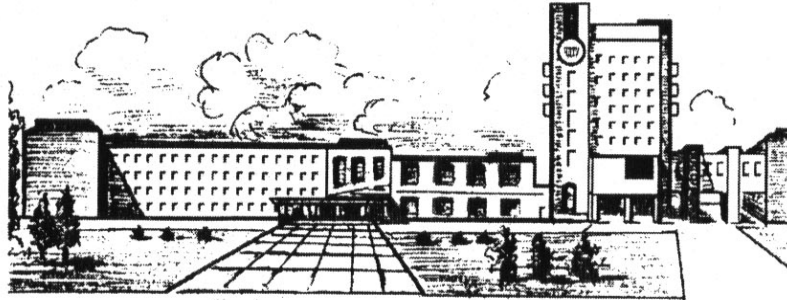


ISSN 2411-5363 (print)  
ISSN 2519-4569 (online)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**



# ***ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ***

***НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ***

***№ 3 (17)***

Чернігів 2019

УДК 62:67.05

T38

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)

Друкується за рішенням вченої ради Чернігівського національного технологічного університету (протокол № 8 від 02.10.2019 р.). Науковий журнал «Технічні науки та технології» внесено до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України від 11.07.2019 р. № 975, відповідно до якого журналу надано категорію «Б».

T38 **Технічні науки та технології** : науковий журнал / Чернігів. нац. технол. ун-т. – Чернігів : ЧНТУ, 2019. – № 3 (17). – 314 с.

У цьому випуску журналу «Технічні науки та технології» вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у науковому напрямі «Технічні науки»: механічна інженерія, електрична інженерія, інформаційні технології, хімічна та біоінженерія, виробництво та технології, архітектура та будівництво. Статті прорецензовані провідними вченими у відповідних галузях знань.

Журнал «Технічні науки та технології» буде корисним для науковців, науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та студентів технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

УДК 62:67.05

**Головний редактор:**

Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.

**Заступник головного редактора:**

Сапон С. П., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет.

**Члени редакційної колегії:**

Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування

Бойко С. В., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет;

Болотов Г. П., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

Дубенець В. Г., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

Єрошенко А. М., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет;

Кальченко В. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

Кальченко В. В., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

Новомлинець О. О., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

Пилипенко О. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.

Інформаційно- комп'ютерні технології

Азаров О. Д., доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет;

Вархола Міхал, доктор технічних наук, професор, Технічний університет в Кошице (Словаччина);

Джон Н. Девис, доктор технічних наук, професор, університет Глиндор, Рексем, Великобританія;

Зайцев С. В., доктор технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет;

Литвинов В. В., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.

Енергетика, електротехніка та електромеханіка

Вінніков Д., доктор технічних наук, професор, Таллінський університет технологій (Естонія);

Волков І. В., доктор технічних наук, професор, Інститут електродинаміки НАН України;

Галкін І., доктор технічних наук, професор, Ризький технічний університет (Латвія);

Гусев О. О., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет;

Денисов Ю. О., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

Ромеро-Кадавал Е., доктор технічних наук, професор, Університет Естремадури (Іспанія);

Скоробогатова В. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет.

Хімічні та харчові технології

Самохвалова О. В., кандидат технічних наук, професор, Харківський державний університет харчування та торгівлі;

Сиза О. І., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

Цибуля С. Д., доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет;

Челябієва В. М., кандидат технічних наук, доцент, Чернігівський національний технологічний університет.

Будівництво та геодезія

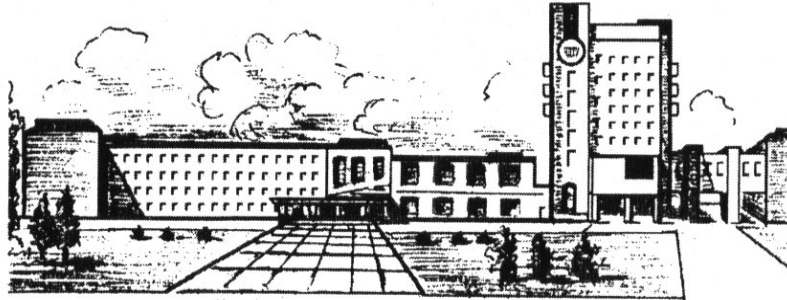
Вінніков Ю. Л., доктор технічних наук, професор, Полтавський національний технічний університет;

Шульц Р. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури.



ISSN 2411-5363 (print)  
ISSN 2519-4569 (online)

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
CHERNIHIV NATIONAL UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**



# ***TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES***

***SCIENTIFIC JOURNAL***

***ISSUE № 3 (17)***

Chernihiv 2019

UDC 62:67.05  
DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv National University of Technology (protocol № 8 dated 02.10.2019). Scientific journal "Technical sciences and technologies" is included into the list of scientific specialized editions of Ukraine, approved by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated July 11, 2019 № 975, according to which magazine is assigned a category «B».

**Technical sciences and technologies: scientific journal / Chernihiv National University of Technology. – Chernihiv : Chernihiv National University of Technology, 2019. – № 3 (17). – 314 p.**

This issue of the journal "Technical sciences and technologies" contains articles devoted to theoretical and experimental research in the scientific direction "Technical Sciences": mechanical engineering, electrical engineering, information technology, chemical and bioengineering, manufacturing and technology, architecture and construction. The articles are reviewed by leading scientists in relevant fields of knowledge.

Journal "Technical sciences and technologies" will be useful for the scientific and technical workers, postgraduates, master students and students of higher technical educational establishment.

**UDC 62:67.05**

***Editor in chief:***

Kazymyr V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv National University of Technology (ChNUT).

***Deputy Editor in chief:***

Sapon S. P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; ChNUT.

***Members of the Editorial Board:***

Applied mechanics, materials science and machine building

Boyko S. V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; ChNUT;

Bolotov H. P., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Dubenets V. H., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Yeroshenko A. M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; ChNUT.

Kalchenko V. I., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Kalchenko V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Novomlynets O. O., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Pilipenko O. I., Doctor of Technical Sciences, Professor, ChNUT.

Information and computer technologies

Azarov O. D., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University;

Yarchola Michal, Professor, President of the Academic society of Michal Baludansky, Slovakia;

John N. Davies, Professor, Department of Computer Science, Glyndwr University, Wrexham, U.K.;

Zaitsev S. V., Doctor of Technical Sciences, ChNUT;

Lytvynov V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT.

Power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering

Vinnikov D., Doctor of Science, Senior Researcher, Head of Power Electronics R&D Group, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia;

Volkov I. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine;

Galkin I., Doctor of Science, Professor, Riga Technical University, Riga, Latvia;

Husev O. O., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; ChNUT;

Denysov Yu. A., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Romero-Cadaval E., Doctor of Science, Professor, University of Extremadura, Badajoz, Spain;

Skorobohatova V. I., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT.

Chemical and food technologies

Samokhvalova O. V., PhD in Technical Sciences, Professor, Kharkiv State University of Food Technology and Trade;

Syza O. I., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Tsybulia S. D., Doctor of Technical Sciences, Professor; ChNUT;

Cheliabieva V. M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, ChNUT.

Construction and geodesy

Vynnykov Y. L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University;

Shults R. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv national university of construction and architecture.



## ЗМІСТ

РОЗДІЛ I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО  
ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>Кальченко В., Кальченко Д., Венжега В., Рябов С.</i> Підвищення точності та продуктивності обробки торців роликів підшипників кочення.....	9
<i>Єрошенко А., Дорошенко О.</i> Точність формоутворення поверхонь тіл обертання при шліфуванні з використанням мастильно-охолоджуючого технологічного середовища.....	18
<i>Фальченко Ю., Петрушинець Л., Новомлинець О.</i> Дифузійне зварювання інтерметаліду TiAl з конструкційними сплавами через наношаруваті фольги.....	27
<i>Шановалов О., Колесник Д., Пилипенко О.</i> Застосовуваність і залежність параметрів зубчастих передач авіаційних редукторів від технологічних процесів їх виготовлення.....	37
<i>Andrienko O., Huchenko M., Zinchenko V., Zhorniak O.</i> Software-hardware complex of qualification evaluation of Mi-171 helicopter simulator.....	49
<i>Kelemen Michal, Bobal Lukas.</i> Tracked robot for cleaning of pipe.....	55
<i>Jánoš Rudolf.</i> Analysis of rescue robots.....	62
<i>Kelemenová Tatiana, Dovica Miroslav.</i> Identification of maximum inaccuracy of toolmakers microscope.....	68
<i>Marcinko Peter, Kočan Martin.</i> The review for implementation of simple 3d printers to educational process.....	75
<i>Šarga Patrik, Kollár Adrián.</i> Design and realization of MyRIO controlled robotic car.....	82
<i>Semjon Jan, Demko Rastislav.</i> Proposal of handling process on robotized workplace with dual arm robot.....	89
<i>Sukop Marek, Ferenčík Peter.</i> Design of intelligent robotic cell with camera system.....	96
<i>Tuleja Peter.</i> Design and realization of grippers with permanent magnets.....	105
<i>Vagaš Marek, Šimšík Dušan.</i> Automation of assembly operation based on dual-arm robot.....	111
<i>Varga Martin, Filakovský Filip, Virgala Ivan.</i> Simulation and analyzes of inverse-kinematic model of humanoid robot hand.....	117

## РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Дубягін О., Гур'єв В., Фірсова І.</i> Міжрівневий баланс: показники структури, інтенсивності та координації руху одиниць об'єкта – агрегатна форма.....	123
<i>Повхан І.</i> Питання гнучкості логічних дерев класифікації в задачах розпізнавання образів.....	131
<i>Грінченко С.</i> Інформаційна технологія забезпечення сталого розвитку ІТ-підприємств.....	140
<i>Rákaý R., Galajdová A.</i> Comparison of communication protocols for smart devices.....	146
<i>Hroncová D.</i> Bond graph methodology in the RLC circuit analysis.....	155
<i>Miková Lubica.</i> Design and stress analysis of wheel mobile robot.....	162

## РОЗДІЛ III. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

<i>Alekseevskiy D., Mikhailutsa O., Pozhuyev A.</i> Averaged model of a boost-type pulse DC converter.....	168
<i>Войтенко В., Єршов Р.</i> Моделі елементів системи електроприводів квадрокоптерів та автономних роботів.....	175
<i>Шевченко В., Кондратенко І., Гусев О., Хоменко О., Тительмаєр К.</i> Оцінка точності моделі двошарової котушки індуктивності для бездротової передачі енергії за допомогою методу скінчених елементів.....	188
<i>Бойко С., Некрасов А., Городній О., Хебда А., Дмитренко А., Ножнова М.</i> Прогнозування електроспоживання залізрудних підприємств при впровадженні до системи їх електропостачання розосередженої генерації.....	197
<i>Kovalenko V., Levchenko S., Tryputen M., Kuznetsov V., Tryputen M., Gorodny O., Kuznetsova A., Kuznetsova Ye.</i> Characteristic layouts of distribution networks with the analysis of voltage deviations and expediency of its control.....	209

**РОЗДІЛ IV. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ**

<i>Болгова Н., Кревсун К.</i> Використання екстракту листа волоського горіха у технології плавлених сирів .....	219
<i>Буяльська Н., Литвиненко О., Денисова Н.</i> Використання продуктів переробки амаранту у виробництві хлібобулочних виробів .....	226
<i>Денисова Н., Зінюк М., Буяльська Н.</i> Використання добавок безглютенового борошна в технології виробництва хлібобулочних виробів .....	234
<i>Дубініна А., Летуца Т., Фролова Т.</i> Аналіз впливу лікарсько-рослинних екстрактів на мікрофлору баклажанів .....	241
<i>Миколенко С., Куянов Ю., Баранік П.</i> Вплив інфрачервоного сушіння на якість свіжої і замороженої черешні .....	258
<i>Осика В., Коптюх Л., Комаха В., Шульга О.</i> Характеристика мікроструктури та властивостей паперу різної щільності .....	267
<i>Гомеля М., Степова О., Камаєв В.</i> Розробка інгібіторів корозії металів у водних середовищах з різним рівнем мінералізації .....	275

**РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ**

<i>Терещук О., Мовенко В.</i> Проблеми забезпечення водокористування садівничих товариств Чернігівщини в сучасних умовах .....	284
<i>Крячок С., Мамонтова Л., Щербак Ю.</i> Теоретичне обґрунтування точності визначення площ земельних ділянок полюсним методом .....	292
<i>Менейлюк О., Нікіфоров О.</i> Підвищення достовірності нормування будівельних робіт .....	303

**ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ**

<b>НАУКОВИХ СТАТЕЙ</b> .....	313
------------------------------	-----

## CONTENT

## SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE AND MACHINE BUILDING

<i>Kalchenko V., Kalchenko D., Venzhega V., Ryabov S.</i> Increasing the accuracy and productivity of the moving of the rolling bearings of the rolling bearings .....	9
<i>Yeroshenko A., Doroshenko O.</i> Forming accuracy of the surface of rotation at grinding using the cutting fluid .....	18
<i>Falchenko Yu., Petrushynets L., Novomlynets O.</i> Diffusion welding of tial intermetallic with structural alloys through nanolayered foils.....	27
<i>Shapovalov O., Kolesnik D., Pilipenko O.</i> Applied and dependence of parameters of gearing of aviation reducing gears from technological processes their making .....	37
<i>Andrienko O., Huchenko M., Zinchenko V., Zhorniak O.</i> Software-hardware complex of qualification evaluation of Mi-171 helicopter simulator.....	49
<i>Kelemen Michal, Bobal Lukas.</i> Tracked robot for cleaning of pipe.....	55
<i>Jánoš Rudolf.</i> Analysis of rescue robots .....	62
<i>Kelemenová Tatiana, Dovica Miroslav.</i> Identification of maximum inaccuracy of toolmakers microscope .....	68
<i>Marcinko Peter, Kočan Martin.</i> The review for implementation of simple 3d printers to educational process .....	75
<i>Šarga Patrik, Kollár Adrián.</i> Design and realization of MyRIO controlled robotic car .....	82
<i>Semjon Jan, Demko Rastislav.</i> Proposal of handling process on robotized workplace with dual arm robot.....	89
<i>Sukop Marek, Ferenčík Peter.</i> Design of intelligent robotic cell with camera system .....	96
<i>Tuleja Peter.</i> Design and realization of grippers with permanent magnets .....	105
<i>Vagaš Marek, Šimšík Dušan.</i> Automation of assembly operation based on dual-arm robot .....	111
<i>Varga Martin, Filakovský Filip, Virgala Ivan.</i> Simulation and analyses of inverse-kinematic model of humanoid robot hand.....	117

## SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

<i>Dubyagin A., Guryev V., Firsova I.</i> Inter-level balance: indicators of structure, intensity and coordination of object units movement – aggregate form .....	123
<i>Povkhan I.</i> Flexibility of logical classification trees in pattern recognition problems .....	131
<i>Grinenko S.</i> Information technology to provide sustainable development of IT-enterprises .....	140
<i>Rákay R., Galajdová A.</i> Comparison of communication protocols for smart devices .....	146
<i>Hroncová D.</i> Bond graph methodology in the RLC circuit analysis.....	155
<i>Miková Lubica.</i> Design and stress analysis of wheel mobile robot .....	162

## SECTION III. POWER ENGINEERING, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICAL ENGINEERING

<i>Alekseevskiy D., Mikhailutsa O., Pozhuyev A.</i> Averaged model of a boost-type pulse DC converter.....	168
<i>Voytenko V., Yershov R.</i> Models of elements of the electric drive system of the quadcopters and autonomous robots .....	175
<i>Shevchenko V., Kondratenko I., Husev O., Khomenko O., Tytelmaier K.</i> Estimation of the double-layer coils model accuracy for wireless power transfer using finite element modelling.....	188
<i>Boiko S., Nekrasov A., Gorodny O., Khebda A., Dmitrenko A., Nozhnova M.</i> Forecasting electricity processing of side-based equipment in the implementation of their disposable generation electrical supply system .....	197
<i>Kovalenko V., Levchenko S., Tryputen M., Kuznetsov V., Tryputen M., Gorodny O., Kuznetsova A., Kuznetsova Ye.</i> Characteristic layouts of distribution networks with the analysis of voltage deviations and expediency of its control.....	209

**SECTION IV. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES**

<i>Bolgova N., Krevsun K.</i> Use of hawberry least extract in molded cheese technology.....	219
<i>Buialska N., Lytvynenko O., Denysova N.</i> The use of amaranth processed products in bakery production .....	226
<i>Denysova N., Ziniuk M., Buialska N.</i> Use of additives of glass-free flour in technology of bakery production.....	234
<i>Dubinina A., Letuta T., Frolova T.</i> Effect analysis of medicinal vegetable extracts on eggplant microflora.....	241
<i>Mykolenko S., Kuianov Yu., Baranik P.</i> Effect of infrared drying on the quality of fresh and frozen sweet cherries .....	258
<i>Osyka V., Koptyuh L., Komakha V., Shulga O.</i> Characteristics of microstructure and properties of various density paper .....	267
<i>Gomelia M., Stepova O., Kamaev V.</i> Development of metal corrosion inhibitors in water environments with different mineralization level.....	275

**SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY**

<i>Tereshchuk O., Movenko V.</i> Problems of water use of gardening societies of Chernihivshchyna in modern conditions.....	284
<i>Kryachok S., Mamontova L., Shcherbak Yu.</i> Theoretical rationale of the accuracy of determination of land plots by polar method.....	292
<i>Menejlyuk A., Nikiforov A.</i> Improvement of reliability of construction works normalization .....	303
<b>BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES.....</b>	<b>313</b>



# РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.923.42

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-9-17

*Володимир Кальченко, Дмитро Кальченко, Володимир Венжега, Сергій Рябов*

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ТОРЦІВ РОЛИКІВ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

**Актуальність теми дослідження.** Високоточна та продуктивна обробка торців роликів підшипників кочення є актуальним і важливим науково-практичним завданням, вирішення якого дозволить як підвищити термін служби підшипників, так і здешифувати їх виробництво, а отже, підвищити рівень конкурентоспроможності продукції.

**Постановка проблеми.** Основними вимогами, що ставляться до роликів підшипників кочення, є забезпечення високої точності розмірів, форми та якості торцевих поверхонь при високій продуктивності процесу обробки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основними напрямками підвищення точності та продуктивності двосторонньої торцешліфувальної обробки є збільшення жорсткості системи верстат – пристосування – інструмент – деталь, зменшення теплового впливу, удосконалення кінематичних характеристик руху заготовки в зоні обробки, оптимізація конструкції та характеристик шліфувальних кругів.

**Виділення не досліджених раніше частин загальної проблеми.** Одним із найбільш перспективних напрямів підвищення точності та продуктивності процесу двосторонньої торцешліфувальної обробки є використання ефекту схрещення осей шліфувальних кругів та заготовок при спеціальному профілюванні інструменту.

**Постановка завдання.** Провести аналіз факторів, що впливають на точність та продуктивність обробки торцевих поверхонь деталей на двосторонніх торцешліфувальних верстатах, та розробити новий високопродуктивний спосіб обробки торцевих поверхонь роликів підшипників кочення, який би забезпечував можливість складання тіл кочення з кільцями не селективним методом, а методом повної взаємозамінності.

**Виклад основного матеріалу.** Комбінована правка орієнтованих у двох площинах шліфувальних кругів на двосторонніх тоцешліфувальних верстатах дає змогу отримати на більшому діаметрі калібрувальну ділянку. При цьому весь припуск зрізується на ділянці, прилеглій до калібрувальної. Калібрувальна ділянка на вході деталей у зону обробки не бере участі в зрізуванні припуску, має високу стійкість і на виході формує остаточну точність торцевих поверхонь.

**Висновки відповідно до статті.** У роботі запропоновано новий високопродуктивний спосіб однопрохідної обробки торцевих поверхонь роликів підшипників кочення на двосторонніх торцешліфувальних верстатах орієнтованими шліфувальними кругами, що мають калібрувальну ділянку, яка забезпечує високу точність обробки. Цей спосіб дозволяє зменшити діапазон розсіювання розмірів та перейти до методу повної взаємозамінності при складанні підшипникових вузлів.

**Ключові слова:** двостороння торцешліфувальна обробка; шліфувальні круги з калібрувальною ділянкою; ролики підшипників кочення; точність обробки торцевих поверхонь роликів підшипників; продуктивність обробки.

*Рис.: 5. Бібл.: 17.*

**Актуальність теми дослідження** Підшипники кочення є найбільш поширеними стандартними складальними одиницями, які виготовляють на спеціалізованих заводах. Їх широко застосовують для рухомих з'єднань, особливо в механізмах із високими відносними швидкостями обертання, механізмах зі значними силовими навантаженнями та високими вимогами до точності їх центрування.

Вони мають повну зовнішню взаємозамінність за зовнішніми, внутрішніми діаметрами та шириною кілець. Між кільцями та тілами кочення існує неповна взаємозамінність, оскільки кільця та тіла кочення складають селективним методом, що полягає в точному вимірюванні дійсних розмірів поверхонь, сортуванні їх на розмірні групи в порядку зростання розмірів від найменшого до найбільшого з невеликою їх градацією та маркуванні розсортованих виробів для їх подальшого складання. Тому дуже важливо забезпечити точність обробки кілець та тіл кочення з мінімальним розсіюванням розмірів оброблених поверхонь для зменшення трудомісткості складання.

**Постановка проблеми.** ГОСТ 25255-82 «Подшипники качения. Ролики цилиндрические длинные. Технические условия» встановлює вимоги до роликів підшипників. Ролики повинні виготовлятися трьох ступенів точності I, II, та III для яких нормуються основні параметри. Так, наприклад, для ступені точності I при довжині ролика до 30 мм верхнє граничне відхилення  $es = +1,5$  мкм, нижнє  $ei = -7,5$  мкм, випуклість торця до

2 мкм. Увігнутість торців роликів не допускається. Ролики повинні бути термічно оброблені до твердості 60...65 HRC, не мати тріщин, раковин, корозії, слідів припалів.

Отже, забезпечення точності та продуктивності обробки торців роликів підшипників є актуальним і важливим завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найбільший вплив на якість і точність виробу мають операції на заключних етапах обробки. Такою операцією є шліфування, яке зазвичай виконується за допомогою традиційних способів: шліфування периферією чи торцем абразивного круга, але часто ці способи не дозволяють отримати заготовки заданої якості й забезпечити потрібну продуктивність.

Одним із найбільш ефективних способів механічної обробки деталей, що мають паралельні торцеві поверхні, у теперішній час є двостороння торцешліфувальна обробка (ДТШО). Нині серед основних напрямків і результатів підвищення ефективності процесу ДТШО автори [1] виділяють такі.

1. Управління жорсткістю верстата з метою мінімізації лімітуючих зсувів у зоні обробки.

У роботі [2] вирішена задача забезпечення підвищення осьової жорсткості верстата за рахунок зменшення і взаємної компенсації деформацій системи корпусних деталей, їх стиків і опор; розвалу кругів у вертикальній площині від сили, прикладеної вздовж осі круга. Таким чином, раціональна компоновка і баланс податливостей елементів пружної системи верстата можуть забезпечити відсутність кутових зсувів шліфувальних кругів (ШК) при прикладенні осьової сили. Кутові зміщення ШК при відцентровому прикладенні навантаження не компенсуються.

У роботі [3] визначені теоретичні умови, за яких похибка форми деталей наближається до нуля. Ці умови зводяться до певного місця розташування так званого «полюса повороту» круга  $\Pi$  (точки, відносно якої круг повертається під дією сил різання) (рис. 1). Полюс повороту повинен знаходитися в зоні калібрування. Це накладає обмеження на співвідношення наведених до круга характеристик жорсткості верстатів, що працюють з подачею виробів «на прохід».

$$J_0 = D_{кр} \cdot j_k / R_k \cdot R_y,$$

де  $j_0$  і  $j_k$  – осьова і кутова жорсткість круга на шпинделі;  $R_y$  – радіус прикладання рівнодіючої сил різання;  $D_{кр}$  – діаметр круга.

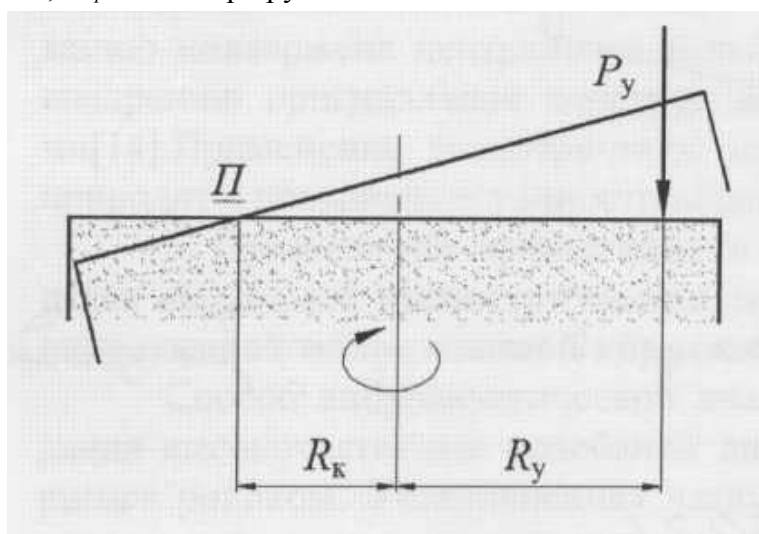


Рис. 1. Розташування полюсу повороту ШК у точці калібрування  $\Pi$  на радіусі  $R_k$  під дією сили  $P_y$  на плечі  $R_y$

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

2. Зниження негативного впливу теплових факторів і деформацій верстатів.

