsional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalia – Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 2017, no. 3 (233), pp. 228-233. (Ukr.)
 4. Zhukov V.A., Beziukov O.K., Makhfud M.M. Motornye ispytaniia modifitsirovannogo dizel'nogo topliva [Engine tests of modified diesel fuel]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2016, no. 4 (38), pp. 122-131. doi: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-122-131. (Rus.)
 5. Sravnitel'nye issledovaniia motornykh i ekologicheskikh pokazatelei dizel'nogo topliva s prisadkoi «PowerGuard 6528 Futura» na baze stendovykh motornykh ispytanii: otchet o nauchno-issledovatel'skoi rabote [Comparative studies of the engine and environmental performance of diesel fuel with the 'PowerGuard 6528 Futura' additive on the basis of engine bench tests: research report]. – St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2015. 49 p. (Rus.)
 6. Mikheev S.O. Obruntuvannia kontroliu maloї kil'kosti parametriv modernizovanogo teplovozu pri provedenni ekspluatatsiinykh viprobuvan' na nadiinist' [Substantiation of control of a small number of parameters of the modernized locomotive at carrying out operational tests on reliability]. *Visnik Skhidnoukraińs'kogo natsional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalia – Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 2015, no. 1 (218), pp. 244-246. (Ukr.)
 7. Drobakha V.I., Trikhlib O.D. Analiz tekhnichnogo stanu i palivnoi ekonomichnosti teplovoza z vikoristanniam metodu Khersta [Analysis of the technical condition and fuel efficiency of the locomotive using the Hearst method]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014, no. 6/8 (72), pp. 25-28. doi: 10.15587/1729-4061.2014.29353. (Ukr.)
 8. Krylov V.N. Analiz sostava vykhlopnykh gazov dizel'nogo dvigatel'ia. *Materiali XIX Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. «Sovremennye tekhnika i tekhnologii»* [Diesel engine exhaust gas composition analysis. Proceedings of XIX Int. sci.-pract. conf. «Modern equipment and technologies»]. Tomsk, 2013, pp. 58-59. (Rus.)
 9. Kagramanian A.O., Rukavishnikov P.V. Doslidzhennia vplivu osnovnykh faktoriv ekspluatatsii dizeliv teplovoziv na vikidi zabrudniuiuchikh rechovin [Investigation of the influence of the main factors of diesel locomotive operation on pollutant emissions]. *Zbirnik naukovykh prats' Donets'kogo institutu zaliznichnogo transportu – Collection of scientific works of the Donetsk Institute of Railway Transport*, 2010, no. 21, pp. 160-170. (Ukr.)
 10. Tartakovs'kii E.D., Aulin D.O., Androsov D.S. Vyznachennia efektyvnosti khimmotologichnykh zakhodiv pidvishchennia efektyvnosti teplovoziv v ekspluatatsii [Determining the effectiveness of chemotological measures to increase the efficiency of locomotives in operation]. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «Kharkivs'kii politekhnichnii institut» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2011, no. 5, pp. 67-71. (Ukr.)
 11. Kegl T., Kovac Kralj A., Kegl B., Kegl M. Nanomaterial's as fuel additives in diesel engines: A review of current state, opportunities, and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2020, Vol. 83, pp. 1-22. doi: 10.1016/j.peccs.2020.100897.
 12. Blushan Kumar Ch., Lata D.B. Effect of di-tert butyl peroxide (DTBP) on combustion parameters and NO_x in dual fuel diesel engine with hydrogen as a secondary fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, iss. 5, pp. 4507-4525. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.235.
 13. Amid S., Aghbashlo M., Tabatabaei M., Hajiahmad A., Najafi B., Ghaziaskar H.S., Rastegari H., Hosseinzadeh-Bandbafha H., Mohammadi P. Effects of waste-derived ethylene glycol diacetate as a novel oxygenated additive on performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel/biodiesel blends. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 203, pp. 1-15. doi: 10.1016/j.enconman.2019.112245.
 14. Tartakovsky E.D., Falendish A.P., Grishchenko S.G., Sergienko M.I. *Metodichni vkazivki z pidgotovki i provedennia priimal'nykh viprobuvan' tiagovogo rukhomogo skladu ta iogo skladov*

- vikh* [Methodical instructions on preparation and carrying out of acceptance tests of traction rolling stock and its components]. Kiev, TOV «Shvidkii rukh» Publ., 2005. 80 p. (Ukr.)
15. *Teplovozy TGM4 i TGM4A: Rukovodstvo po ekspluatatsii i obsluzhivaniiu* [Diesel locomotives TGM4 and TGM4A: Operation and maintenance manual]. Moscow, Transport Publ., 1980. 182 p. (Rus.)
 16. *Programa-metodika provedennia ekspluatatsiinih viprobuvan' teplovozu TGM4 pri vikoristanni prisadki do dizel'nogo paliva DFC2020* [Program-method of operational tests of the diesel locomotive TGM4 using additives to diesel fuel DFC2020]. Kharkiv, UkrDUZT Publ., 2018. 15 p. (Ukr.)
 17. *Programa-metodika ekologo-energetichnih viprobuvan' dizelia teplovozu TGM4 pri vikoristanni prisadki dizel'nogo paliva DFC2020* [Program-method of ecological and energy tests of diesel locomotive TGM4 using diesel fuel additive DFC2020]. Kharkiv, UkrDUZT Publ., 2018. 16 p. (Ukr.)

Рецензент: А.А. Лямзін
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 30.09.2020

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.13.001

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226215

© Шаріфов Аллахверді Джамал огли*

ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЗІТКНЕННЯ АВТОМОБІЛІВ, ЯКІ РУХАЮТЬСЯ ОДИН ЗА ОДНИМ

Автомобілі, які складають транспортний потік, різновидні. На вулицях міста транспортний потік складається, в основному, з легкових та вантажних автомобілів, а також з автобусів. Кількість інших транспортних засобів в транспортному потоці незначна, тому при розрахунках їх можна не враховувати. Попадання в чергу автомобілів, що рухаються один за іншим, має випадковий характер. При цьому спостерігається кілька випадків: легковий автомобіль рухається за легковим; вантажний автомобіль рухається за легковим; автобус рухається за легковим; легковий автомобіль рухається за вантажним; вантажний автомобіль рухається за вантажним; автобус рухається за вантажним; легковий автомобіль рухається за автобусом, вантажний автомобіль рухається за автобусом, автобус рухається за автобусом. Врахування випадкового попадання автомобілів в чергу при виникненні дорожньо-транспортної пригоди (ДТП) має велике значення для визначення гальмівного шляху автомобіля, тому що різні автомобілі мають різні габаритні параметри і конструкції. При вивченні зіткнень автомобілів при рівномірному й нерівномірному розподілі автомобілів в транспортному потоці обов'язково повинні враховуватись значення гальмівного шляху автомобіля. Гальмівний сигнал автомобіля, що є першим з автомобілів, що рухаються один за другим в транспортному потоці, включається тільки після часу реакції водія переднього автомобіля. Тому настільки ж запізнюється гальмування заднього автомобіля. Час, необхідний для зупинки заднього автомобіля, буде дорівнювати сумі часу реакції переднього автомобіля і часу спрацьовування гальмівного механізму, оскільки водій заднього автомобіля отримує інформацію про гальмування переднього автомобіля тільки після включення гальмівного сигналу переднього автомобіля. Більшість таких випадків закінчується зіткненням автомобілів. З огляду на ситуацію для запобігання аварій в транспортному потоці можна визначити оптимальну відстань між автомобілями, що рухаються один за одним. Це дозволить уникнути наїзду ззаду при екстремому гальмуванні переднього автомобіля.

Ключові слова: транспортний потік, дальність, аварія, швидкість, інтенсивність руху.

Allahverdi Sharifov. Factors influencing the collision of cars moving one after another. The cars that make up the traffic stream are different. In the streets of the city, the traffic stream consists mainly of cars, trucks and buses. The number of other transport vehicles in the traffic stream is insignificant, so they can be ignored in the calculations. Cars getting into a queue move one after another in a random manner. As this takes place, there are several cases: a passenger car moves behind a passenger car; a lorry moves behind a passenger car; an bus follows a passenger car; a passenger car follows a truck; a truck moves after a truck; a bus moves after a truck; a passenger car is moving behind a bus. A truck follows a bus, a bus follows a bus. Inadvertent queuing of cars in case of a traffic accident (RTA) is of great importance for determining the braking distance of the car, for different cars have different dimensions and designs. When studying

* д-р філософії, доцент, Азербайджанський Технічний Університет, м. Баку, Азербайджан, sharifov.allahverdi@aztu.edu.az

collisions of cars in a uniform and uneven distribution of cars in the traffic stream, the braking distance of the car must be taken into account. The brake signal of the front vehicle in the traffic stream is activated only after the reaction time of the driver of the front vehicle. That is why the braking of the rear car takes some time. The time required to stop the rear vehicle will be equal to the sum of the reaction and braking time of the front vehicles and the response time of the braking, as the driver of the rear vehicle receives information as to the braking of the front vehicle only after the front vehicle's braking signal is activated. Most of these cases end in a car collision. Taking into account the situations to prevent accidents in the traffic stream, it is possible to determine the optimal distance between the cars moving one after another. This will make it possible to avoid a rear-end collision with emergency braking of the front car.

Keywords: *traffic stream, range, accident, speed, traffic intensity.*

Постановка проблеми. Зі зростанням чисельності населення кількість транспортних засобів (ТЗ) поступово збільшується. Це пов'язано зі збільшенням потреби населення у переміщенні. Так як зростання чисельності населення призводить до розширення територій населених пунктів, відстань доступності також збільшується. У підсумку на дорогах спостерігаються щільні потоки, транспортні затори. При щільному русі транспортних засобів виникають деякі конфліктні ситуації і небезпека для учасників руху. Це стосується як водіїв і пасажирів, так і пішоходів. Дотримання відстані безпеки є основною вимогою до водіїв під час руху в транспортному потоці. Щоб уникнути нещасних випадків, водії повинні вибирати правильну відстань і мати можливість зупинити автомобіль, якщо машина перед ними зупиняється з якої-небудь причини. У таких випадках може виникати ланцюгова аварія. Але різні автотransпортні засоби мають різні технічні характеристики і у зв'язку з цим вивчення руху автомобілів, що рухаються один за одним, є актуальним питанням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори [1] запропонували створити концептуальну основу, яка пояснює процес виникнення аварій з точки зору ланцюжка. Необхідність і переваги застосування концепції ланцюжка для аналізу і запобігання аварій запропоновано розкрити шляхом побудови шаблону для цього. Пропонується двоетапний підхід до аналізу аварій на основі шаблону.