Негативний вплив теплових процесів розглядається в двох аспектах:

1) вплив високотемпературних процесів у контакті ШК і заготовок на стан поверхневого шару й появу припалів;

2) вплив тепловиділення у вузлах тертя і надлишкової температури охолоджуючої рідини (ОР) на температурні зміщення елементів несучої системи, що призводять до зміни відносного положення заготовки і ШК.

Практичним результатом рішення першої теплофізичної проблеми в роботах [4] і [5] є вдосконалення конструкції і робочого профілю ШК. У [4] запропоновано ШК з отворами для підводу ОР в зону контакту, що розташовані по концентричних колах; вони ж виконують функцію додаткових тепловідводів. У [5] для уникнення припалів пропонується використовувати переривчасті круги з пазами різної конфігурації. Для цього розроблені відповідні пристрої правки шліфувальних кругів.

Оскільки зміщення ШК здебільшого пов'язані з тепловими деформаціями станини через її нагрівання відпрацьованою ОР у центральній верхній частині, одним із радикальних і технічно простих заходів з їх мінімізації є вдосконалення системи відведення ОР в поєднанні з раціональним розподілом теплових потоків у верстаті. У роботі [6] розроблено заходи щодо значного зменшення (в 2-3 рази) і стабілізації теплових деформацій шляхом стабілізації температури ОР і збалансованості теплових потоків.

3. Забезпечення раціональних кінематичних характеристик руху заготовки при проходженні зони обробки.

Для реалізації сприятливого з точки зору формування точності руху заготовки в зоні шліфування розроблені різні схеми примусового її обертання [7-9].

Для забезпечення заданого закону зміни кутової швидкості вільної заготовки в гнізді диска-сепаратора авторами проведені спеціальні розрахунково-експериментальні дослідження. Запропоновано методика визначення сукупності технологічних параметрів (кути нахилу ШК, швидкість подачі та припуск на обробку), що забезпечує реалізацію оптимальної характеристики обертання заготовки, при якій забезпечується необхідна точність обробки [10].

4. Оптимізація конструкції та геометричних характеристик ШК з метою підвищення їх формостійкості і зниження похибок оброблених поверхонь.

У результаті моделювання процесу формоутворення оброблених торців і виробничих випробувань встановлено позитивний вплив на точність геометричної модифікації торцевих поверхонь ШК у вигляді параболоїдів обертання [11]. Для формування профілю ШК з параболічною модифікацією запропоновані відповідні пристрої правки [12-13].

Дослідження форми ШК показали, що найбільш інтенсивному зносу піддається центральна кільцева область ШК [14]. Запропоновано і прийнята до впровадження оригінальна конструкція двухзонного ШК із гетерогенними властивостями [15]. Застосування геометрично модифікованого і двухзонного інструменту приводить до підвищення точності обробки та періоду між правками ШК.

5. Застосування ефективного способу віброакустичної діагностики процесу обробки циліндричних деталей і розробленого на його основі методу оперативної спрямованої корекції параметрів налагодження верстата.

Спосіб віброакустичної діагностики процесу заснований на ефекті збудження високочастотних коливань динамічної системи диска-сепаратора роликком, що обертається. Встановлений взаємозв'язок показників віброхарактеристики і характеристик обертання, що визначають точність обробки за параметром торцевого биття, зробив можливим ефективне використання віброхарактеристики для оперативного виробничого налагодження торцешліфувальних верстатів і його корекції [16].

6. Моделювання процесу ДТШО і прогнозування форми й похибок оброблюваних поверхонь, можливість інтерактивного вибору керуючих технологічних параметрів.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Вимоги до точності торцевих поверхонь, що є основними конструкторськими й технологічними базами при наступному круглому зовнішньому, внутрішньому і безцентровому шліфуванні, постійно зростають, оскільки значно впливають на якісні показники машинобудівних виробів загалом. Технологічне забезпечення точності при ДТШО сприяє вирішенню проблеми імпортозаміщення виробів машинобудування і спрямовано на зміцнення економічної незалежності країни. Як показує досвід проектування, виготовлення і експлуатації двосторонніх торцешліфувальних верстатів, підвищення їх геометричної точності, жорсткості й інших показників не завжди дає ефект зниження похибки оброблених торців. Тому більш ефективним напрямком є підвищення технологічних можливостей процесу ДТШО, правильний вибір раціональних режимів шліфування, оптимізація характеристик інструментів і параметрів наладки.

**Мета статті.** Метою цієї статті є розробка високопродуктивного способу обробки торців роликів підшипників на двосторонніх тоцешліфувальних верстатах, який би забезпечував більш високу точність розмірів оброблених поверхонь і, як наслідок, дозволив би перейти від селективного методу складання підшипників до повної взаємозамінності.

**Виклад основного матеріалу.** Отримання високої точності та продуктивності ДТШО забезпечується за рахунок зняття припуску за один прохід, одночасної обробки відразу двох торців кількох деталей, що знаходяться в зоні обробки, простоти завантаження-вивантаження з можливістю автоматизувати цей процес, мінімізації похибки базування, суміщення в часі процесів завантаження, обробки та вивантаження, створення неперервності потоку заготовок.

Для підвищення ефективності шліфування, зменшення теплового впливу необхідна профільна правка круга. Найбільш раціональним є комбінований спосіб правки, представлений на рис. 2 та досліджений у роботі [17].

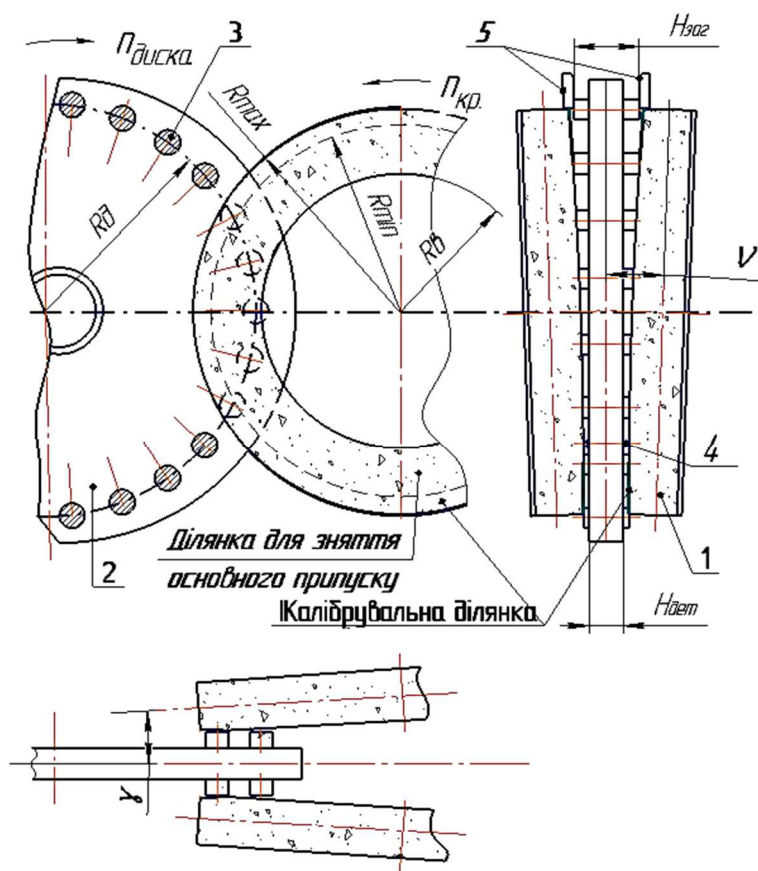


Рис. 2. Комбінований спосіб правки

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Круги 1 орієнтують в горизонтальній площині на кут  $\gamma$  і у вертикальній – на кут  $\nu$  з метою зняття припуску за один прохід. Спочатку вся торцева поверхня круга правиться в площині, перпендикулярній осі обертання круга за допомогою стаціонарного пристрою верстата. Після цього, алмазними олівцями 4, закріпленими на диску подачі заготовок 2, правлять ділянки, які прилягають до зовнішніх діаметрів кругів. При цьому величина радіуса правки, по якому переміщується вершина алмазного олівця, вибирається в залежності від форми та розмірів оброблюваної заготовки.

У робочому циклі шліфування комбінована правка дає можливість розподілити весь припуск між чорною і чистою ділянками, збільшити робочу довжину дуги контакту деталей із кругом, що підвищує продуктивність обробки, знижує температуру в зоні обробки. Висока точність форми торця деталі забезпечується на калібрувальній ділянці, прилеглий до зовнішнього діаметру круга, при виході із зони обробки. При цьому калібрувальна ділянка при вході в зону шліфування не бере участі в зніманні припуску й має високу стійкість, оскільки напрямні елементи 5 унеможливають її контакт із заготовками.

Проведемо дослідження точності формоутворення деталей при запропонованому способі шліфування з калібрувальною ділянкою.

Радіус-вектор  $\vec{R}_i$  точок калібрувальної ділянки торцевої поверхні шліфувального круга визначається траєкторією руху алмазного олівця:

$$\vec{R}_i(\theta_B, \theta) = A^6(\theta) \cdot A^1(-X_c) \cdot A^5(\nu) \cdot A^4(\gamma) \cdot A^2(Y_c) \cdot A^1(X_c) \cdot A^3(Z_c) \cdot A^6(-\theta_B) \cdot A^1(R_B) \cdot \vec{e}^4, \tag{1}$$

де  $A^1, \dots, A^6$  – матриці перетворення систем координат, які моделюють рухи й повороти вздовж і навколо координатних осей;

$\theta, \theta_B$  – параметри поверхні різального інструменту, які відповідають за кутове й радіальне положення точки робочої поверхні круга;

$X_c, Y_c, Z_c$  – розміри, що визначають положення центра сферичного пальця відносно барабана подачі й робочої площини круга,

$\gamma, \nu$  – кути орієнтації шліфувальної бабки в горизонтальній і вертикальній площинах;

$R_B$  – радіальний розмір розташування осей заготовок у барабані подачі;

$e^4 = (0, 0, 0, 1)^T$  – радіус-вектор вершини алмазного олівця, що збігається з початком координат.

Рівняння (1) описує калібрувальну ділянку торця інструмента при його профілюванні на верстаті, яка наведена на рис. 3.

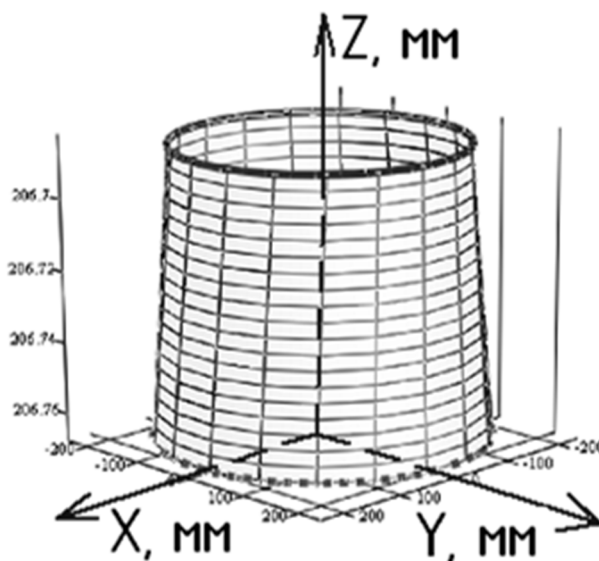


Рис. 3. Калібрувальна ділянка круга при збільшенні розмірів вздовж вісі Z в 1000 разів

Формоутворююча модель верстата описує сімейство інструментальних поверхонь у системі координат деталі

$$\vec{R}_o(\theta_o, \theta_B, \theta) = A^1(-R_B) \cdot A^6(\theta_0) \cdot A^3(-Z_c) \cdot A^1(-X_c) \cdot A^2(-Y_c) \cdot A^4(-\gamma) \cdot A^5(-\nu) \cdot A^1(X_c) \cdot \vec{R}_i(\theta_B, \theta), \quad (2)$$

де  $\theta_0$  – кутова координата положення центра заготовки відносно системи координат круга.

При комбінованому способі правки у формоутворенні торця заготовки бере участь вся поверхня калібрувальної ділянки, але остаточна точність може формуватися колом найменшого радіуса  $R_{\min}$ , найбільшого радіуса  $R_{\max}$  чи лінією контакту заготовки з кругом (рис. 4).

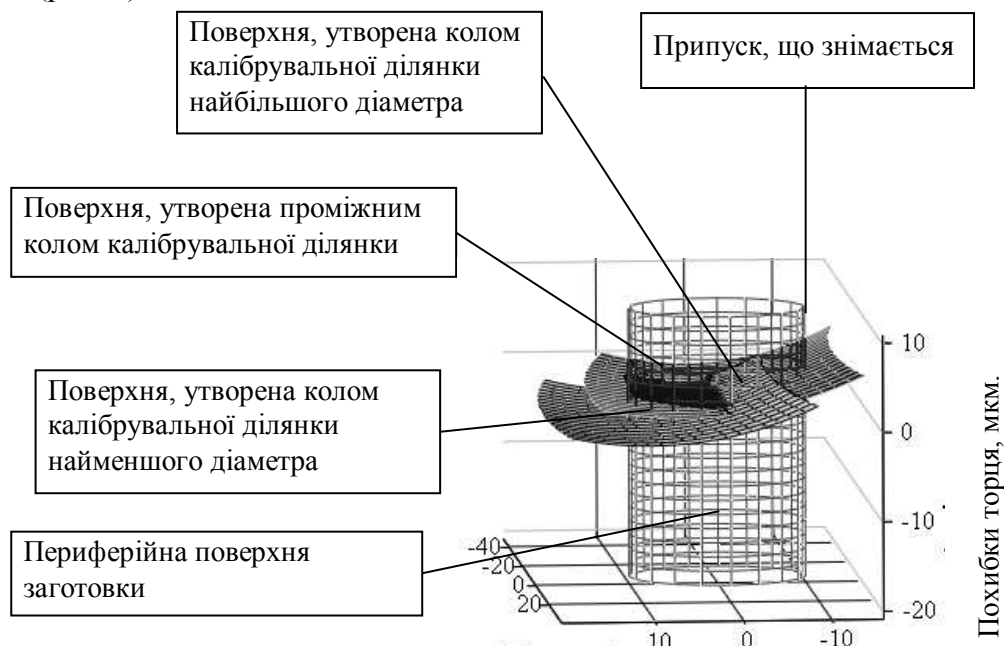


Рис. 4. Формоутворення торця заготовки

Радіус-вектор характеристики на формотвірній ділянці торцевої поверхні круга визначається із рівняння (2), враховуючи рівняння зв'язку для однопараметричного огинання

$$\frac{\partial \vec{R}_o(\theta_o, \theta_B, \theta)}{\partial \theta_o} \cdot \frac{\partial \vec{R}_o(\theta_o, \theta_B, \theta)}{\partial \theta_B} \times \frac{\partial \vec{R}_o(\theta_o, \theta_B, \theta)}{\partial \theta} = 0$$

Рівняння поверхні, яка утворюється при русі максимального кола, може бути отримано із рівняння (2) при підстановці в нього замість радіус-вектора поверхні координат точок кола.

$$\vec{R}_o(\theta_o, \theta) = A^6(k \cdot \theta_0) \cdot A^1(-R_B) \cdot A^6(\theta_0) \cdot A^3(-Z_c) \cdot A^1(-X_c) \cdot A^2(-Y_c) \cdot A^4(-\gamma) \cdot A^5(-\nu) \cdot A^1(X_c) \cdot A^6(\theta) \cdot A^1(R_{\max}) \cdot A^3(Z_{\max}) \cdot e^{-4}$$

Проведені теоретичні дослідження впливу довжини калібрувальної ділянки, обертання заготовок, кутів орієнтації кругів на точність обробки показали такі результати.

1. Довжина калібрувальної ділянки повинна бути не меншою діаметру оброблюваної заготовки, але робити її надто великою недоцільно, оскільки точність при цьому фактично не збільшується, а довжина лінії контакту деталі з кругом зменшується.

2. Для підвищення точності обробки необхідно, щоб заготовка, що обробляється, обернулася на калібрувальній ділянці не менше одного разу.

3. Найкращі по точності результати отримані при співвідношенні кутів орієнтації у вертикальній  $\nu$  і горизонтальній  $\gamma$  площинах  $\gamma = 1,57 \cdot \nu$ . Чим більше відрізняється це співвідношення, тим нижча точність.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Експериментальні значення відхилень, виміряні приладом «TALYROUND» при обробці циліндричних роликів  $\varnothing 20$  мм на двосторонньому торцешліфувальному верстаті 3342АДО кругами I-450×305×63-25A40CT1B8 з довжиною калібрувальної ділянки 20 мм, співвідношенням кутів орієнтації  $\gamma = 1,57$   $\nu$ , обертанням заготовок, знімаємим припуском 0,5 мм становили:

- відхилення від площинності – 1,5 мкм;
- відхилення від паралельності торцевих поверхонь – 2 мкм.

**Висновки відповідно до статті.** У роботі запропоновано високопродуктивний спосіб обробки торцевих поверхонь роликів всіх видів для підшипників, який забезпечує більш високі вимоги по точності та дозволяє проводити комплектування підшипників без сортування на розмірні групи – методом повної взаємозамінності. Це також сприяє збільшенню терміну довговічності підшипників, оскільки осьове навантаження розподіляється по торцях рівномірно.

#### Список використаних джерел

1. Вайнер Л. Г. Повышение эффективности процесса двусторонней торцешлифовальной обработки. URL: [http://konf-sev.donntu.org/sbornik/Pdf\\_1\\_16/057-060.pdf](http://konf-sev.donntu.org/sbornik/Pdf_1_16/057-060.pdf).
2. Гуревич А. Л., Каминская В. В. Автоматизированный расчет жесткости торцешлифовальных станков. *Станки и инструмент*. 1983. № 12. С. 4-6.
3. Байор Б. Н., Шахновский С. С. Повышение точности обработки на двустороннем торцешлифовальном станке. *Станки и инструмент*. 1974. № 312. С. 12-13.
4. Савинская В. Г. Качество поверхностного слоя дисков трения при торцевом двустороннем шлифовании. *Прогрессивные технологии чистой и отделочной обработки / Челябинский гос. тех. ун-т. Челябинск, 1995. С. 102-106.*
5. Гурьянихин В. Ф., Евстигнеев А. Д. Повышение эффективности двустороннего торцевого шлифования тонкостенных заготовок. *СТИН*. 2006. № 3. С. 34-35.
6. Андрианова И. А., Шахновский С. С. Влияние тепловых деформаций на положение шлифовальных кругов торцешлифовального станка. *Станки и инструмент*. 1982. № 9. С. 6-7.
7. Salhe E. *Plan- und Planprofilschleifmaschinen / G. Rohde. VDI-Z. 1882. Vol.124, № 23/24. S. 129-137.*
8. Патент №2455142. РФ, МПК В24В7/17. Способ двустороннего торцевого шлифования цилиндрических деталей / Вайнер Л. Г. № 2010153645; заявл. 27.12.2010; опубл. 10.07.2012. Бюл. № 19. 4 с.
9. Патент №2463150, РФ, МПК В24В7/17. Способ двустороннего торцевого шлифования цилиндрических деталей / Вайнер Л. Г. №2010153444/02; заявл. 27.12.2010; опубл. 10.10.2012. Бюл. № 28. 4 с.
10. Вайнер Л. Г. Исследование характера движения цилиндрических роликов при обработке на двусторонних торцешлифовальных станках. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2010. № 4 (282). С. 49-54.
11. Степанов Ю. С., Вайнер Л. Г. Анализ систем и процессов реального формообразования оппозитных торцевых поверхностей при двустороннем шлифовании. *Моделирование технологических процессов механической обработки и сборки*: коллективная монография / под ред. А. В. Киричека. Москва: Изд. дом «Спектр», 2013. С. 227-277.
12. Патент № 126980 РФ, МПК В24В7/17. Устройство для правки торцевых поверхностей шлифовальных кругов / Вайнер Л. Г., Богачев А. П., Флусов Н. И.; заявл. 03.08.2012; опубл. 20.04.2013. Бюл. № 11.
13. Патент № 136381 РФ, МПК В24В53/02. Устройство для правки торцевых поверхностей шлифовальных кругов / Вайнер Л. Г.; заявл. 14.06.2013; опубл. 10.01.2014. Бюл. № 1.
14. Вайнер Л. Г., Носенко В. А., Сафронов А. Э. Анализ закономерностей изнашивания шлифовальных кругов при двусторонней обработке торцов колец подшипников. *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2013. № 3(30). С. 111-118.
15. Патент № 121465 РФ, МПК В24В7/17. Устройство для двустороннего шлифования торцов деталей / Вайнер Л. Г. № 2011153276/02; заявл. 26.12.2011; опубл. 27.10.2012. Бюл. № 30. 3 с.
16. Вайнер Л. Г., Ривкин В. А. Виброакустический контроль двустороннего торцешлифования в производственных условиях. *Вестник машиностроения*. 2011. № 7. С. 60-64.

17. Венжега В. І. Підвищення ефективності шліфування торців при схрещених осях деталі та круга з калібрувальною ділянкою: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2009. 214 с.

### References

1. Vayner, L. G. (n.d.). Povyshenie effektivnosti protsessa dvustoronnei tortseshlifovalnoi obrabotki [Improving the efficiency of the process of two-side face grinding]. Retrieved from [http://konf-sev.donntu.org/sbornik/Pdf\\_1\\_16/057-060.pdf](http://konf-sev.donntu.org/sbornik/Pdf_1_16/057-060.pdf).
2. Gurevich, A. L., Kaminskaya, V. V. (1983). Avtomatizirovannyi raschet zhestkosti tortseshlifovalnykh stankov [Automated calculation of rigidity of face grinding machines]. *Stanki i instrument – Machine tools and tools*, 12, 4-6 [in Russian].
3. Bayor, B. N., Shakhnovskiy, S. S. (1974). Povyshenie tochnosti obrabotki na dvustoronnem tortseshlifovalnom stanke [Improving the accuracy of processing on a double-sided face grinding machine]. *Stanki i instrument – Machine tools and tools*, 312, 12-13 [in Russian].
4. Savinskaya, V. G. (1995). Kachestvo poverkhnostnogo sloia diskov treniia pri tortsovom dvustoronnem shlifovanii [The quality of the surface layer of friction disks during end-face grinding]. In *Progressivnye tekhnologii chistovoi i otdelochnoi obrabotki – Advanced finishing and finishing technologies* (pp. 102-106). Chelyabinsk [in Russian].
5. Gurianikhin, V. F., Ievstigneev, A. D. (2006). Povysheniye effektivnosti dvustoronnego tortsevogo shlifovaniya tonkostennykh zagotovok [Improving the efficiency of bilateral face grinding of thin-walled workpieces]. *STIN – STIN*, 3, 34-35 [in Russian].
6. Andrianova, I. A., Shakhnovskiy S. S. (1982). Vliianie teplovykh deformatsii na polozhenie shlifovalnykh krugov tortseshlifovalnogo stanka [The influence of thermal deformation on the position of the grinding wheels of the end grinding machine]. *Stanki i instrument – Machine tools and tools*, 9, 6-7 [in Russian].
7. Salhe, E., Rohde G. (1882). Plan- und Planprofil schleifmaschinen. *VDI-Z*, 124 (№ 23/24), 129-137 [in English].
8. Vayner, L. G. (2012). *Sposob dvustoronnego tortsevogo shlifovaniya tsilindricheskikh detaley [The method of two-side face grinding of cylindrical parts]*. Patent № 2455142. RF, MPK V24V7/17.
9. Vayner, L. G. (2012). *Sposob dvustoronnego tortsevogo shlifovaniya tsilindricheskikh detaley [The method of two-side face grinding of cylindrical parts]*. Patent № 2463150, RF, MPK V24V7/17.
10. Vayner, L. G. (2010). Issledovaniye kharaktera dvizheniya tsilindricheskikh rolkov pri obrabotke na dvustoronnikh tortseshlifovalnykh stankakh [Investigation of the nature of the movement of cylindrical rollers during processing on two-sided end grinding machines]. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii – Fundamental and applied problems of engineering and technology*, 4 (282), 49-54 [in Russian].
11. Stepanov, Yu. S., Vainer L. G. (2013). Analiz sistem i protsessov real'nogo formoobrazovaniya oppozitnykh tortsevnykh poverkhnostey pri dvustoronnem shlifovanii [Analysis of systems and processes of real shaping of opposed end surfaces during double-sided grinding]. In A. V. Kiricheko (Ed.), *Modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki i sborki – Modeling of technological processes of machining and assembly* (pp. 227-277). Moscow: Spektr [in Russian].
12. Vayner, L. G., Bogachev, A. P., Flusov, N. I. (2013). *Ustroystvo dlya pravki tortsevnykh poverkhnostey shlifoval'nykh krugov [Device for dressing the end surfaces of grinding wheels]*. Patent № 126980 RF, MPK V24V7/17 [in Russian].
13. Vayner, L. G. (2014). *Ustroystvo dlya pravki tortsevnykh poverkhnostey shlifovalnykh krugov [Device for dressing the end surfaces of grinding wheels]*. Patent № 136381 RF, MPK V24V53/02 [in Russian].
14. Vayner, L. G., Nosenko, V. A., Safronov, A. E. (2013). Analiz zakonornostey iznashivaniya shlifoval'nykh krugov pri dvustoronney obrabotke tortsev kolets podshipnikov [Analysis of patterns of wear of grinding wheels during double-sided machining of the ends of bearing rings]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the Pacific State University*, 3(30), 111-118 [in Russian].
15. Vayner, L. G. (2012). *Ustroystvo dlia dvustoronnego shlifovaniia tortsov detalei [Device for double-sided grinding of ends of parts]*. Patent № 121465 RF, MPK V24V7/17 [in Russian].
16. Vayner, L. G., Rivkin, V. A. (2011). Vibroakusticheskiy kontrol' dvustoronego tortseshlifo-vaniya v proizvodstvennykh usloviyakh [Vibro-acoustic control of two-face grinding in a production environment]. *Vestnik mashinostroeniia – Engineering Bulletin*, 7, 60-64 [in Russian].
17. Venzhega, V. I. (2009). Підвищення ефективності шліфування торсів при схрещених осях деталей та круга з калібрувальною ділянкою [Improving the efficiency of grinding end faces



with crossed axes of the workpiece and circle with a calibration section]. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv [in Ukrainian].