Моюїд Бін Іслам і Куннауе Канітпонг [2] розглянули рух автомобілів по двосмуговій дорозі з різним станом освітлення. Авторами вивчено ймовірність наїзду ззаду при недотриманні дистанції між автомобілями. Вивчено кількість випадків з урахуванням технічного стану транспортних засобів. Запропоновано врахування людського фактору, стану видимості дороги.

В.Д. Балакін зазначає, що з ростом інтенсивності руху зростає кількість попутних зіткнень, так званих ланцюгових, коли один за одним стикаються кілька автомобілів [3]. Оскільки при попутному зіткненні уповільнення заднього автомобіля виходить більш інтенсивним, ніж при реалізації граничного зчеплення, то третій автомобіль, що рухається за ним навіть на безпечній дистанції, також входить в контакт з транспортними засобами, що зіткнулися. У таких ланцюгових послідовних зіткненнях необхідно ретельно вивчити пошкодження і деформації, які за обсягом повинні спадати від перших засобів, що зіткнулися, до наступних. Для більш раннього визначення гальмування автомобілів, що йдуть попереду, в даний час в верхніх зонах кузова ззаду ТЗ встановлюються дублери сигналів гальмування.

В роботі А. Мутусамі [4] представлені результати різних робіт, присвячених дорожньо-транспортним пригодам (ДТП) в різних країнах. Дослідження літератури допомагає дослідникам мати уявлення про наслідки ДТП і заходи безпеки, яких необхідно дотримуватися. У роботі наведені емпіричні деталі і різні важливі статистичні показники, пов'язані з серйозністю ДТП і заходам щодо скорочення їх кількості. Багатоплановий огляд різної літератури показав, що ДТП є результатом впливу людей, транспортних засобів та навколишнього середовища.

Мета статті – вивчення ймовірності виникнення наїздів з заднього боку автомобілів при різних дистанціях між ними, вивчення характеру дорожньо-транспортних пригод при рівномірному і нерівномірному розподілу автомобілів в транспортному потоці.

Виклад основного матеріалу. Автомобілі, що становлять транспортний потік, не завжди мають однаковий склад. Транспортний потік майже повністю складається з легкових автомобілів (ЛА), вантажних автомобілів (В) і автобусів (А). Решта транспортних засобів або взагалі не

є частиною потоку, або їх участь можна не враховувати через занадто малу питому вагу.

Попадання автомобілів в чергу рухомих в транспортному потоці один за іншим є випадковим. У транспортному потоці черги автомобілів можуть бути в таких випадках:

- 1) легковий автомобіль рухається за легковим;
- 2) грузовой автомобіль рухається за легковим;
- 3) автобус рухається за легковим;
- 4) легковий автомобіль рухається за вантажним;
- 5) грузовой автомобіль рухається за вантажним;
- 6) автобус рухається за вантажним;
- 7) легковий автомобіль рухається за автобусом;
- 8) грузовой автомобіль рухається за автобусом;
- 9) автобус рухається за автобусом.

У разі ДТП або гальмування черга транспортних засобів має велике значення для визначення їх гальмівного шляху. Основна причина цього – різноманітність конструкцій гальмівних систем в різних типах автомобілів. Відповідно, їх способи зупинки будуть різними.

Випадки потрапляння 25 автомобілів в чергу в залежності від складу транспортного потоку наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Аналіз випадкового потрапляння автомобілів, що йдуть підряд, в чергу

Серійний номер автомобіля	Склад потоку, %				
	ЛА – 35% В – 30% А – 35%	ЛА – 50% В – 25% А – 25%	ЛА – 60% В – 15% А – 25%	ЛА – 70% В – 10% А – 20%	ЛА – 80% В – 5% А – 15%
1	3	2	2	2	1
2	2	2	1	1	1
3	2	2	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1
6	3	3	3	2	1
7	1	1	1	1	1
8	3	3	3	2	1
9	3	3	3	3	2
10	3	2	2	2	1
11	1	1	1	1	1
12	2	1	1	1	1
13	3	3	3	3	3
14	3	3	3	2	1
15	2	1	1	1	1
16	3	3	3	3	3
17	3	3	3	3	3
18	1	1	1	1	1
19	3	3	3	3	3
20	2	1	1	1	1
21	2	2	1	1	1
22	3	3	3	2	1
23	1	1	1	1	1
24	2	2	1	1	1
25	2	3	1	1	1

Примітка: 1 – ЛА (легковий автомобіль); 2 – В (вантажний автомобіль); 3 – А (автобус).

За даними, що вказані в таблиці 1, можна передбачити кількість аварій в транспортному потоці в залежності від транспортних засобів, які йдуть один за одним. При дослідженні зітк-

неня необхідно враховувати процентну частку потоку в залежності від типу транспортного засобу, що складає потік. Це пов'язано з тим, що габаритні розміри і конструкція цих транспортних засобів безпосередньо впливають на гальмівний шлях при зіткненні [5].

ДТП можуть відбуватися з різних причин. Причиною таких аварій може бути тільки одна машина (перекидання), дві машини (зіткнення двох машин), а також велика кількість автомобілів.

Якщо в транспортному потоці стикаються два наступних автомобіля, мінімальна кількість учасників ДТП – два. З впливом різних факторів в деяких випадках ця кількість збільшується і виникають ланцюжкові аварії з тяжкими наслідками.

Через різницю відстані між автомобілями в транспортному потоці виникають небезпеки виникнення ДТП. При дослідженні таких випадків також слід врахувати довжину гальмівних шляхів транспортних засобів для різних випадків.

При великих значеннях інтенсивності і швидкості руху в транспортному потоці зіткнення спостерігаються як для рівномірного, так і для нерівномірного розподілу автомобілів, що рухаються один за одним.

Гальмівний сигнал першого автомобіля з тих, що їдуть один за одним в транспортному потоці, включається тільки після часу реакції водія переднього автомобіля. Тому настільки ж запізнюється гальмування заднього автомобіля. Час, необхідний для зупинки заднього автомобіля, буде дорівнювати сумі часу реакції переднього автомобіля і часу спрацьовування гальмівного механізму. Водій автомобіля ззаду отримує інформацію про гальмування автомобіля попереду тільки від заднього сигналу автомобіля. Різке гальмування переднього автомобіля [6] в більшості випадків призводить до зіткнення (рис. 1) [7].



Рис. 1 – ДТП, що було спричинено наїздом ззаду

Щоб підвищити безпеку руху і запобігти виникнення нещасних випадків, водії повинні вибрати правильний час і відстань до переднього транспортного засобу. При цьому вони будуть мати змогу зупинити транспортний засіб, яким вони керують.

Основні причини аварій: недотримання правил дорожнього руху, неухважність водія і невірна оцінка водієм технічних параметрів транспортних засобів. Водій повинен слідувати знаку «Обмеження максимальної швидкості», розміщеному на вулицях, дорогах і автомагістралях для обмеження швидкості. Він також повинен враховувати технічний стан автомобіля, яким він керує [8].

Безпечна відстань між транспортними засобами в черзі транспортного потоку є випадковим параметром і змінюється, в основному, в залежності від інтенсивності потоку і швидкості транспортних засобів. Більшу частину руху автомобіль витрачає на розгін і гальмування. Крім того, інтенсивність руху варіюється. Слід зазначити, що зі збільшенням значення інтенсивності руху нерівномірність відстані між автомобілями зменшується, а збільшення швидкості призводить до збільшення цієї нерівномірності [9].

Під час руху автомобілів відстань між ними не завжди рівномірна. Значення нерівномірності коливається у дуже великих інтервалах.

Значення зміни відстані між 25 автомобілями, що включені у потік, в разі рівномірного і нерівномірного розподілу автомобілів в транспортному потоці наведені в таблиці 2 і таблиці 3, а криві показані на рисунку 2.

Таблиця 2

Значення розкиду відстані між автомобілями,
що рухаються з постійною швидкістю в потоці при різній інтенсивності

Серійний номер (місцезнаходження) автомобіля, №	$V_a = 20$ км/год			
	$N_a = 100$ авт/год		$N_a = 500$ авт/год	
	Рівномірний розподіл	Нерівномірний розподіл	Рівномірний розподіл	Нерівномірний розподіл
1-2	195,0	234,0	35,0	40,3
2-3	195,0	165,3	35,0	40,0
3-4	195,0	165,6	35,0	42,0
4-5	195,0	175,5	35,0	31,5
5-6	195,0	175,0	35,0	38,5
6-7	195,0	176,0	35,0	29,8
7-8	195,0	234,0	35,0	38,5
8-9	195,0	214,0	35,0	40,3
9-10	195,0	156,0	35,0	28,0
10-11	195,0	234,0	35,0	31,5
11-12	195,0	214,0	35,0	42,0
12-13	195,0	224,0	35,0	31,6
13-14	195,0	156,0	35,0	31,5
14-15	195,0	234,0	35,0	28,0
15-16	195,0	175,0	35,0	42,0
16-17	195,0	156,0	35,0	42,0
17-18	195,0	156,0	35,0	40,3
18-19	195,0	214,0	35,0	38,5
19-20	195,0	156,0	35,0	29,8
20-21	195,0	176,0	35,0	42,0
21-22	195,0	166,0	35,0	28,0
22-23	195,0	234,0	35,0	28,0
23-24	195,0	214,5	35,0	38,5
24-25	195,0	165,8	35,0	29,8
25-26	195,0	224,3	35,0	28,0

Таблиця 3

Значення розкиду відстані між автомобілями,
що рухаються з постійною швидкістю в потоці при різній інтенсивності

Серійний номер (місцезнаходження) автомобіля, №	$V_a = 40$ км/год			
	$N_a = 100$ авт/год		$N_a = 500$ авт/год	
	Рівномірний розподіл	Нерівномірний розподіл	Рівномірний розподіл	Нерівномірний розподіл
1-2	395,0	454,3	75,0	67,5
2-3	395,0	355,5	75,0	90,0
3-4	395,0	316,0	75,0	86,3
4-5	395,0	474,0	75,0	90,0
5-6	395,0	355,5	75,0	60,0
6-7	395,0	474,0	75,0	67,5
7-8	395,0	355,5	75,0	67,5
8-9	395,0	434,5	75,0	67,5
9-10	395,0	434,5	75,0	82,5

Продовження таблиці 3

10-11	395,0	355,5	75,0	63,8
11-12	395,0	474,0	75,0	67,5
12-13	395,0	355,5	75,0	63,8
13-14	395,0	355,5	75,0	67,5
14-15	395,0	454,3	75,0	60,0
15-16	395,0	355,5	75,0	86,3
16-17	395,0	355,5	75,0	82,5
17-18	395,0	434,5	75,0	90,0
18-19	395,0	454,3	75,0	90,0
19-20	395,0	355,5	75,0	90,0
20-21	395,0	316,0	75,0	90,0
21-22	395,0	335,8	75,0	82,5
22-23	395,0	424,0	75,0	60,0
23-24	395,0	316,0	75,0	67,5
24-25	395,0	355,5	75,0	60,0
25-26	395,0	335,8	75,0	82,5

Примітка: V_a – швидкість автомобілі; N_a – інтенсивність руху.

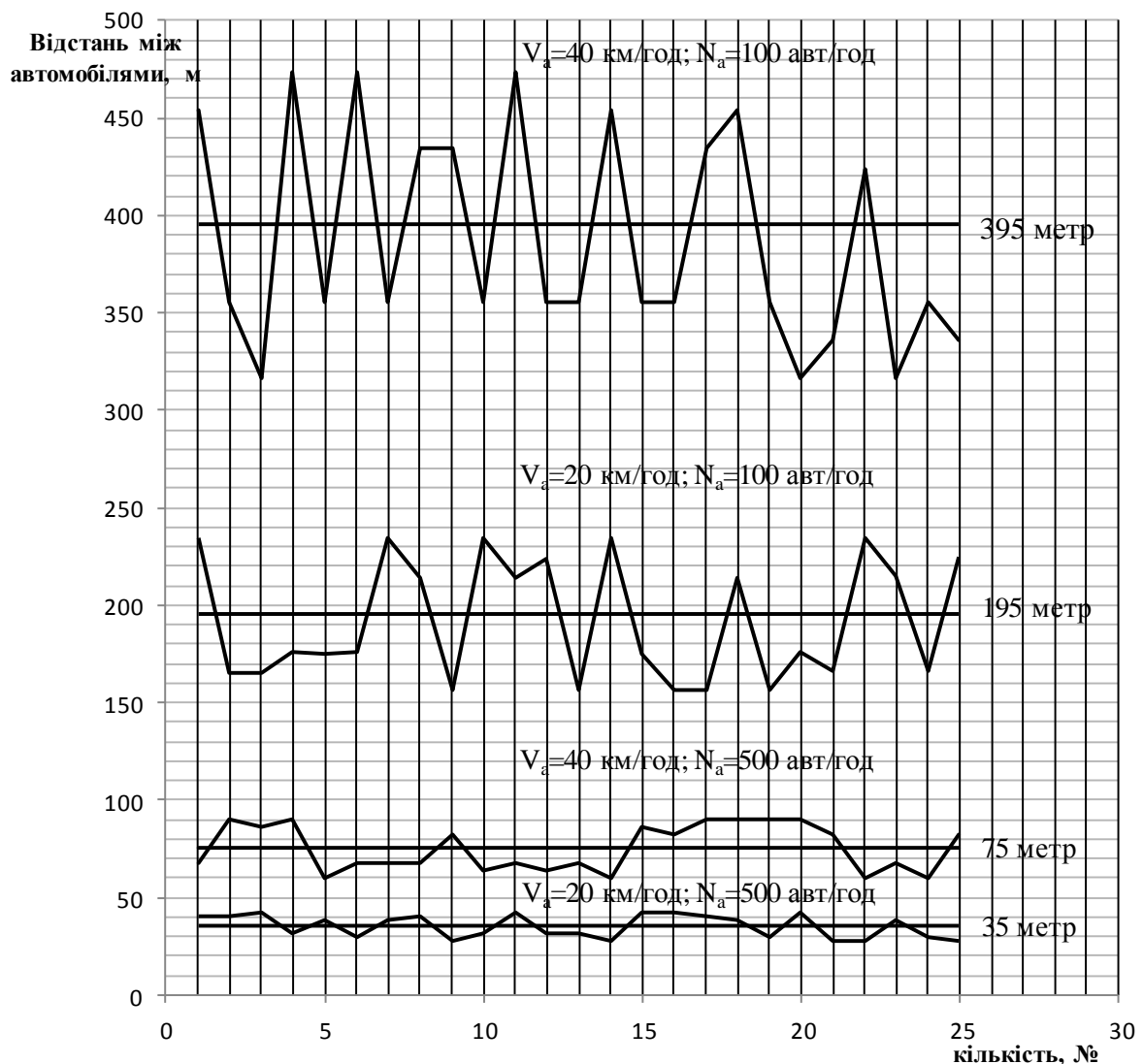


Рис. 2 – Графік зміни відстані між 25 автомобілями, що рухаються з постійною швидкістю при рівномірному і нерівномірному розподілу в транспортному потоці

Аналіз значень в таблиці 2 і таблиці 3, а також на рисунку 2, показує, що відстань між транспортними засобами, що рухаються один за одним у транспортному потоці, є постійною величиною, незалежно від місця транспортних засобів в черзі, і величина цієї зміни часто буває випадковою.

При постійному значенні швидкості збільшення інтенсивності руху знижується нерівномірність відстані між транспортними засобами, що рухаються в транспортному потоці. Максимальне зниження нерівномірності відбувається на межі насичення інтенсивності руху по смузі. Таким чином, при інтенсивності руху 100 авт/год і швидкості 20 км/год відстань між автомобілями (для 25 автомобілів, що знаходяться у черзі) становить 195 метрів при рівномірному розподілі, максимальна відстань при нерівномірному розподілі становить 234 метра, мінімальна відстань – 156 метрів (різниця $234-156 = 78$ метрів). При швидкості 20 км/год в разі збільшення швидкості руху до 500 авт/год вона становить 350 метрів при рівномірному розподілі. При нерівномірному розподілі максимальна відстань становить 42 метри, а мінімальна відстань – 28 метрів (різниця $42-28 = 14$ метрів).

При швидкості 40 км/год і інтенсивності руху 100 автомобілів на годину відстань між автомобілями становить 395 метрів в рівному розподілі, в той час як при в нерівномірному потоці максимальна відстань становить 474 метрів, мінімальна – 316 метрів (різниця 158 метрів). При тому ж значенні швидкості руху для потоку з інтенсивністю 500 авт/год відстань між автомобілями при рівномірному розподілі становить 75 метрів, максимальна відстань при нерівномірному розподілі – 90 метрів, а мінімальна – 60 метрів.

Таким чином, при збільшенні швидкості руху зі 100 км/год від 20 км/год до 40 км/год відстань між рівномірно розподіленими автомобілями, що рухаються послідовно, збільшується від 195 метрів до 395 метрів (різниця 200 метрів), між нерівномірно розподіленими автомобілями збільшується для максимальних значень – з 234 метрів до 474 метрів (різниця 20 метрів) і мінімальних значень – з 156 метрів до 316 метрів (різниця 160 метрів). Навіть якщо значення інтенсивності руху змінюється (збільшується), зазначена закономірність залишається в силі. При збільшенні швидкості руху з 20 км/год до 40 км/год при інтенсивності 500 авт/год максимальна відстань при рівномірному розподілі збільшується від 35 метрів до 75 метрів (різниця 40 метрів), при нерівномірному розподілі – від 42 метрів до 92 метрів (різниця 48 метрів) відповідно. При такій зміні швидкості для нерівномірного розподілу мінімальна відстань збільшується від 28 метрів до 60 метрів (різниця 32 метра). У межах зазначених інтервалів зміна значення відстані між автомобілями при нерівномірному розподілі завжди має випадковий характер.

Висновки

В разі як рівномірного, так і нерівномірного розподілу автомобілів, що рухаються в транспортному потоці з однаковою інтенсивністю руху, відстань між послідовними автомобілями, що рухаються з різною швидкістю, збільшується зі збільшенням швидкості. Щоб підвищити безпеку руху і запобігти виникненню нещасних випадків, водії повинні вибрати правильну відстань до автомобіля, що рухається спереду, і мати достатньо часу і можливість для гальмування транспортного засобу, яким вони керують, в разі зупинки за будь-якої причини.

Перелік використаних джерел:

1. Wong J.-T. Accident analysis and prevention from the chain perspective and revision report / J.-T. Wong, Yi-S. Chung // Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. – 2007. – Vol. 7. – Pp. 2844-2859. – Mode of access: DOI: 10.11175/easts.7.2844.
2. Islam M.B. Identification of factors in road accidents through in-depth accident analysis / Mouyid Bin Islam, K. Kanitpong // IATSS Research. – 2008. – Vol. 32, iss. 2. – Pp. 58-67. – Mode of access: DOI: 10.1016/S0386-1112(14)60209-0.
3. Балакин В.Д. Экспертиза дорожно-транспортных происшествий : учебное пособие / В.Д. Балакин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Омск : СибАДИ, 2015. – 136 с.
4. A Review on Road Traffic Accident and Related Factors / A.P. Muthusamy, M. Rajendran, K. Ramesh, P. Sivaprakash // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 11. – Pp. 28177-28183.
5. Шарифов А.Дж. Расследование аварий в зависимости от состава транспортного потока / А.Дж. Шарифов // Журнал научных работ. – 2018. – № 4. – С. 194-197.

6. Джафаров Т.Р. Исследование некоторых факторов, влияющих на возникновение цепной аварии в различных условиях дорожного движения / Т.Р. Джафаров, А.Дж. Шарифов // Инновационные технологии в образовании и науке : Республ. науч.-практ. конф., посвященная 60-летию Азербайджанского Технического Университета. – Баку, 2010. – С. 372-374.
7. Три случая, когда ударивший сзади не виноват [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: www.drivenn.ru/journal/novosti/tri-sluchaya-kogda-udarivshiy-szadi-ne-vinovat-id24071. – Название с экрана.
8. Шарифов А.Дж. Статистический анализ дорожно-транспортных происшествий с наездом сзади в Азербайджанской Республике / А.Дж. Шарифов // Материалы XVIII Республиканской научной конференции докторантов и молодых исследователей. – Баку, 2013. – Том I. – С. 257-260.
9. Шарифов А.Дж. Характер случайных изменений расстояния между автомобилями, движущимися по одной полосе в транспортном потоке / А.Дж. Шарифов // Перспективы развития транспортно-дорожного комплекса Азербайджанской Республики : Респуб. научн.-практ. конф. – Баку, 2017. – С. 53-54.