UDC 621.923.42

*Volodymyr Kalchenko, Dmytro Kalchenko, Volodymyr Venzhega, Sergiy Ryabov*

## INCREASING THE ACCURACY AND PRODUCTIVITY OF THE MOVING OF THE ROLLING BEARINGS OF THE ROLLING BEARINGS

**Urgency of the research.** High-precision and productive machining of the ends of the rollers of the roller bearings is an urgent and important scientific and practical task, the solution of which will allow both to prolong the life of the bearings and to reduce their production, and therefore to increase the level of competitiveness of production.

**Target setting.** The main requirements relating to the rollers of the rolling bearings are to ensure the high accuracy of size, shape, quality of end surfaces with high productivity of the machining process.

**Actual scientific researches and issues analysis.** The main directions of improving the accuracy and productivity of two-sided grinding are to increase the rigidity of the machine-tool-tool-part system, to reduce the thermal impact, to improve the kinematic characteristics of the workpiece movement in the treatment area, to optimize the design and characteristics of grinding wheels.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** One of the most promising areas for improving the accuracy and productivity of the double-sided grinding process is to use the effect of crossing axes of grinding wheels and billets with special tool profiling.

**The purpose of the article.** To analyze the factors that affect the accuracy and productivity of machining the end surfaces of parts on two-sided grinding machines and to develop a new high-performance method of processing the end surfaces of the rollers of the roller bearings, which would provide the possibility of assembly between the rolling bodies and the rings, not by a selective method.

**The presentation of the main material.** The combined editing of the two planes of grinding wheels on two-sided grinding machines enables to obtain a larger diameter of the calibration section. In this case, the entire allowance is cut off in the area adjacent to the gauge. The calibration section at the inlet of the parts in the treatment area does not participate in cutting off the seam allowance, has high stability and at the outlet forms the final accuracy of the end surfaces.

**Conclusions and suggestions.** The paper proposes a new high-performance method of single-pass machining of the end surfaces of the rollers of the roller bearings on two-sided grinding machines with oriented grinding wheels, which have a calibration section, which ensures high accuracy of processing. This method allows to reduce the scattering range of sizes and to go to the method of complete interchangeability when assembling the bearing units.

**Keywords:** double-sided grinding; grinding wheels with calibration section; roller bearings; precision machining of the end surfaces of the roller bearings; processing performance.

Fig.: 5. References: 17.

**Кальченко Володимир Віталійович** – доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Kalchenko Volodymyr** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector in scientific and pedagogical work, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** vvkalchenko74@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9072-2976>

**Researcher ID:** G-6752-2014

**Кальченко Дмитро Володимирович** – аспірант, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Kalchenko Dmytro** – PhD student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** itmia@ukr.net

**Венжега Володимир Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Venzhega Volodymyr** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** vivenzhega@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-8857-349X>

**Researcher ID:** H-3560-2014

**Рябов Сергій Ігорович** – студент, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Ryabov Sergiy** – student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** doctorthomases@gmail.com

УДК 621.923

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-18-26

Андрій Єрошенко, Олександра Дорошенко

## ТОЧНІСТЬ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПОВЕРХОНЬ ТІЛ ОБЕРТАННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ З ВИКОРИСТАННЯМ МАСТИЛЬНО-ОХОЛОДЖУЮЧОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

**Актуальність теми дослідження.** Дослідження спрямовані на виявлення та встановлення чинників, що найбільше впливають на точність формоутворення поверхонь тіл обертання при шліфуванні, є актуальним завданням у машинобудуванні.

**Постановка проблеми.** Точність формоутворення поверхонь тіл обертання залежить від точності лінійних розмірів, якості оброблюваної поверхні, точності форми та взаємного розташування поверхонь. Ці параметри залежні від багатьох змінних факторів, що впливають на процес обробки. При круглому шліфуванні високої точності можливо досягти лише при великій втраті продуктивності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У відомих дослідженнях точності формоутворення поверхонь тіл обертання при шліфуванні фактори, що впливають на якість оброблюваної поверхні, розглядаються незалежно один від одного.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Дослідження процесу круглого шліфування з метою виявлення найбільш впливових факторів та встановлення їх оптимальних значень.

**Постановка завдання.** Виявлення основних та другорядних чинників, що впливають на процес формоутворення поверхонь тіл обертання при круглому шліфуванні. Встановлення граничних значень обраних факторів. Проведення експериментальних досліджень для отримання числових значень параметрів точності. Проведення статистичного аналізу отриманих даних та створення математичної моделі процесу. Проведення повного факторного експерименту з метою оптимізації процесу шліфування.

**Виклад основного матеріалу.** Експериментально досліджено точність формоутворення поверхонь тіл обертання при круглому шліфуванні на основі виявлення найбільш впливових змінних факторів у категоріях: верстат та оснащення, заготовка. Здійснено статистичне оцінювання факторів за планом Plackett-Burman (7/8). Проведено дисперсійний аналіз експерименту. Виявлені залежності між факторами (побудовані графіки маргінальних середніх та графіки взаємодії факторів). Виявлено найбільш впливовий фактор. Проведено повний факторний експеримент, оптимізацію процесу з метою встановлення оптимальних показників найбільш впливових факторів.

**Висновки відповідно до статті.** У результаті проведених досліджень виявлено найбільш впливовий фактор процесу круглого шліфування поверхонь тіл обертання. Розв'язана задача оптимізації, побудовано оптимальний профіль бажаності.

**Ключові слова:** шліфування; формоутворення; циліндричний вал; шорсткість; оптимізація, профіль бажаності.

Рис.: 11. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** Дослідження спрямовані на виявлення та встановлення чинників, що найбільше впливають на точність формоутворення поверхонь тіл обертання при шліфуванні, є актуальним завданням у машинобудуванні.

**Постановка проблеми.** Шліфування – основний метод опоряджувальної обробки, є найбільш економічним, а в окремих випадках єдиним можливим. Тому дослідження, спрямовані на виявлення та встановлення чинників, що найбільше впливають на точність формоутворення поверхонь тіл обертання при шліфуванні, є актуальним науковим завданням, вирішення якого дозволить підвищити точність геометричної форми та якість поверхневого шару оброблених деталей та досягти більш продуктивної обробки шляхом правильного використання можливостей шліфувальних верстатів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасному машинобудуванні є два основних види шліфування: алмазне та абразивне. У роботі [1] встановлено, що на параметр якості поверхні суттєво впливають матеріал зерна абразиву, його зернистість, матеріал зав'язки та режими шліфування. У результаті проведених досліджень [2] побудовано математичну модель впливу глибини різання, швидкості обертання деталі та повздовжньої подачі стола верстата при круглому алмазному шліфуванні. У роботі [3] наведено результати експериментального дослідження впливу складу інструменту та режимів різання тонкого алмазного шліфування. Виявлено основні закономірності формування шорсткості поверхонь та їх залежність від режимів різання. У процесі експериментальних досліджень [4; 5] визначено величину температури в зонах контакту шліфувального круга та деталі (на вході, у зоні контакту та на виході). У дослідженнях також наведено експериментально отримане значення об'ємного зносу абразивного круга.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Відсутні комплексні експериментальні дослідження точності формоутворення з урахуванням максимальної кі-

© Єрошенко А. М., Дорошенко О. О., 2019

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

лькості факторів. Не уточнений вплив досліджуваних факторів у порівнянні між собою на процес формоутворення.

**Мета статті.** Головною метою роботи є дослідження точності формоутворення поверхонь обертання при круглому шліфуванні на основі виявлення найбільш впливових факторів та встановлення їх оптимальних показників.

**Виклад основного матеріалу.** Для реалізації мети роботи було заплановано проведення ряду експериментів. Планування першого експерименту проводилося на основі семи факторів: діаметр заготовки, матеріал заготовки, наявність попередньої термічної обробки заготовки, частота обертання заготовки, величина подачі, глибина різання, наявність попередньої правки круга. Інтервали варіювання факторів наведено на рис. 1. Обладнання: круглошліфувальний верстат моделі 3М 151, мікрометр МК 100–1 ГОСТ 6570-90, зразки шорсткості поверхні (порівняння) ГОСТ 9378-93, індикатор годинникового типу. Інструмент – абразивний шліфувальний круг 25AF46 ГОСТ 2424-83. Мазильно-охолоджуюче технологічне середовище – «СІМТЕСН» D18-02. Планування експерименту проводилось із використанням програми STATISTICA. Експеримент проводився згідно з планом Plackett-Burman (7/8). Матриця планування з додатковим стовпчиком результатів вимірюваної шорсткості оброблених поверхонь наведена на рис. 2.

Factor	Factor Name	Low Value	Low Label	High Value	High Label	C/Q Cont or Qual.
A (1)	Діаметр заготовки	30	Low	90	High	C
B (2)	Матеріал заготовки	сталь 45	Low	сталь 45X	High	C
C (3)	ТО заготовки	сира	Low	гартована	High	C
D (4)	Частота обертання	100	Low	160	High	C
E (5)	Подача	0,04	Low	0,12	High	C
F (6)	Глибина	0,01	Low	0,02	High	C
G (7)	Правка круга	без	Low	з	High	C

Рис. 1. Інтервали варіювання досліджуваних факторів

	1 Діаметр заготовки	2 Матеріал заготовки	3 ТО заготовки	4 Частота обертання	5 Подача	6 Глибина	7 Правка круга	8 Шорсткість за Ra
1	30,00000	-1,00000	-1,00000	160,0000	0,120000	0,020000	-1,00000	2,5
2	30,00000	-1,00000	1,00000	160,0000	0,040000	0,010000	1,00000	0,63
3	30,00000	1,00000	-1,00000	100,0000	0,120000	0,010000	1,00000	0,63
4	30,00000	1,00000	1,00000	100,0000	0,040000	0,020000	-1,00000	2,5
5	90,00000	-1,00000	-1,00000	100,0000	0,040000	0,020000	1,00000	2,5
6	90,00000	-1,00000	1,00000	100,0000	0,120000	0,010000	-1,00000	0,63
7	90,00000	1,00000	-1,00000	160,0000	0,040000	0,010000	-1,00000	1,25
8	90,00000	1,00000	1,00000	160,0000	0,120000	0,020000	1,00000	2,5

Рис. 2. Матриця планування та результат проведення експериментів

Результат проведеного оцінювання факторів наведено в таблиці сумарного впливу (рис. 3) та на діаграмі Парето (рис. 4). Перший стовпчик значень визначає ефект, або вплив кожного фактора на досліджуваний параметр. Найбільш впливовим є 6-й фактор – глибина різання. Другий стовпчик виражає коефіцієнти лінійної моделі процесу шліфування.

Effect Estimates; Var.: Шорсткість за Ra; R-sqr=1	
7 Factor Screening Design	
DV: Шорсткість за Ra	
Factor	Effect
Mean/Interc.	1,642500
(1)Діаметр заготовки	0,155000
(2)Матеріал заготовки	0,155000
(3)ТО заготовки	-0,155000
(4)Частота обертання	0,155000
(5)Подача	-0,155000
(6)Глибина	1,715000
(7)Правка круга	-0,155000

Рис. 3. Результат сумарного впливу факторів

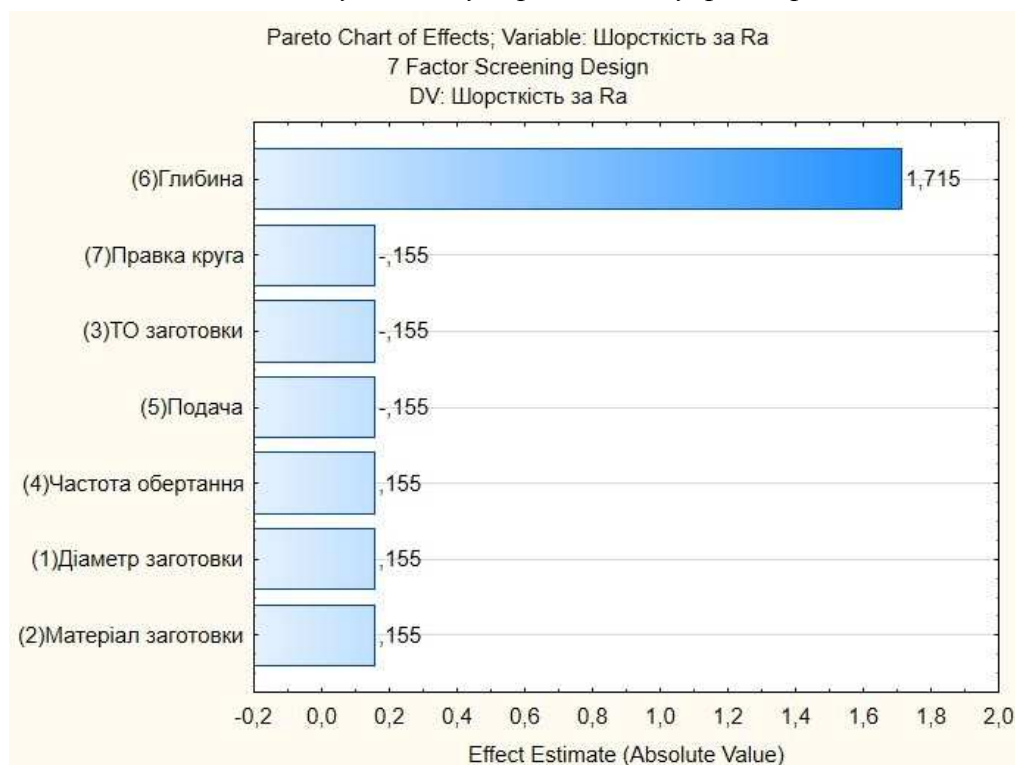


Рис. 4. Діаграма ефектів Парето

Оцінені маргінальні (групові) середні дають оцінки передбачених середніх значень для комірок моделі. Графіки профілів (графіки взаємодії) для цих середніх дозволяють легко візуалізувати досліджувані взаємозв'язки. На рис. 5 зображено графіки маргінальних середніх та графіки взаємодій різних досліджуваних факторів.

Аналізуючи наведені графіки, можемо зробити такі висновки:

1. Чим більший діаметр оброблюваної заготовки, тим меншу частоту обертання необхідно їй задавати з метою отримання меншої шорсткості (рис. 5, а).
2. Чим менша глибина різання, тим менша шорсткість оброблюваної поверхні незалежно від матеріалу (рис. 5, б).

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

3. Чим менша глибина різання, тим менша шорсткість оброблюваної поверхні незалежно від її частоти обертання (рис. 5, в).

4. Незалежно від діаметра заготовки для отримання меншої шорсткості необхідно задавати меншу глибину різання (рис. 5, з).

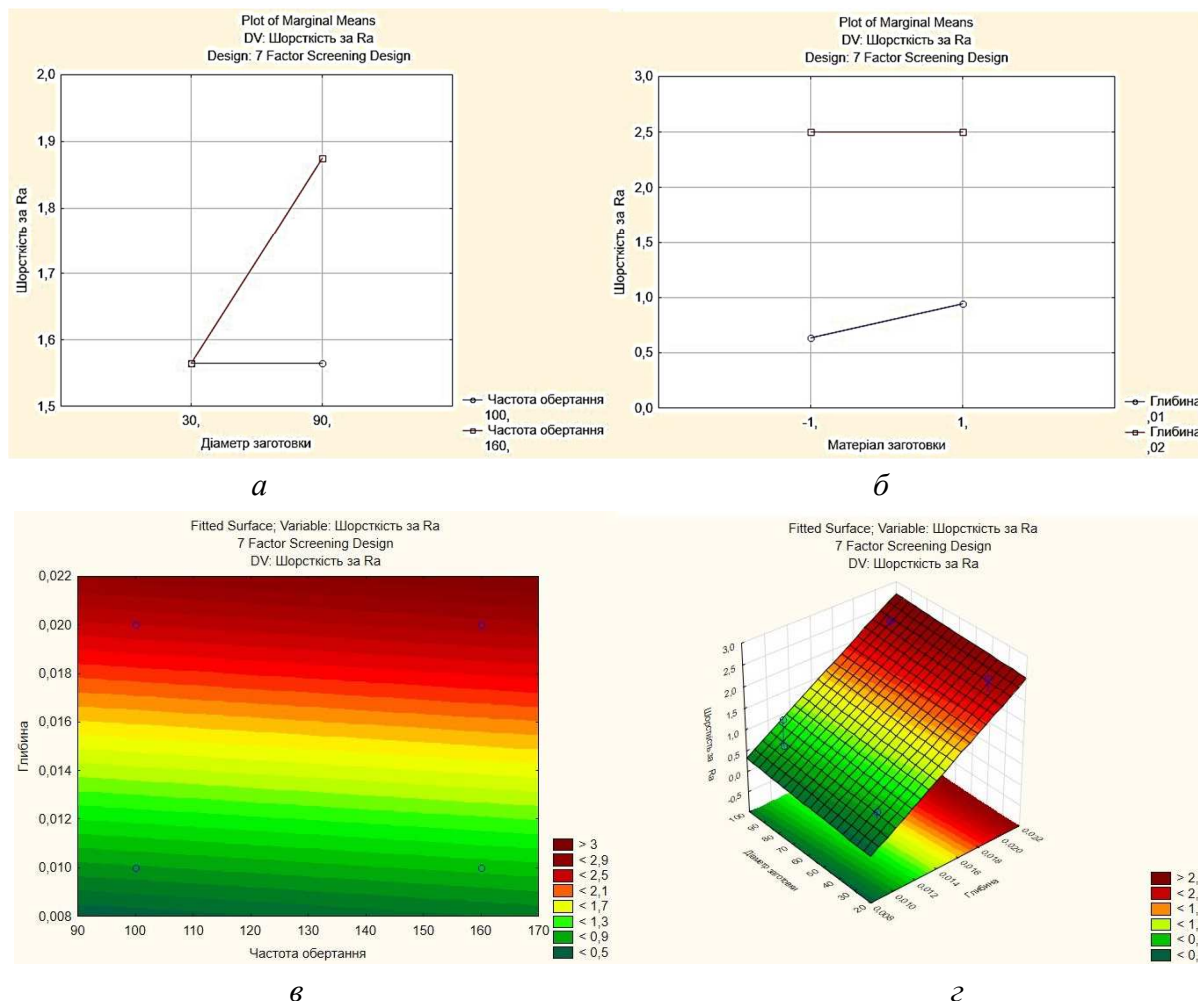


Рис. 5. Графіки маргінальних середніх (а, б) та графіки взаємодії (в, з)

Другий експеримент проводився на основі двох факторів: глибини різання (як найбільш впливовий фактор попереднього експерименту) та частоти обертання заготовки (як найбільш керований фактор серед досліджуваних). Інтервали варіювання наведено на рис. 6. Обладнання, інструмент та мастильно-охолоджуюче середовище не змінювались. Планування експерименту проводилось із використанням програми STATISTICA. Експеримент проводився згідно з центральним композиційним планом (2/1/10). Матриця планування з додатковим стовпчиком результатів вимірюваної шорсткості оброблюваних поверхонь наведена на рис. 7.

Factor	Factor Name	Low Value	Low Label	Center Value	Center Label	High Value	Hig Lab
A (1)	Частота обертання заготовки	120	Low	130	Center	140	High
B (2)	Глибина різання	0,02	Low	0,05	Center	0,07	High

Рис. 6. Інтервали варіювання досліджуваних факторів

Standard Run	2**(2) central composite, nc=4 ns=4 n0=2 Runs=10 (Spreadsheet)		
	Частота обертання заготовки, об/хв	Глибина різання, мм	Шорсткість за Ra, мкм
1	110,0000	0,020000	1,25
2	110,0000	0,070000	2,5
3	150,0000	0,020000	1,25
4	150,0000	0,070000	2
5	101,7157	0,050000	1
6	158,2843	0,050000	2
7	130,0000	0,014645	0,63
8	130,0000	0,085355	1
9 (C)	130,0000	0,050000	0,63
10 (C)	130,0000	0,050000	0,63

Рис. 7. Матриця планування та результат проведення експериментів

У процесі проведення статистичної обробки результатів проведених експериментів досліджуваний параметр шорсткості обирається як залежний параметр, а величини частоти обертання заготовки та глибини різання як незалежні. Діаграму Парето при врахуванні лінійних, квадратичних ефектів та їх взаємодії наведено на рис. 8. Найбільший вплив має квадратичний ефект частоти обертання заготовки.

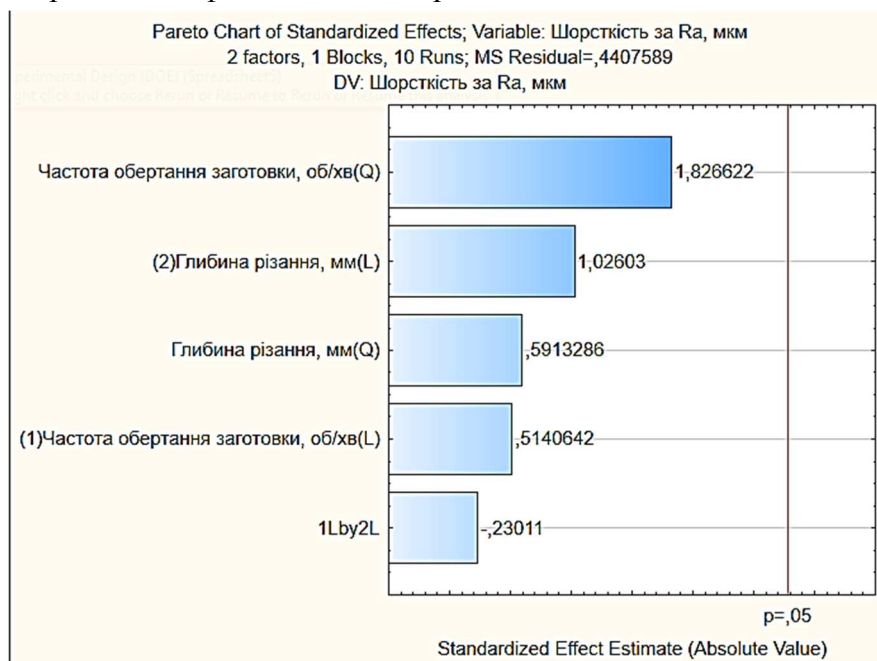


Рис. 8. Діаграма Парето лінійні та квадратичні ефекти з взаємодією

Змінюючи налаштування параметрів моделі на врахування лише лінійних ефектів, отримуємо результат більшого впливу частоти обертання заготовки (рис. 9).

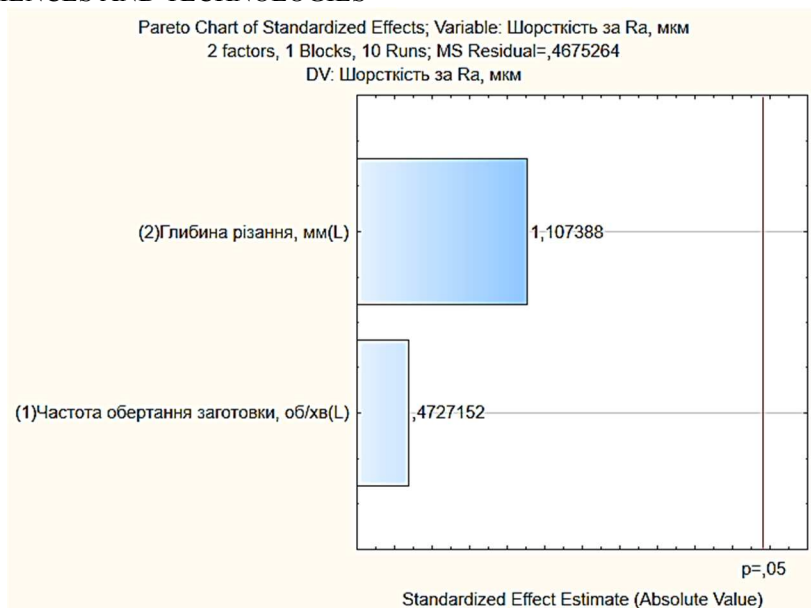
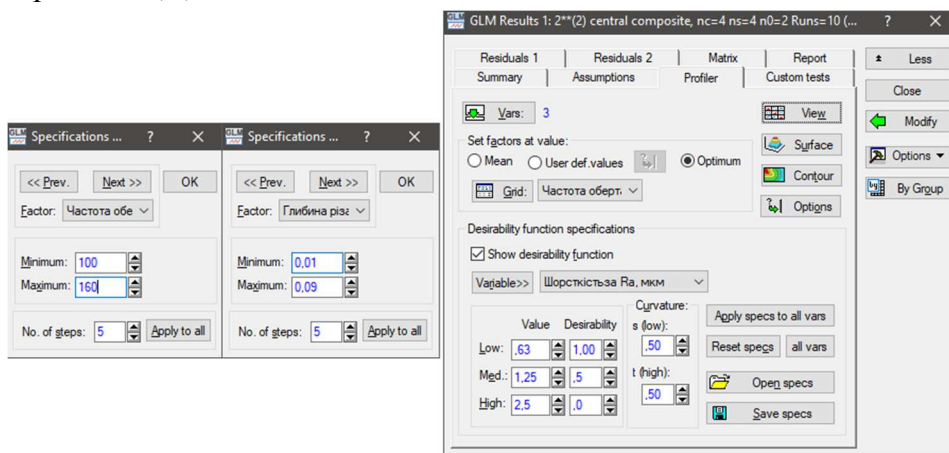


Рис. 9. Діаграма Парето лінійних ефектів

Оптимізаційна задача полягає в тому, щоб знайти рівні частоти обертання заготовки та глибини різання, які дадуть найкращий результат якості поверхні на основі використання функції бажаності.