References:

1. Wong J.-T., Chung Yi-S. Accident analysis and prevention from the chain perspective and revision report. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2007, vol. 7, pp. 2844-2859. **doi: 10.11175/easts.7.2844.**
2. Islam M.B., Kanitpong K. Identification of factors in road accidents through in-depth accident analysis. *IATSS Research*, 2008, vol. 32, iss. 2, pp. 58-67. **doi: 10.1016/s0386-1112(14)60209-0.**
3. Balakin V.D. *Ekspertiza dorozhno-transportnykh proisshествii : uchebnoe posobie* [Examination of road traffic accidents: a tutorial]. Omsk, SibADI Publ., 2015. 136 p. (Rus.)
4. Muthusamy A.P., Rajendran M., Ramesh K., Sivaprakash P. A Review on Road Traffic Accident and Related Factors. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 11, pp. 28177-28183.
5. Sharifov A. Rassledovanie avarii v zavisimosti ot sostava transportnogo potoka [Investigation of accidents depending on the composition of the traffic flow]. *Zhurnal nauchnykh rabot – Scientific journal*, 2018, no. 4, pp. 194-197. (Rus.)
6. Dzhafarov T.R., Sharifov A. Issledovanie nekotorykh faktorov, vliiaushchikh na vozniknovenie tsepnoi avarii v razlichnykh usloviakh dorozhnogo dvizheniia. *Materiali Respubl. nauch.-prakt. konf., posviashchennaia 60-letiiu Azerbaidzhanskogo Tekhnicheskogo Universiteta «Innovatsionnye tekhnologii v obrazovanii i nauke»* [Investigation of some factors affecting the occurrence of a chain accident in various traffic conditions. Proceedings of Republ. sci.-pract. conf. dedicated to the 60th anniversary of the Azerbaijan Technical University «Innovative technologies in education and science»]. Baku, 2010, pp. 372-374. (Rus.)
7. *Tri sluchaia, kogda udarivshii szadi ne vinovat* (Three cases when the hit from behind is not to blame) Available at: www.drivenn.ru/journal/novosti/tri-sluchaya-kogda-udarivshiy-szadi-ne-vinovat-id24071 (accessed 15 July 2020).
8. Sharifov A. Statisticheskii analiz dorozhno-transportnykh proisshествii s naездом szadi v Azerbaidzhanskoj Respublike. *Materiali XVIII Respubl. nauch. konf. doktorantov i molodykh issledovatelei* [Statistical analysis of rear-end collision traffic accidents in the Republic of Azerbaijan. Proceedings of Republ. sci.-pract. conf. of Doctoral Students and Young Researchers]. Baku, 2013, vol. I, pp. 257-260. (Rus.)
9. Sharifov A. Kharakter sluchainykh izmenenii rasstoianiiia mezhdu avtomobiliami, dvizhushchimisia po odnoi polose v transportnom potoke. *Materiali Respubl. nauch.-prakt. «Perspektivy razvitiia transportno-dorozhnogo kompleksa Azerbaidzhanskoi Respubliki»* [The nature of random changes in the distance between cars moving along the same lane in a traffic stream. Proceedings of Republ. sci.-pract. conf. «Prospects for the development of the transport and road complex of the Republic of Azerbaijan»]. Baku, 2017, pp. 53-54. (Rus.)

Рецензент: Гейдаров Шаміль Хілал оглу
д-р техн. наук, проф., Азербайджанський Технічний Університет

Стаття надійшла 05.10.2020

**CREATION OF A SIMULATION MODEL OF BUS TRAFFIC
IN URBAN ROUTES**

The expediency of developing simulation models for studying the operation of buses on city bus routes has been substantiated. The main advantages of using simulation models are shown. An agent-based simulation is most suitable for building a bus route model. The paper shows the main disadvantages of the developed simulation models on the early versions of the Anylogic program. A methodology has been developed for constructing a simulation model for the operation of a bus route using the Anylogic 8.5.2 software tools, which takes into account the movement of buses on the general traffic flow. This can help bus schedule designers to take into account traffic density. The sequence of using the program tools for entering data on passenger traffic and bus operation along the route is given. The proposed methodology makes it possible to monitor the movement of buses, both existing routes and projected ones. In the work, the developed logical schemes for constructing a simulation model of bus routes with coincident stops, as well as bus routes with the same initial stops. To improve the quality of passenger service, it is proposed to take into account the regularity of the arrival of passengers at the bus stop points. The logic diagram shows tools and program codes for entering and changing passenger arrival parameters.

Keywords: bus route, route network, model, simulation, agent.

Дашдаміров Ф.С. Створення симуляційної моделі руху автобусів на міських маршрутах. Обґрунтовано доцільність розробки імітаційних моделей для дослідження роботи автобусів на міських автобусних маршрутах. Показані основні переваги застосування імітаційних моделей. Для побудови моделі автобусного маршруту найбільш підходить симуляція, що заснована на агентному моделюванні. У роботі показані основні недоліки розроблених імітаційних моделей на ранніх версіях програми Anylogic. Розроблено методіку побудови моделі симуляції роботи автобусного маршруту за допомогою інструментів програмного забезпечення Anylogic 8.5.2, яка враховує рух автобусів у загальному транспортному потоці. Це може допомогти розробникам розкладів руху автобусів враховувати транспортну цілісність. Дана послідовність використання інструментів програми для введення даних пасажиропотоку і роботи автобусів за маршрутом. Для введення параметрів руху запропоновано використання бібліотеки Road, а для введення параметрів руху пасажирів – бібліотеки Pedestrian. З метою спостереження руху автобусів в загальному транспортному потоці введення параметрів транспортного потоку також передбачається з використанням бібліотеки Road. Запропонована методіка дає можливість стежити за рухом автобусів як існуючих маршрутів, так і тих, що проектується. Для автобусних маршрутів з співпадаючими зупинками прийнято доцільним облік пропускнуої спроможності кожної зупинки. При великій кількості маршрутів, які використовували однакову зупинку, можна розподілити зупинки відомим методом, на який є посилання у статті. У роботі розроблені логічні схеми для побудованої симуляційної моделі автобусних маршрутів з співпадаючими зупинками, а також автобусних маршрутів з однаковими початковими зупинками. Для підвищення якості обслуговування пасажирів запропоновано облік закономірностей прибуття пасажирів у пункти зупинки автобусного маршруту. У логічній схемі показані інструменти та програмні коди для введення параметрів прибуття пасажирів і їх зміни.

Ключові слова: автобусний маршрут, маршрутна мережа, модель, симуляція, агент.

* PhD, ass. professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan, dashdamirov.fuad@aztu.edu.az

Description of the problem. In large cities the public transport network is constantly changing as urban infrastructure changes. Therefore there is a need to revise the work of the route network more often. Changing route lines, using new modes of transport and creating passenger exchange points requires the creation of effective models that quickly reflect changes in the public transport system.

The development of the urban public transport system largely depends on the correct application of a systematic approach to this system. In modern conditions, the quality of passenger service determines the competitiveness of each transport company that offers the appropriate services. When organizing the work of city bus routes, the correct accounting of the flow of passengers is of great importance in terms of saving the resource of vehicles and in terms of reducing the loss of time of passengers. To achieve the goal, one should use the capabilities of modern information technologies, including applied programs. Therefore, the use of simulation models in the creation and management of the public transport route network is an urgent task.

Analysis of recent research and publications. Many works have been devoted to the application of simulation models in the creation, organization and management of various systems, including urban public transport.

Author [1] notes that simulation when studying complex systems is practically the main available method for obtaining information about the behavior of a system under conditions of uncertainty. Among the characteristic features of large systems stand out: a significant number of elements, the relationship and interaction between the elements, the hierarchy of the management structure and human participation in management, the need to make decisions under conditions of uncertainty.

Katalevsky D. [2] emphasizes that agent-based modeling can introduce irrational moments in decision-making. In this regard, simulation is becoming a powerful decision support tool for a manager. In some programs, such as AnyLogic, it is possible to include network analysis in simulation modeling in order to more accurately assess the dynamics of interaction and customer response to a new product or service.

According to the author [3], methods of mathematical and simulation modeling can make a huge contribution to the development of changes in the traffic patterns of public transport in connection with the introduction of new ones. In the field of passenger traffic modeling, PTV Vision software systems are mainly used. In such packages, for example, it is impossible to simulate the logic of a dispatcher deciding whether to leave a vehicle when there is a strong delay in schedule. Also, when modeling, the researcher is forced to divide the territory of the city into microdistricts, without taking into account the correspondence within them. Thus, it is limited by the capabilities provided by the developer.

Gizem Gunesh [4] emphasizes simulation model is a copy of a real world system on computer and can be used to see results of different scenarios without nothing changes in the real world. But we have to not forget that models aren't represent to real system exactly. Because real systems are more complex than the models. So simulation modeling typically requires some training and learning, in a conclusion it's harder than mathematical models. While an AB simulation is modeling, agents, agents' behavior, environment and relationship between each other are determined generally. AnyLogic makes modeling AB easier about creating or deleting an agent, relationship or any description. AnyLogic based on object-oriented that means everything in system is built on objects (that means agents in AB simulation). Two of the strongest point of the object-oriented are 10 expressing reality (that means a real system is abstracted as you modeled) and managing change. In addition, AnyLogic simulation software uses Java programming language. So, it helps to understand how we can model easily.

Purpose of the article is to develop a logical diagram of a simulation model of a bus route or a model of a bus route network to observe the influence of management decisions on changing the mode of movement of vehicles.

Presentation of the main material. It is known that models can be different: physical, mental, template, algorithmic, computer, etc. The main difference and advantage of computer models from other models is that they can represent any problem in a flexible virtual format.

Almost everyone is touched by some form of transportation every day of their lives. We rely on both public and private systems to get us to work, school, shopping, or to our favorite form of recreation. We take for granted the underlying system supporting this complex network of roadways, rail, and public transit routes. And these systems are very complex. They consist of miles of road surface and track with multiple control mechanisms to regulate the flow of vehicles. The systems have become

so complex that a seemingly minor adjustment to the timing of a traffic light in one part of the city can have a drastic effect on traffic movement miles away. Traffic engineers employ simulation to test these adjustments for just this reason. It is far better to see the results in a simulation and watch traffic back up there than it is to have hundreds of frustrated motorists wasting valuable time traveling at a speed far below their expectation. Large-scale regional traffic simulations, known as Macroscopic Traffic Simulations, are capable of showing the effects of these changes on very complex networks of roadways covering large regional areas [5].

There are six main benefits of simulation [6]:

1. Simulation models allow you to analyze the system and find solutions when methods such as analytical reports, linear programming, etc. are not effective or do not give any results.
2. Development of a simulation model after choosing the appropriate abstraction stage is a simpler process than analytical modeling.
3. The structure of the simulation model more naturally reflects the structure of the real system. The main reason for this is that simulation models are developed primarily using visual languages.
4. In the simulation model, you can observe any creature not lower than the level of abstraction and measure any value. In addition, measurements and statistical analysis can be added at any time.
5. The main advantage of simulation is the ability to track the behavior of the system at any time in the form of animation. Animation is used not only for displaying the results, but also for checking and correcting.
6. Simulation models are more attractive and convincing than spreadsheets. Presentation of simulation models is more effective than presentations that consist only of figures and tables.

There are 3 main types of simulation: system dynamics, discrete event simulation, and agent-based simulation. Among these agent-based modeling is the most suitable for modeling the bus route network [7].

Agents are intelligent objects that means they can make decision. They can change their decision as their experiment. They can control themselves, for that situation we say agents are decentralised. They have parameters and variables differently and communicate each other and their environment. Agents' reactions depend on their state. In a system, it's not obligated that all agents have to be same object. So, one agent can be a car and another agent can be a customer. In this case vehicles and passengers act as agents.