В основі побудови функції бажаності лежать попередньо отримані результати досліджень, проведені за центральним композиційним планом. Параметри налаштувань мінімальних та максимальних значень факторів та кількість кроків їх розподілу (рис. 10, а) задаються відповідно до даних експериментальних досліджень. Межі досліджуваного параметру (шорсткості за Ra) (рис. 10, б) задаються у трьох категоріях: висока – 1; середня – 0,5; низька – 0.



а

б

Рис. 10. Параметри налаштувань факторів (а) та межі досліджуваного параметра (б)

На рис. 11 зображено оптимальний профіль бажаності. Рисунок складається з двох ліній графіків. Графік у правому верхньому куті відображає функцію бажаності [10]. Інші графіки верхньої лінії відображають зрізи підігнаної функції залежності (шорсткості за Ra) від відповідної залежної змінної при фіксації всіх інших змінних на оптимальних рівнях. Оптимальні рівні незалежних змінних відображені на графіках у нижній частині червоними лініями. У цій же серії графіків зображені зміни функції бажаності при варіюванні відповідних незалежних змінних.

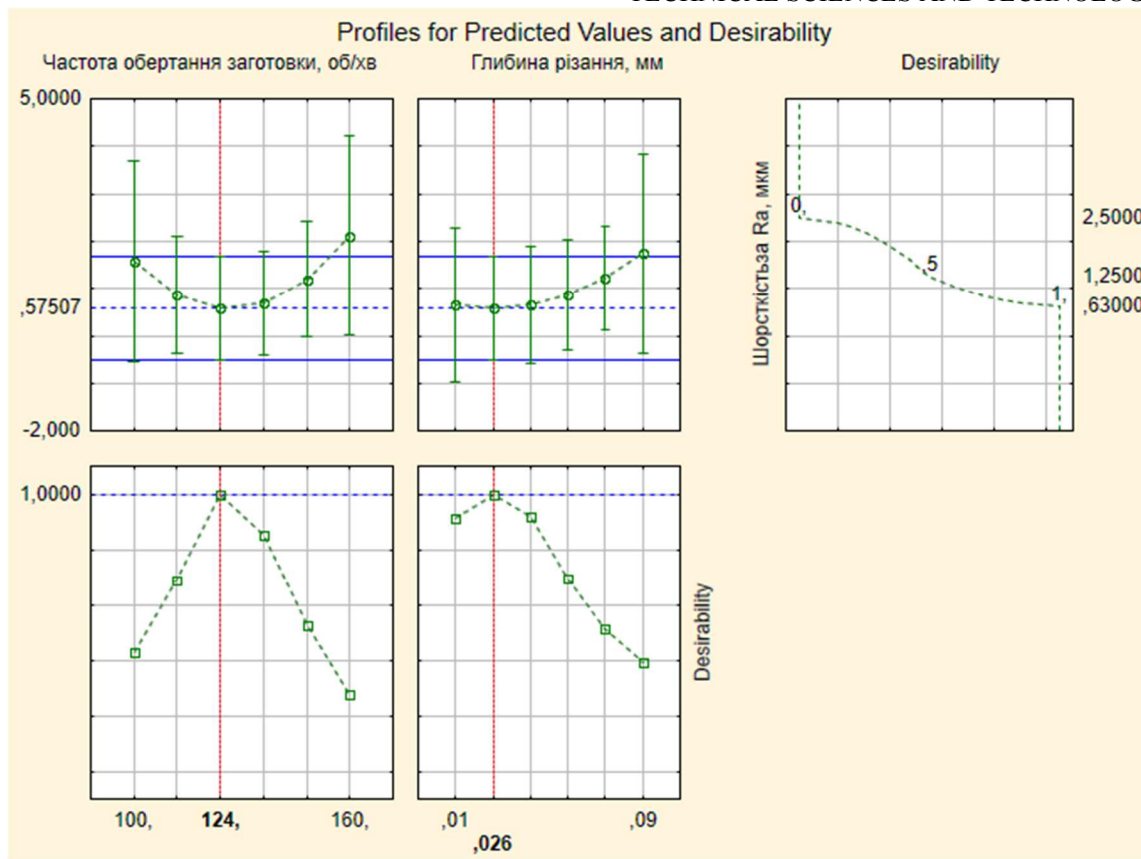


Рис. 11. Оптимальний профіль бажаності

У результаті аналізу отриманого профілю отримуємо значення шорсткості 0,57 мкм, при бажаності 1. Таке значення якості оброблюваної поверхні досягається при частоті обертання заготовки  $n = 124 \text{ хв}^{-1}$  та глибині різання  $t = 0,026 \text{ мм}$ . На практиці показники режимів різання треба округлити до цілих значень:  $n = 125 \text{ хв}^{-1}$ ,  $t = 0,03 \text{ мм}$ .

**Висновки відповідно до статі.** Проведені експериментальні дослідження точності формоутворення поверхонь обертання при круглому шліфуванні на базі семи факторів. За результатами експериментальних досліджень здійснено оцінювання факторів – найбільш впливовим серед оцінюваних є глибина різання. Проведено статистичну обробку, побудовано графіки маргінальних середніх та графіки взаємодій досліджуваних факторів. Проведені експериментальні дослідження та бази двох факторів із використанням центрального композиційного плану. За результатами оцінювання факторів найбільший вплив має квадратичний ефект частоти обертання заготовки. Побудований оптимальний профіль бажаності, у результаті оцінювання якого маємо значення параметра шорсткості 0,57 мкм при  $n = 125 \text{ хв}^{-1}$ ,  $t = 0,03 \text{ мм}$ .

#### Список використаних джерел

1. Вплив абразивного інструменту на шорсткість поверхонь композитних підшипників поліграфічної техніки при тонкому шліфуванні / А. П. Гавриш та ін. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2013. № 5. С. 119–127.
2. Роп'як Л. Я., Остапович В. В. Дослідження впливу режимів алмазного шліфування на шорсткість хромового покриття методом математичного планування експерименту. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. 2016. № 53. С. 130–138.
3. Гавриш А. П., Киричок П. О., Роїк Т. А., Віцюк Ю. Ю. Вплив складу інструмента і режимів тонкого алмазного шліфування на шорсткість поверхонь композитних підшипників ковзання поліграфічних машин. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2013. № 5. С. 80–86.



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

4. Кальченко В., Кальченко В., Єрошенко А., Сіра Н. Теоретичне та експериментальне дослідження процесу зняття припуску, зносу круга, точності формоутворення та теплонапруженості під час шліфування циліндричних та ступінчастих валів зі схрещеними осями деталі та круга. *Технічні науки та технології*. 2016. № 4 (6). С. 35–43.
5. Kalchenko V. V., Yeroshenko A. M., Boiko S. V. Mathematical modeling of abrasive grinding working process. *Науковий вісник НГУ*. 2017. № 6(162). С. 76–82.
6. Портман В. Т., Решетов Д. Н. Точность металлорежущих станков. Москва, 1986. 320 с.
7. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. Москва: Машиностроение, 1974. 320 с.
8. Сіра Н.М. Підвищення ефективності шліфування циліндричних, ступінчастих та криволінійних поверхонь обертання зі схрещеними осями круга та деталі: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / ЧНТУ. Чернігів, 2017. 176 с.
9. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці / Н. С. Равська й ін. Житомир: ЖІТІ, 2000. 332 с.
10. Пен Р. З. Статистические методы моделирования и оптимизации технологических процессов. *Международный журнал экспериментального образования*. 2017. № 2. С. 81–83.

**References**

1. Havrysh, A. P., Shevchuk, A. V., Roik, T. A., Kovalov, V. A., Vitsiuk, Yu. Yu. (2013). Vplyv abrazyvnoho instrumentu na shorstkist poverkhon kompozytnykh pidshypnykiv polihrafichnoi tekhniky pry tonkomu shlifuvanni [Influence of abrasive tool on surface roughness of composite bearings of polygraphic technique at thin grinding]. *Naukovi visti Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut» – Scientific reports of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»*, 5, 119-127 [in Ukrainian].
2. Ropiak, L. Ia., Ostapovych, V. V. (2016). Doslidzennia vplyvu rezhymiv almaznoho shlifuvannia na shorstkist khromovoho pokryttia metodom matematychnoho planuvannia eksperymentu [Investigation of the influence of diamond grinding regimes on the roughness of chromic coating by the method of mathematical planning of the experiment]. *Mizhvuzivskiy zbirnyk «Naukovi notatky» – Intercollegiate collection «Scientific Notes»*, 53, 130-138 [in Ukrainian].
3. Havrysh, A. P., Kyrychok, P. O., Roik, T. A., Vitsiuk, Yu. Yu. (2013). Vplyv skladu instrumenta i rezhymiv tonkoho almaznoho shlifuvannia na shorstkist poverkhon kompozytnykh pidshypnykiv kovzannia polihrafichnykh mashyn [Influence of tool composition and modes of thin diamond grinding on roughness of surfaces of composite bearings of polygraphic machines slipping]. *Naukovi visti Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut» – Scientific reports of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»*, 5, 80-86 [in Ukrainian].
4. Kalchenko, V. I., Kalchenko, V. V., Yeroshenko, A. M., Sira, N. M. (2016). Teoretychne ta eksperymentalne doslidzhennia protsesu zniattia pryusku, znosu kruha, tochnosti formoutvorennia ta teplonapruzenosti pid chas shlifuvannia tsylindrychnykh ta stupinchastykh valiv zi skhreshchenymy osiamy detali ta kruha [Theoretical and experimental investigations process stock removal, wheel wear, forming accuracy and thermal voltage at grinding of cylindrical and stepped shafts with crossed axes of part and wheel]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, 4(6), 35-43 [in Ukrainian].
5. Kalchenko, V. V., Yeroshenko, A. M., Boiko, S. V. (2017). Mathematical modeling of abrasive grinding working process. *Naukovyi visnyk NHU – NSU Scientific Bulletin*, 6(162), 76-82.
6. Portaman, V. T., Reshetov, D. N. (1986). *Tochnost metallovezhushchih stankov [Accuracy of machine tools]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
7. Maslov, E. N. (1974). *Teoriia shlifovaniia materialov [Theory of grinding materials]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
8. Sira, N. M. (2017). *Pidvyshchennia efektyvnosti shlifuvannia tsylindrychnykh, stupinchastykh ta kryvoliniinykh poverkhon obertannia zi skhreshchenymy osiamy kruha ta detail [Increase the efficiency of grinding cylindrical, step and curvilinear surfaces of rotation with crossed axes of a circle and a part]*. (PhD thesis). Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].
9. Ravska, N. S., Rodin, P. R., Nikolaienko, T. P. (2000). *Osnovy formoutvorennia poverkhon pry mekhanichnii obrobtsi [Fundamentals of surface shaping under machining]*. Zhytomyr: ZhITI [in Ukrainian].
10. Pen, R. Z. (2017). Statisticheskie metody modelirovaniia i optimizatcii tekhnologicheskikh protsessov//Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniia [Statistical methods for mode-

ling and optimization of technological processes]. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniia – International Journal of Experimental Education*, 2, 81-83 [in Russian].