Modeling the operation of the bus route network allows you to control the process by changing indicators, road conditions with changing passenger flows and modes of bus movement. Simulation models allow for specific process characteristics. This includes the description and analysis of probabilistic processes.

A bus route simulation model can be created in *Anylogic 8.5.1* or *8.5.2* in the **Road** library using the *CarSource*, *CarMovieto*, *CarDispose*, *BusStop*, *Delay* tools. One of the main advantages of the program is that you can pre-specify the intervals between buses, the number of buses, the number and location of stops like on a real bus route. At the same time using the statistics of existing bus routes the program can use numbers from *MS Excel* files as data [1, 2, 8].

In a simulation model the nature of changes in the number of passengers arriving at a stop can be taken into account using the *Pedestrian* library. The influence of this parameter is taken into account in the bus schedule by the time of stopping at stops.

It is known that the simultaneous arrival of more than 3 buses is not recommended at bus stops. In this case it is advisable to scatter the stops along the routes. Stops on city routes can have intense (more than 15 passengers, including pick-up and drop-off intervals), medium (5-15 passengers) and low (up to 5 passengers) passenger traffic. Due to the high traffic volume of buses on different routes, they interfere with each other at stops. In such cases routes are scattered by dividing routes into two or more groups. The scattering of stops is carried out in each direction in the following sequence [9]:

1. The average (estimated) interval I of movement of all routes passing through the parking lot is calculated.
2. The average delay time of the bus t_{land} due to the embarkation and disembarkation of passengers is determined.
3. The condition $t_{land} < I$ is checked. If this condition is not met, there will be significant delays and the scattering of stops will be important. If I is 8 times greater than t_{land} no scattering is required.

4. The probability $p(t_i)$ of exceeding the delay of the bus a certain value is determined (for example, 1 minute):

$$p(t_i > 1) = \frac{t_{land}}{I} e^{-\left(\frac{1}{t_{land}} - \frac{1}{I}\right)}$$

The expediency of scattering the scattering according to the established probability is substantiated. If the probability is greater than 0.2, the dispersion is considered appropriate.

An example of a scheme for creating bus routes using *Anylogic* software for buses departing from the same starting stop is shown in Figure 1. In this case the *SelectOutput* agent is used. The bus is entered into the road library using the *CarSource* tool. Bus selected as vehicle type.

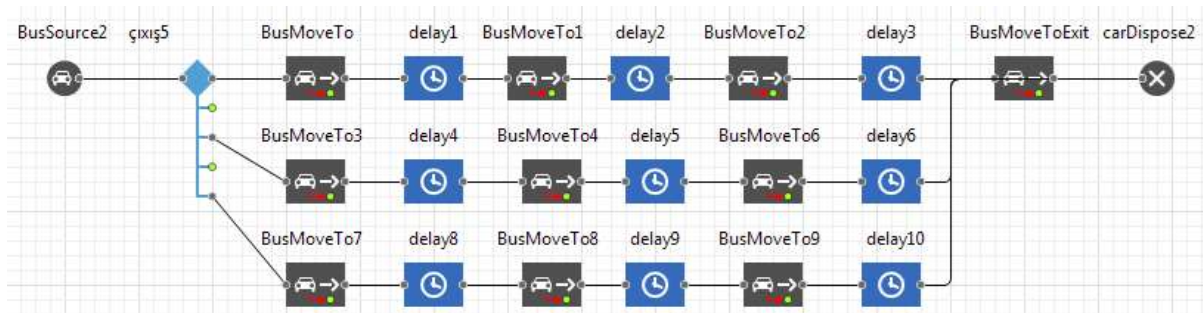


Fig 1 – Construction of an algorithm for simulating routes leaving the same initial stop

If the number of routes leaving the same start stop is less than 5, the probability of the corresponding exit in the *Probability* cell is 0.

When constructing a simulation model for routes that exit from different initial stops and have several coincident stops, the logical diagram of which is shown in Figure 2, the capacity of these stops must be considered.

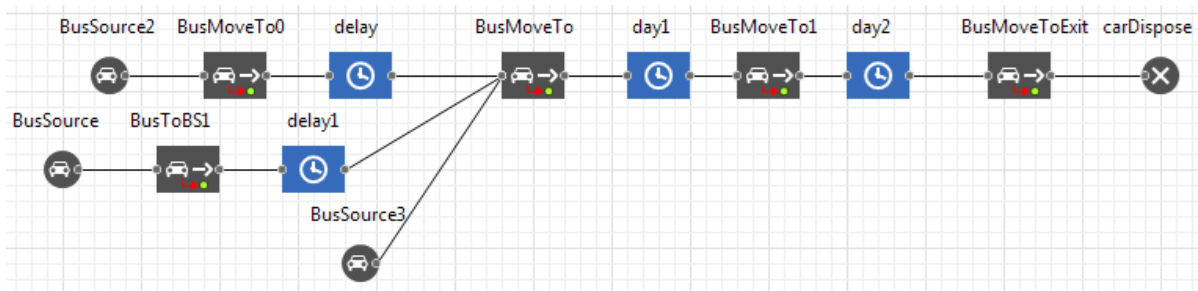


Fig 2 – Building a simulation algorithm for routes with coincident stops

To study the work of public transport moving in a general flow, you can use software to include traffic flows and their intensity by direction. In this case, it is possible to determine the nature of public transport management, both in a specialized lane and in the general flow.

The proposed methodology for creating a simulation model of the bus route network in the *Anylogic 6.0* environment [3] describes the movement of vehicles on the network, but does not cover the work in the general transport network. It is known that a bus passes through streets with different numbers of lanes, different traffic intensities, stops at traffic lights with different operating modes [10]. Therefore, we use elements of the road library to describe the operation of buses in the route network. For more efficient process management, you can simplify the task and divide the city into microdistricts.

To create a simulation model we use the tools of the program. To enter the parameters of bus routes and traffic flow we use *Road*, *CarSource*, *CarMoveTo*, *BusStop*, *Delay*, *Queue*, *Pickup* and *Dropoff* and to enter the parameters of movement of passengers *Ped source*, *Restangular area*, *Ped wait* tools from the *Pedestrian* Library [11].

In one direction on the road bus stops and areas for embarking and disembarking passengers are created. Then a logical model is created to allow passengers to board the bus (Figure 3).

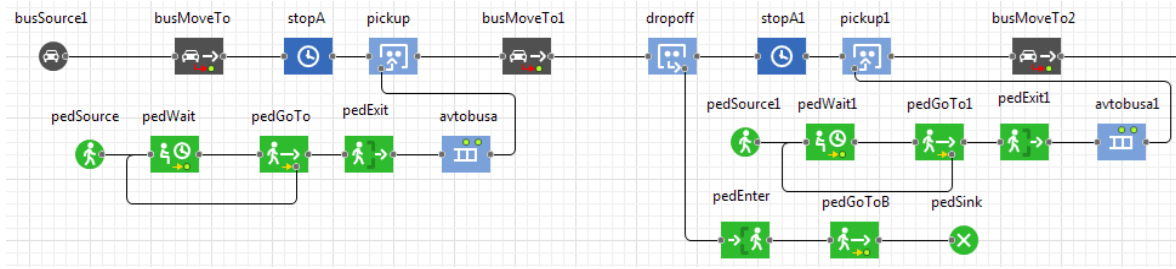


Fig 3 – Logical model of passengers boarding the bus

Bus stop parameters are entered through the *Delay* (stop) tool.

To enter the parameters of waiting for passengers at stops, in the *Action* area, enter the following code lines in the appropriate cells:

```
On enter: pedWait.freeAll ();
On exit: goToBoarding.cancellAll ();
```

If *All available agents* are selected in the window with the *Pickup* tool parameters, then the bus will pick up all passengers at the stop. *All available agents* in the *Dropoff* tool settings selected. This serves to send passengers to the *Pedestrian* library to allow re-entry.

The regularity of the passengers' approach to the stop can be taken into account in the features of the *PedSource* tool.

The bus routes on the network run along different streets. The number of lanes and the amount of traffic on these streets vary. Traffic at intersections is organized in different ways. Since the duration of permitting and prohibiting signals at controlled intersections is different. With the help of software we can track the movement of buses along the route in various conditions, reflecting this situation in the model [4, 12].

Anylogic software tools allow you to view the simulation model in 3D. To do this select the *3D Window* tool from the *Presentation* toolbar. The *Camera* tool makes it possible to track any area in particular in the created bus route network. On the logical model created by the simulation model you can see the statistics of changes in traffic and passenger flows (Figure 4).

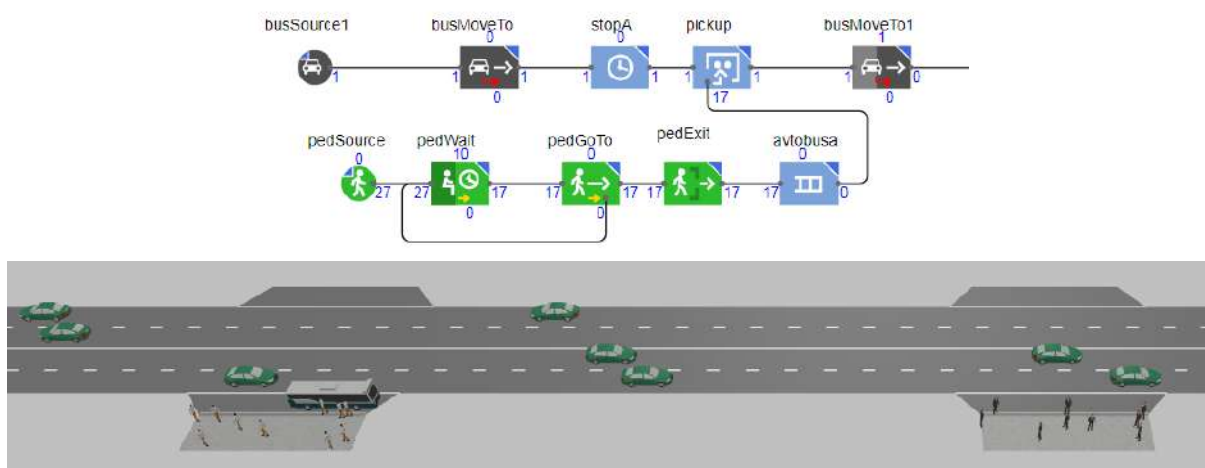


Fig. 4 – Simulation model of the bus route section

Conclusions

Thus, by creating an agent-based simulation model of the bus route network, it is possible to enter the parameters of the movement of buses and passengers along the network for vehicles moving along different streets (network points) and passing through bus stops (peaks), to observe the nature of

the bus operation in the route network. By identifying shortcomings at the next stage, you can select optimization criteria. The creation of such a model makes it possible to identify real obstacles throughout the network or in its sections, causing delays in the passage of buses on the road network with different traffic conditions (number of lanes, traffic intensity, intersections, etc.).

References:

1. Remezova E.M. *Imitatsionnoe modelirovanie v srede AnyLogic* [Simulation modeling in the AnyLogic environment]. Vladimir, VIGU Publ., 2017. 87 p. (Rus.)
2. Katalevskii D.Iu. *Osnovy imitatsionnogo modelirovaniia i sistemnogo analiza v upravlenii: uchebnik* [Basics of simulation and systems analysis in management: textbook]. Moscow, «Delo» RANKhiGS Publ., 2015. 496 p. (Rus.)
3. Lipenkov A.V., Maslova O.A., Eliseev M.E. Modelirovanie marshruta passazhirskogo avtobusa v Anylogic. *Materialy V Vseros. nauch.-prakt. konf. «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriia i praktika»* [Passenger bus route simulation in Anylogic. Proceedings of the V-th All-Russ. Sci.-Pract. Conf. «Simulation modeling. Theory and practice»]. St. Petersburg, 2011, vol. 2, pp. 137-141. (Rus.)
4. Gizem Gunesh. Agent-based simulation and an example in anylogic. İstanbul, 2014. 36 p.
5. Sokolowski John A., Banks Catherine M. Principles of Modeling and Simulation. John Wiley & Sons, Inc. Publ., 2009. 280 p. doi: 10.1002/9780470403563.
6. Borshchev A. The Big Book of simulation Modeling. Multimethod Modeling with AnyLogic 6. 2013. 614 p.
7. Dashdamirov F.S. Simulation modeling of the route network in the Anylogic environment. *Professional education and human capital*, 2020, vol. 3, no. 2, pp. 73-77.
8. Malikov R.F. *Praktikum po imitatsionnomu modelirovaniuu slozhnykh sistem v AnyLogic 6: uchebnoe posobie* [Practical Simulation of Complex Systems in AnyLogic 6: Tutorial]. Ufa, BGPU Publ., 2013. 296 p. (Rus.)
9. Dashdamirov F.S., Sharifov A.C. Urban and suburban passenger transport: textbook. Baku, AzTU Publ., 2019. 205 p.
10. Dashdamirov F. Coordination of the work of buses in city routes. *Transport Problems*, 2013, vol. 8, iss. 4, pp. 77-82.
11. Dashdamirov F.S. Build an agent-based simulation model for the bus network. Materials of the Republ. Sci. and Tech. Conf. dedicated to the 70th anniversary of the Azerbaijan Technical University «Technological prospects of the fourth industrial revolution: industrial internet, cyber-physical systems and intelligent technologies», 2020 Available at: www.aztu.edu.az/azp/yubiley/az/down/B%C3%B6lm%C9%99%201.pdf.
12. Help – AnyLogic Simulation Software Available at: www.help.anylogic.ru/index.jsp (accessed 25 July 2020).

Перелік використаних джерел:

1. Ремезова Е.М. Имитационное моделирование в среде AnyLogic: лаб. практикум / Е.М. Ремезова; Владимир. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2017. – 87 с.
2. Каталевский Д.Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: учебник / Д.Ю. Каталевский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. – 496 с.
3. Липенков А.В. Моделирование маршрута пассажирского автобуса в Anylogic / А.В. Липенков, О.А. Маслова, М.Е. Елисеев // Имитационное моделирование. Теория и практика: материалы V Всерос. науч.-практ. конф. (19-21 октября 2011 г.; г. Санкт-Петербург). – СПб., 2011. – Т. 2. – С. 137-141.
4. Gizem Gunesh. Agent-based simulation and an example in anylogic / Gizem Gunesh; Yildiz technical university. – İstanbul, 2014. – 36 p.
5. Sokolowski John A. Principles of Modeling and Simulation / John A. Sokolowski, Catherine M. Banks. – John Wiley & Sons, Inc., 2009. – 280 p. – Mode of access: DOI: 10.1002/9780470403563.
6. Borshchev A. The Big Book of simulation Modeling. Multimethod Modeling with AnyLogic 6 / A. Borshchev. – 2013. – 614 p.

7. Dashdamirov F.S. Simulation modeling of the route network in the Anylogic environment / F.S. Dashdamirov // Professional education and human capital. – 2020. – Vol. 3, no. 2. – Pp. 73-77.
8. Маликов Р.Ф. Практикум по имитационному моделюванню складних систем в AnyLogic 6: учебное пособие / Р.Ф. Маликов. – Уфа : Изд-во БГПУ, 2013. – 296 с.
9. Dashdamirov F.S. Urban and suburban passenger transport: textbook / F.S. Dashdamirov, A.C. Sharifov. – Baku : AzTU, 2019. – 205 p.
10. Dashdamirov F. Coordination of the work of buses in city routes / F. Dashdamirov // Transport Problems. – 2013. – Vol. 8, iss. 4. – Pp. 77-82.
11. Dashdamirov F.S. Build an agent-based simulation model for the bus network / F.S. Dashdamirov // Technological prospects of the fourth industrial revolution: industrial internet, cyber-physical systems and intelligent technologies: materials of the Republ. Sci. and Tech. Conf. dedicated to the 70th anniversary of the Azerbaijan Technical University. – 2020. – Режим доступу: www.aztu.edu.az/azp/yubiley/az/down/B%C3%B6lm%C9%99%201.pdf.
12. Help – AnyLogic Simulation Software [Electronic resource]: [Website]. – Electronic data. – Mode of access: www.help.anylogic.ru/index.jsp.

Reviewer: Tagizade Asker Habib oglu

Doctor of technical sciences, professor, Azerbaijan Technical University

The article was admitted on 17.09.2020

УДК 656.13+621.43+681.518

doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226218

© Симоненко Р.В.*

ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ І ТЕЛЕМАТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ «КОЛІСНІ ТРАНСПОРТНІ ЗАСОБИ-ІНФРАСТРУКТУРА»

Представлена розробка функціональних можливостей і системного забезпечення інформаційної телематичної системи «Колісні транспортні засоби-Інфраструктура», як системи супутникового моніторингу і управління транспортними засобами в умовах інфраструктури. Показані основні інформаційні складові телематичного забезпечення системи у взаємодії зі встановленими морфологічними структурами.

Ключові слова: автомобільний транспорт, телематична система, колісний транспортний засіб, інфраструктура, моніторинг.

R.V. Symonenko. Features of functional possibilities and telematic support of the system «Wheeled vehicles-Infrastructure». The development of functional capabilities and system support of the information telematics system «Wheeled vehicles-Infrastructure» as a system of satellite monitoring and vehicles control in the conditions of infrastructure is presented. Application in the conditions of practical activity of the system motor transport is presented as specialized software and hardware complex for remote control of the parameters of a wheeled vehicle power plant technical condition, for control of a power plant operating conditions and transmission of a wheeled vehicle, as well as performing of the given law of movement of the wheeled vehicle in the given conditions of the infrastructural environment. It has been shown that the system «Wheeled vehicles-Infrastructure» is designed to solve scientific and production problems of road transport in terms of optimizing the operation of the wheeled vehicle and is a comprehensive solution for monitoring and control of the parameters of their technical condition and traffic.

* канд. техн. наук, доцент, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: 0000-0002-4269-5707

The system provides continuous remote monitoring and control of a wheeled vehicle at low operating costs through the use of modern intelligent telematics technologies. The application and implementation of the system is a qualitatively new level of control over the efficiency of a wheeled vehicle in operating conditions. It is shown that a new methodology has been developed to evaluate the efficiency of the system «Wheeled vehicles-Infrastructure» that takes into account the promising changes in the variants of morphological features of its functional elements. The system will be able to assess possible morphological structures of telematics support of the system and its elements, to form optimal structures of the system and to control individual characteristics of functional elements to achieve maximum performance of a wheeled vehicle with minimum specific energy consumption and emissions in a given infrastructure environment. The main information components of telematics support of the system in interaction with the established morphological structures are shown. The main advantages of its application have been shown, the main tasks and constituent elements in combination with provisions of morphological construction have been described.

Keywords: road transport, telematics system, wheeled vehicle, infrastructure, monitoring.

Постановка проблеми. Складні проблеми існування автомобільного транспорту, включаючи формування глобальних систем моніторингу для отримання технічної інформації про колісні транспортні засоби (КТЗ), не знаходять свого вирішення перевіреними методами і засобами. Застосування інформатизації автомобільного транспорту (АТ) в Україні та сучасних інтелектуальних транспортних систем (ІТС) дають нові можливості для пошуку необхідних рішень. У логічному поєднанні з комп'ютерними технологіями та Інтернетом вони реалізують інформаційні технології глобального (GPS, A-GPS, ГЛОНАСС, SBAS) та локального (Wi-Fi) позиціонування, ідентифікації радіочастот (RFID) або відео (VI), мобільних (GSM та GPRS) з'єднань тощо [1, 2]. Сьогодні ІТС включають в себе автономні бортові мікропроцесорні системи для автоматичного моніторингу та управління КТЗ та традиційні об'єкти автомобільної електроніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для АТ України постійно розробляються та просуваються нові проекти ІТС. Це наближає забезпечення вимог глобальних систем моніторингу для отримання технічної інформації про окремі КТЗ. Такі проекти сьогодні, у різних комбінаціях, передбачають набори функцій ІТС для КТЗ із сформованого переліку відомих пропозицій [1-4]. Всі ці групи функцій, залежно від вимог, поєднуються в глобальних системах моніторингу для отримання технічної інформації про окремі транспортні засоби, керування ними тощо.

Всупереч вимогам системного підходу функції ІТС формуються та використовуються в АТ України без наукового зв'язку з вирішенням сучасних проблем АТ. Це відбувається шляхом безпосереднього передавання накопиченого досвіду фахівцями до існуючих КТЗ під час їх руху. Найчастіше це технологія супутникового диспетчерського відстеження рухомих об'єктів [3-6]. Таке застосування функцій ІТС не забезпечує сьогодні і не забезпечить у майбутньому ні глобального моніторингу, ні ідентифікації параметрів КТЗ, ні вирішення інших проблем безпеки транспорту, а лише частково пом'якшить їх наслідки та умови експлуатації. Тому виникає нагальна проблема формування нових телематичних систем для використання в сучасному АТ.

Мета статті – розробка функціональних можливостей і телематичного забезпечення системи «Колісні транспортні засоби-Інфраструктура» (КТЗ-І).

Виклад основного матеріалу. Інформаційна телематична система «Колісні транспортні засоби-Інфраструктура» (КТЗ-І) – система супутникового моніторингу і управління КТЗ, яка представляє собою спеціалізований програмно-апаратний комплекс для управління (дистанційного) параметрами технічного стану енергоустановки КТЗ, управління режимами роботи ЕУ та трансмісії КТЗ, процесами взаємодії КТЗ з дорожньою інфраструктурою та процесами реалізації заданого закону руху КТЗ в заданих умовах інфраструктурного середовища [1-7]. В основі створення системи КТЗ-І покладена ідея об'єднання в комплекс, по-перше, всіх необхідних завдань, які сьогодні можуть висуватися до подібних транспортних систем, як щодо їх інфраструктури, так і самих КТЗ (враховуючи особливості побудови, оснащення, енергетичної установки тощо), по-друге, об'єднання дій, спрямованих на рішення вказаних завдань (рис.)

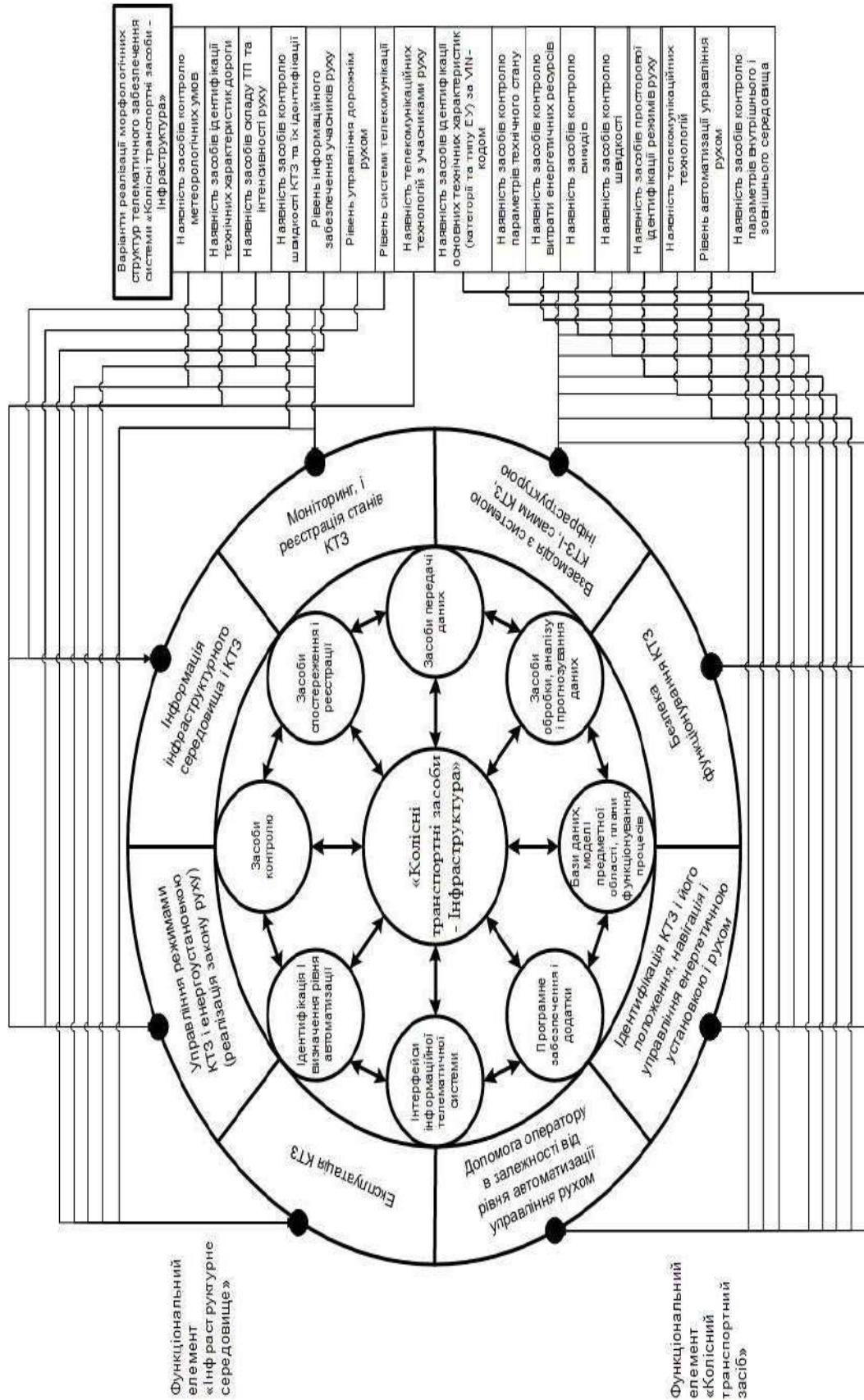


Рисунок – Основні інформаційні складові телематичного забезпечення системи «Колісні транспортні засоби-Інфраструктура»

Система «Колісні транспортні засоби-Інфраструктура» призначена для вирішення наукових і виробничих завдань автомобільного транспорту в частині оптимізації роботи КТЗ і являє собою комплексне рішення з моніторингу та управління параметрами їх технічного стану і режимами руху. Система забезпечує безперервний дистанційний моніторинг і управління КТЗ при невеликих експлуатаційних витратах за рахунок використання сучасних інтелектуальних телематичних технологій. Застосування і впровадження системи – це якісно новий рівень управління ефективністю КТЗ в умовах експлуатації.

Перевагами системи «Колісні транспортні засоби-Інфраструктура» є [1-7]:

- безперервний дистанційний автоматичний контроль руху КТЗ з управлінням ефективністю, оцінкою умов експлуатації, часу проходження маршрутів у відповідності до графіків роботи, відображенням розташування КТЗ і маршрутів руху в режимі реального часу на електронних картах;

- безперервний дистанційний автоматичний контроль параметрів технічного стану КТЗ з оцінкою рівня надійності і ефективності реалізації заданого закону руху і технічної експлуатації;

- висока оперативність, низька вартість навігаційно-зв'язкового обладнання і технічних засобів, мінімальні витрати на експлуатацію системи і повна конфіденційність результатів управління та обробки параметрів, даних і відомостей, одержуваних в системі КТЗ-І;

- можливість інтеграції з іншими інформаційними і інформаційно-аналітичними системами транспорту, можливість підключення додаткових спеціальних модулів ПЗ для вирішення супутніх завдань тощо.

Систему «Колісні транспортні засоби-Інфраструктура» слід розглядати як сучасну інформаційно-пошукову систему (СІПС) у власних складових. Термін СІПС отримав поширення на всі види сучасних інформаційних систем [1-7]. Проф. І.П. Чорний запропонував представити СІПС у вигляді сукупності діючих чотирьох основних складових [1, 4, 6]:

$$SIPS_{КТЗ-І} \equiv_{def} \langle ALS, D, TSM, N \rangle, \quad (1)$$

де *SIPS* – сучасна система інформаційно-пошукова (в нашому випадку КТЗ-І); *ALS* – апарат логіко-семантичний, тобто сукупність складових – інформаційно-пошукова мова написання програмного забезпечення, правила індексування і критерії видачі результатів тощо; *D* – масив пошуковий (база даних), тобто певна множина забезпечених пошуковими образами документів, в яких знаходяться необхідні значення (параметри); *TSM* – технічні засоби, прилади, спеціальне реєстраційне обладнання, тобто деякі пристосування або пристрої, які необхідні для запису і зберігання пошукових образів, для зберігання документів і здійснення процесу співставлення пошукових образів документів з пошуковим приписом або пошуковим образом запиту; *N* – оператори (люди), які взаємодіють з системою, тобто ті, хто користуються цією СІПС і обслуговують її, тобто здійснюють керування елементами системи, індексування документів і інформаційних запитів, вибирають стратегію пошуку, а також виконують інші інтелектуальні операції, без яких неможливий інформаційний пошук і існування системи КТЗ-І.

Наявність в СІПС логіко-семантичного апарату (*ALS*) і пошукового масиву (*D*) вказує на те, що СІПС – це, перш за все, логістична інформаційно-пошукова система (ЛІПС), яка повинна виконувати безліч специфічних, властивих їй, функцій [1, 4, 5]. Призначена ЛІПС для формування інтегрованого потоку інформації автомобільного транспорту і його інфраструктури, який в практиці може бути представлений у вигляді загальної схеми, розробленої проф. Ю.М. Неруш [1, 4, 5].

Система КТЗ-І – це інформаційний апаратно-програмний комплекс на основі телематичної платформи дистанційного моніторингу засобами ІТS у реалізації різних морфологічних структур системи, який побудований на технології «клієнт-сервер» із застосуванням Web-технологій. Складовими телематичного забезпечення системи «Колісні транспортні засоби-Інфраструктура» є [1-6]: телематичний сервер; загальне і спеціальне ПЗ телематичного сервера і бортового обладнання; ГІС телематичного сервера; базове спеціалізоване ПЗ робочого місця диспетчера (оператора) тощо.

Для оцінювання ефективності функціонування системи «КТЗ-Інфраструктура» з урахуванням перспективних змін варіантів морфологічних ознак її функціональних елементів розроблена нова методологія, яка буде спроможна оцінювати можливі морфологічні структури теле-

матичного забезпечення системи та її елементів, формувати оптимальні структури системи та управляти окремими характеристиками функціональних елементів для досягнення максимальної продуктивності КТЗ при мінімальних питомих витратах енергії та викидах в заданих умовах інфраструктурного середовища.

Основні функції системи «Колісні транспортні засоби-Інфраструктура» можна умовно розділити на наступні групи: функції моніторингу (безперервне отримання інформації як від КТЗ, так і від інфраструктури), функції управління параметрами технічного стану і законом руху КТЗ та функції зберігання інформації і взаємодії з зовнішніми інформаційними системами.

Функції моніторингу за задачами системи КТЗ-І в повному обсязі відповідають вже відомим системам моніторингу, розробленим в ХНАДУ, НТУ і ХДМА [1-6]. Серед додаткових задач є наступні:

- автоматичне дистанційне визначення навігаційних параметрів КТЗ (основні географічні координати, положення, азимут, висота над рівнем моря, контроль поточної швидкості КТЗ, витрати енергії та забруднюючих викидів тощо);

- автоматичне визначення і проведення безперервного моніторингу параметрів технічного стану КТЗ за показами контрольних пристроїв телематичних навігаторів-приймачів, проведення ідентифікації технічних характеристик КТЗ та його підсистем;

- визначення технічного стану КТЗ, просторова ідентифікація режимів руху КТЗ, стан сучасних телекомунікаційних технологій для зв'язку з іншими елементами системи, автоматизації управління рухом КТЗ, контролю характеристик оператора, контролю параметрів внутрішнього і зовнішнього середовища КТЗ;

- ідентифікація зовнішніх метеорологічних умов, характеристик дороги, склад транспортного потоку та його інтенсивності, організації дорожнього руху;

- оцінка рівня інформаційного забезпечення учасників руху, системи телекомунікації, а також наявність телекомунікаційних технологій з учасниками руху тощо.

Функції управління системи КТЗ-І, крім відомих вже функцій [2, 6], передбачає вирішення додаткових задач, серед яких є наступні:

- підвищення ефективності функціонування системи в частині забезпечення основних функціональних процесів за рахунок поєднання окремих варіантів усіх морфологічних ознак обох функціональних елементів, чим забезпечується формування новітньої морфологічної структури телематичного забезпечення досліджуваної системи КТЗ-І;

- отримання нових структур телематичного забезпечення системи зміною одного з варіантів реалізації будь-якої ознаки обох функціональних елементів, чим досягається нове функціонування системи КТЗ-І;

- формування на електронних мапах місцевості відповідних гео-зон для коректування переміщення КТЗ;

- контроль і аналіз технічних і технологічних параметрів стану КТЗ за певні проміжки часу тощо.

Функції системи «Колісні транспортні засоби-Інфраструктура» щодо зберігання інформації та інтеграції з зовнішніми інформаційними системами [2, 5, 6]:

- зберігання інформації в єдиній базі даних;

- перетворення інформації в формат, сумісний з користувацькими інформаційними системами;

- обмін даними з користувацькими інформаційними системами;

- створення баз даних в форматі користувальницьких архівів.

Висновки:

1. Представлена розробка функціональних можливостей і системного забезпечення інформаційної телематичної системи «Колісні транспортні засоби-Інфраструктура», як системи супутникового моніторингу і управління КТЗ.

2. Застосування в умовах практичної діяльності автомобільного транспорту системи представляється як існування спеціалізованого програмно-апаратного комплексу для управління (дистанційного) параметрами технічного стану енергоустановки КТЗ, управління режимами роботи ЕУ та трансмісії КТЗ, процесами взаємодії КТЗ з дорожньою інфраструктурою та процесами реалізації заданого закону руху КТЗ в заданих умовах інфраструктурного середовища.

Перелік використаних джерел:

1. Приходько В.М. Формирование функциональных возможностей интеллектуальной транспортной системы для автомобильного транспорта / В.М. Приходько, С.М. Мороз, А.Н. Ременцов // Журнал Автомобильных Инженеров. – 2011. – № 4 (69). – С. 23-27.
2. Жанказиев С.В. Научные подходы к формированию государственной стратегии развития интеллектуальных транспортных систем / С.В. Жанказиев, В.М. Власов // Автотранспортное предприятие. – 2010. – № 7 (45). – С. 2-10.
3. Интеллектуальные системы управления работоспособностью автомобилей / В.П. Волков, В.П. Матейчик, И.В. Грицук, Ю.В. Волков; под ред. Волкова В.П. – Харьков : Майдан, 2016. – 504 с.
4. Интеграция технической эксплуатации автомобилей в структуры и процессы интеллектуальных транспортных систем / В.П. Волков, В.П. Матейчик, О.Я. Никонов, П.Б. Комов, И.В. Грицук, Ю.В. Волков, Е.А. Комов; под ред. Волкова В.П. – Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2013. – 400 с.
5. Сучасні тенденції розвитку автотранспортної галузі України / О.М. Вольська, В.В. Храпкіна, І.В. Грицук, В.П. Матейчик, Р.В. Симоненко, М.В. Володарець – Херсон, ОЛДІ-ПЛЮС, 2020. – 144 с.
6. Особливості інформаційного обміну в процесі дистанційного управління роботоздатністю транспортних засобів / В.П. Волков, В.П. Матейчик, П.Б. Комов, І.В. Грицук, А.П. Комов // Вісник Національного транспортного університету. – 2014. – Вип. 29. – С. 63-74.
7. Ахмедов Т.Н. Основы системы контроля состояния транспортного средства в процессе выполнения перевозок / Т.Н. Ахмедов, С.В. Жанказиев, А.Е. Финкель // Научные аспекты развития транспортно-телематических систем. – М. : МАДИ, 2010. – С. 138-164.

References:

1. Prihod'ko V.M. Formirovanie funkcional'nyh vozmozhnostej intellektual'noj transportnoj sistemy dlja avtomobil'nogo transporta [Formation of functional capabilities of an intelligent transport system for road transport]. *Zhurnal Avtomobil'nyh Inzhenerov – Zurnal AAI*, no. 4 (69), 2011, pp. 23-27. (Rus.)
2. Zhankaziev S.V., Vlasov V.M. Nauchnye podhody k formirovaniju gosudarstvennoj strategii razvitiija intellektual'nyh transportnyh sistem [Scientific approaches to the formation of a state strategy for the development of intelligent transport systems]. *Autotransportnoie predpriyatie – Motor Company*, 2010, no. 7 (45), pp. 2-10. (Rus.)
3. Volkov V.P., Matejchik V.P., Gritsuk I.V., Volkov Ju.V. *Intellektual'nye sistemy upravlenija rabotosposobnost'ju avtomobilej* [Intelligent control systems for the performance of vehicles]. Har'kov, Majdan Publ., 2016. 504 p. (Rus.)
4. Volkov V.P., Matejchik V.P., Nikonov O.Ja., Komov P.B., Gritsuk I.V., Volkov Ju.V., Komov E.A. *Integracija tehnicheckoj jekspluatacii avtomobilej v struktury i processy intellektual'nyh transportnyh sistem* [Integration of technical operation of cars in structures and processes of intelligent transport systems]. Har'kov, HNADU Publ., 2013. 400 p. (Rus.)
5. Vol's'ka O.M., Hrapkina V.V., Gritsuk I.V., Matejchik V.P., Simonenko R.V., Volodarec' M.V. *Suchasni tendencii rozvitku avtotransportnoi galuzi Ukraïni* [Modern trends in the development of the motor transport industry of Ukraine]. Herson, OLDI-PLJuS Publ., 2020. 144 p. (Ukr.)
6. Volkov V.P., Matejchik V.P., Komov P.B., Gritsuk I.V., Komov A.P. Osoblivosti informacijnogo obminu v procesi distancijnogo upravlinnja robotoz-datnistju transportnih zasobiv [Peculiarities of information exchange in the process of remote control of robotic data of vehicles]. *Visnik Nacional'nogo transportnogo universitetu – The National Transport University Bulletin*, 2014, vol. 29, pp. 63-74. (Ukr.)
7. Ahmedov T.N., Zhankaziev S.V., Finkel A.E. Osnovy sistemy kontrolja sostojanija transportnogo sredstva v processe vypol-nenija perevozok [Basics of the system of control of a condition of a vehicle in the course of performance of transportations]. *Nauchnye aspekty razvitiija transportno-telematicheskikh sistem – Scientific aspects of the development of transport and telematic systems*, Moscow, MADU Publ., 2010, pp. 138-164. (Rus.)

ДО УВАГИ АВТОРІВ!

До публікації у збірнику приймаються тільки наукові статті, виконані відповідно до вимог Постанови Президії ВАК України від 15.01.2003р. № 7-05/1, які мають наступні необхідні елементи: **постановка проблеми** у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; **аналіз останніх досліджень і публікацій**, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; **формулювання цілей статті** (постановка завдання); **виклад основного матеріалу** дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; **висновки** з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку та **перелік використаних джерел** (оформлений відповідно до стандартів – ГОСТ 7.1-84, ДСТУ 3582-97, ГОСТ 7.12-93). Список джерел повинен бути складений в порядку спогаду в тексті. Посилання на літературу поміщають у квадратні дужки. Після списку використаних джерел надається пристатейна бібліографія латиницею (**References**).

Об'єм статті, що направляється до збірника – 5-8 стор., оформлених відповідно до вимог, кількість ілюстрацій в статті 4-7.

Стаття може бути представлена державною мовою, англійською мовою та/або іншими офіційними мовами Європейського Союзу. Текст статті, завізований авторами власноручним підписом, подається в редакцію збірника в друкарському вигляді (**1 примірник**), з вказаними робочими телефонами та електронними адресами авторів.

Стаття приймається до розгляду тільки при наявності відповідних супровідних документів та електронного варіанту на електронному носії у вигляді текстового файлу у форматі редактора Microsoft Office Word 2003.

Формат листа – А4. Розміри полів: верхнє, нижнє – по 20 мм; ліве, праве – по 25 мм Основний текст набирається шрифтом Times New Roman, розмір 11, міжрядковий інтервал – 1,0. Червоний рядок абзаців відповідає відступу – 1 см. Нумерація сторінок не проставляється. Вирівнювання тексту виконується по ширині. Для спеціальних символів і формул використовувати шрифт Symbol MT Extra, в редакторі формул слід використовувати математичний курсив. Графічний матеріал, представлений у вигляді малюнків і графіків, повинен бути вмонтований в текст статті.

Стаття повинна містити номер УДК (в лівому верхньому кутку). На наступному рядку по правому полю, жирним шрифтом, розмір 11 – прізвище, ім'я та по батькові (у називному відмінку) з надрядковими номерами; в нижній частині першої сторінки у вигляді зноски курсивом, розмір шрифту 10 (дивись строку меню: Вставка / Ссылка / Сноска) – науковий ступінь, вчене звання (як що немає – посада), місце роботи (без скорочень), місто, адреса електронної пошти; іноземні автори вказують назву країни. Далі, після міжрядкового інтервалу друкується назва статті (прописними літерами, по центру, без заключної крапки); анотації двома мовами (для статей не англійською мовою обсяг анотації англійською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова; для статей не українською мовою обсяг анотації українською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова), першою наводиться анотація на мові статті (відступ зліва і справа по 1 см, курсивом) та ключові слова (від трьох до восьми).

Наприкінці статті повинні бути приведені ініціали, прізвище, вчений ступінь, вчене звання, місце роботи рецензента; дата подачі статті.

До статті надаються наступні супровідні матеріали (**по одному примірнику**):

- експертний висновок про можливість публікації статті у відкритому друці;
- рецензія фахівця за профілем статті (доктора наук), в якій повинні бути відображені наукова новизна результатів, їх цінність і значущість, зауваження по суті статті і по її оформленню;
- згода на обробку персональних даних (окрема для кожного з співавторів);
- ліцензійний договір (у **двох екземплярах**).

Форми необхідних документів та вимоги до оформлення статей представлені на сайті (http://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/pages/view/requirements). Архів видань див.: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/1>, http://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/issue/archive.

Відповідальність за зміст статті несе автор. Статті, що не відповідають зазначеним вимогам, не розглядаються.

Повністю оформлені статті і необхідні документи передаються в редакцію збірника відповідальному секретарю Савенко Ользі Сергіївні (ГВУЗ «ПДТУ», 2-ий учбовий корпус, ауд. 175, тел.: (0629) 44-62-34.

Підписано до друку 24.12.2020 р.
Папір тип № 2. Умов. друк. ар. 25,23. Тираж 400.
Замовлення № 8. Матеріали збірника
друкуються мовою оригіналу. Ціна договірна
Надруковано у видавничо-поліграфічному центрі ДВНЗ «ПДТУ»
вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, Донецька обл., 87555, Україна