UDC 621.923

*Andriy Yeroshenko, Oleksandra Doroshenko*

## FORMING ACCURACY OF THE SURFACE OF ROTATION AT GRINDING USING THE CUTTING FLUID

**Urgency of the research.** *The research is aimed at identifying and identifying the factors that most affect the accuracy of forming the surfaces of the bodies of rotation when grinding is an urgent task in mechanical engineering.*

**Target setting.** *The accuracy of shaping surfaces of the bodies of rotation depends on the accuracy of linear dimensions, the quality of the surface to be treated, the accuracy of the shape and the relative arrangement of the surfaces. These parameters depend on many variables affecting the processing process. With round grinding, high precision can only be achieved with high loss of performance.*

**Actual scientific researches and issues analysis.** *In known studies of the accuracy of the formation of surfaces of bodies of rotation when grinding, factors affecting the quality of the treated surface are considered independently of each other.*

**Uninvestigated parts of general matters defining.** *Research of the round grinding process in order to identify the most influential factors and establish their optimal values.*

**The research objective.** *Identification of the main and secondary factors influencing the formation of surfaces of bodies of rotation during round grinding. Setting the boundary values of the selected factors. Conduct experimental studies to obtain numerical values of accuracy parameters. Conduct statistical analysis of the obtained data and create a mathematical model of the process. Conduct a complete factor experiment to optimize the grinding process.*

**The statement of basic materials.** *The experimental researches of the accuracy of forming of surfaces of bodies of rotation at round grinding on the basis of revealing of the most influential variable factors in the categories: a machine tool and an equipment, a workpiece are made. The statistical estimation of factors according to Plackett-Burman (7/8) is carried out. A dispersion analysis of the experiment was conducted. The dependencies between the factors are revealed (graphs of marginal averages and graphs of interactions of factors are constructed). The most influential factor was found. A complete factor experiment, optimization of the process was conducted, with the aim of establishing optimal indexes of the most influential factors.*

**Conclusions.** *As a result of the conducted studies, the most influential factor in the process of round grinding of surfaces of bodies of rotation was revealed. The optimization problem is solved, the optimal profile of desirability is constructed.*

**Keywords:** *grinding; shaping; cylindrical shaft; roughness; optimization; profile of desirability.*

*Fig.: 11. References: 10.*

**Єрошенко Андрій Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри технологій машинобудування та деревообробки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Yeroshenko Andriy** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Wood technology, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** yeroshenkoam@gmail.com

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1629-9516>

**ResearcherID:** G-6757-2014

**Scopus Author ID:** 57193700687

**Дорошенко Олександра Олександрівна** – магістрант кафедри технологій машинобудування та деревообробки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Doroshenko Oleksandra** – master of mechanical engineering and wood technology department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** doroshenko.cntu@gmail.com

Юрій Фальченко, Лідія Петрушинець, Олег Новомлинець

## ДИФУЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ ІНТЕРМЕТАЛІДУ TiAl З КОНСТРУКЦІЙНИМИ СПЛАВАМИ ЧЕРЕЗ НАНОШАРУВАТІ ФОЛЬГИ

**Актуальність теми дослідження.** З розвитком аерокосмічних технологій і появою нових жароміцних сплавів виникає необхідність в їх зварюванні в однорідному та різнорідному поєднанні. До таких пар можна віднести з'єднання інтерметалідних сплавів TiAl з конструкційними сплавами на основі титану чи нікелю.

**Постановка проблеми.** Дифузійне зварювання є перспективним методом з'єднання сплавів на основі TiAl з жароміцними сплавами. Утворення з'єднання може супроводжуватися формуванням крихких фаз.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для утворення бездефектних з'єднань необхідно застосовувати проміжні прошарки.

**Виділення не досліджених частин загальної проблеми.** Для зменшення хімічної неоднорідності у стику перспективно є застосування наношаруватих фольг.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження особливостей формування з'єднань алюмініду титану зі сплавами на нікелевій і титановій основі при застосуванні наношаруватих фольг.

**Виклад основного матеріалу.** Досліджено вплив наношаруватих фольг на структуру й мікротвердість зварних з'єднань, які формуються у процесі дифузійного зварювання.

**Висновки відповідно до статті.** При дифузійному зварюванні сплавів TiAl з VT8 зона з'єднання характеризується значним концентраційним градієнтом у розподілі Ti і Al між TiAl і VT8. При застосуванні наношаруватих фольг Al/Ti хімічний склад у зоні з'єднання вирівнюється та утворюються загальні зерна на колишній границі контакту.

При дифузійному зварюванні сплавів TiAl з EI437B без прошарків у зоні з'єднання з боку нікелевого сплаву спостерігається істотне підвищення мікротвердості до 14,01 ГПа, що може бути результатом формування крихких інтерметалідних фаз на основі системи Ni-Al-Ti. Застосування наношаруватої фольги Ni-Al/Ni-Ni забезпечує утворення бездефектних з'єднань, сприяє формуванню дифузійної зони з монотонним характером розподілу легуючих елементів і зниженнями значеннями мікротвердості.

**Ключові слова:** дифузійне зварювання у вакуумі; мікроструктура; TiAl; VT8; EI437B; наношаруваті фольги.

Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 22.

**Актуальність теми дослідження.** Алюмініди титану є перспективними матеріалами для виготовлення деталей авіаційних двигунів, стільникових конструкцій та обшивки надзвукових літальних апаратів, деталі сопла, лопатки компресора, елементи конструкції камери згоряння, поршні автомобільних двигунів тощо [1; 2].

Із розвитком аерокосмічних технологій і появою нових конструкційних жароміцних сплавів виникає необхідність в їх зварюванні як в однорідному, так і в різнорідному поєднанні. До таких пар можна віднести з'єднання інтерметалідних сплавів TiAl з конструкційними сплавами на основі титану чи нікелю.

**Постановка проблеми.** Наявні технології зварювання плавленням даних матеріалів не дозволяють отримати високоякісні зварні з'єднання через структурні перетворення у зоні термічного впливу, які призводять до збільшення концентрації напружень і, як наслідок, до розтріскування матеріалу [3; 4]. Дифузійне зварювання (ДЗ) є найбільш перспективним методом з'єднання сплавів на основі TiAl з жароміцними сплавами як на основі титану [5–10], так і нікелю [11–14]. Однак при цьому методі зварювання утворення з'єднання супроводжується формуванням дифузійної зони зі складним фазовим складом, що включає крихкі сполуки, які можуть негативно вплинути на механічні властивості. Додаткові труднощі створюють специфічні як для сплавів TiAl, так і для Ni жароміцних сплавів властивості, а саме їх підвищена міцність при температурах зварювання і низька пластичність.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При з'єднанні  $\gamma$ -TiAl зі сплавом титану для активації контактних поверхонь більш твердого інтерметалідного сплаву зазвичай застосовуються високі значення зварювальних тисків (аж до 200 МПа) поряд з витримкою протягом 1–2 годин [5–7], що значною мірою перевищує термо-деформаційні параметри зварювання, рекомендовані для сплавів титану. При ДЗ різнорідних матеріалів для активації поверхонь металів, що зварюються, та інтенсифікації дифузійних процесів здебільшого застосовують проміжні прошарки [15]. Однак, застосування проміжних

прошарків на основі монолітних матеріалів, отриманих прокаткою, що мають товщину ~ 50–300 мкм, не зовсім доцільно, оскільки створюються дифузійні зони з хімічним складом і механічними властивостями, які різко відрізняються від властивостей матеріалів, що зварюються [16]. При використанні цього підходу інтенсифікації дифузійних процесів у зоні з'єднання може сприяти попереднє наводнення проміжних прошарків. Для запобігання виділенню водню на стадії нагрівання, зварювання необхідно проводити із застосуванням високоінтенсивних джерел нагрівання, які б забезпечили швидкість зростання температури ~ 1200 °C/хв [11].

Для активізації процесу утворення з'єднання перспективним є застосування покриттів або фольги з дрібнозернистою структурою, які дозволяють локалізувати пластичну деформацію безпосередньо у стику. Наприклад, у роботі [12] для цього перед зварюванням TiAl з нікелевим сплавом проводили лазерну модифікацію, яка полягала в оплавленні поверхневого шару алюмініду титану, а також нанесенні на поверхню сплаву Ni покриття Ti-46,5Al. Металографічний аналіз з'єднань дефектів не виявив, однак наявність крихких фаз у зоні сплавлення нікелевого сплаву з покриттям не дозволила отримати високоміцні з'єднання. Застосування фольги зі сплаву Ti в аморфному стані при з'єднанні TiAl з Ti-6Al-4V розглянуто авторами [9]. Були отримані з'єднання з міцністю на рівні 88 % від значень основного матеріалу, проте інтенсивний потік титану в TiAl, який не скомпенсований дифузією алюмінію в зворотному напрямку, призводить до утворення значної пористості.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Використання при зварюванні прошарків на основі монолітних матеріалів хоча і сприяє формуванню зварного з'єднання, але створює в зоні з'єднання ділянки із суттєвою хімічною неоднорідністю.

Для зменшення хімічної неоднорідності у стику перспективним є застосування тонкої наночастинкової фольги, отриманої методом електронно-променевого випаровування і конденсації у вакуумі [17]. Використання градієнтних прошарків неоднорідних за хімічним складом, дозволяє змінювати умови отримання зварного з'єднання та більш ефективно впливати на дифузію елементів і формування зони з'єднання, а саме її товщину і склад.

**Мета статті.** Метою цієї роботи є дослідження особливостей формування з'єднань інтерметалідного сплаву TiAl зі сплавами на нікелевій і титановій основі при застосуванні наночастинкової фольги товщиною 20...30 мкм, отриманої методом електронно-променевого випаровування і осадження у вакуумі з парової фази.

**Виклад основного матеріалу.** Дифузійне зварювання у вакуумі зразків проводили в установці У-394М. Як нагрівач використовували електронно-променеву гармату кільцевої форми. Температуру зварювання контролювали за допомогою хромель-алюмелевої термопари. Вакуум в робочій камері підтримували на рівні  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па. Підготовка зразків до зварювання полягала в розрізанні матеріалу на електроерозійному верстаті, шліфуванні контактних поверхонь і знежиренні.

Об'єктом досліджень були сплави: TiAl, VT8 і EI437Б, хімічний склад яких наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сплавів

Сплав	Елемент %, ваг.							
	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo
TiAl	28,57–30,91	–	61,27–62,64	2,16–3,35	–	–	3,56–7,87	–
EI437Б	0,60–0,85	0,70–0,58	2,57–2,53	21,10–20,57	0,72–0,77	74,31–74,71	–	–
VT8	5,95–7,76	0,1	87,69–89,73	–	–	–	–	4,27–4,71

Сплав алюмініду титану був отриманий методом електронно-променевого переплаву з наступним ізостатичним пресуванням і прокатуванням, після чого виконували го-

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

могенізуюче відпалювання. Структура TiAl ламельна та являє собою пластини  $\gamma$ -фази, по межах яких розташовані тонкі прошарки  $\alpha_2$ -фази.

Для сплаву BT8 характерна змішана структура, яка складається з твердих розчинів на основі  $\alpha$ - і  $\beta$ -модифікацій титану. Легуючі елементи сплаву BT8 підвищують міцність титану і знижують його пластичність [18].

Сплав EI437B належить до групи матеріалів з особливо низькими технологічними властивостями за оброблюваністю, які визначаються високою жароміцністю, низькою теплопровідністю, високою схильністю до механічного зміцнення (наклепу) в процесі механічної обробки [19]. Сплав є важкозварюваним дисперснозміцненим суперсплавом, що містить значну кількість хрому й титану, схильний до утворення тріщин у зоні термічного впливу [20].

Як проміжні прошарки застосовували наночаруваті фольги на основі систем Al-Ti (Ti-38Al, % ваг.) і Al-Ni (Ni-31,6Al, % ваг.) товщиною 20...30 мкм. Для зменшення дифузійної рухливості хрому і заліза з боку нікелевого сплаву в напрямку до TiAl прошарки системи Al-Ni мали покриття з нікелю товщиною 2,5 мкм. Наночаруваті фольги отримували методом електронно-променевого випаровування і конденсації у вакуумі.

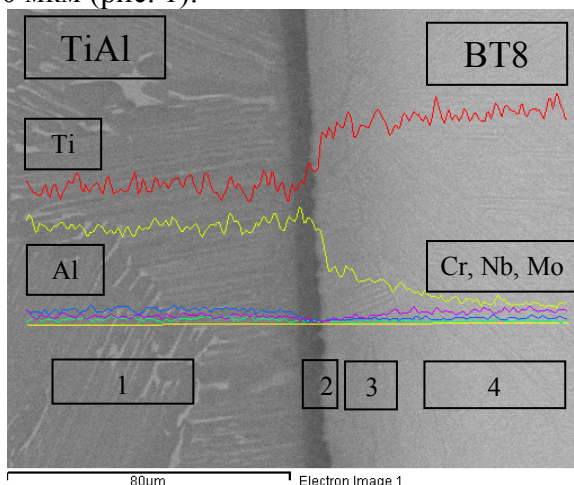
Аналіз мікроструктури зварних з'єднань проводили за допомогою електронного мікроскопа CAMSCAN 4, який оснащений системою енергодисперсійного аналізу EDX INCA 200 для визначення хімічного складу. Для цього за стандартною методикою з використанням шліфувально-полірувального устаткування фірми Struers були виготовлені шліфи поперечного перерізу зварних з'єднань.

Оцінку мікротвердості зварних з'єднань проводили на установці «Мікрон-гамма» методом автоматичного індентування з використанням алмазної пірамідки Берковича ( $\alpha = 65^\circ$ ) при навантаженні 0,4 Н [21].

**Зварювання інтерметалідного сплаву TiAl з титановим сплавом BT8.**

Зварювання проводили при температурі  $T_{зв} = 1200$  °C, тиску  $P_{зв} = 20$  МПа, тривалості  $t_{зв} = 20$  хв. Як проміжний прошарок використовували наночаруваті фольги Al/Ti.

При зварюванні без прошарку було отримано бездефектне з'єднання з дифузійною зоною завтовшки 7...10 мкм (рис. 1).

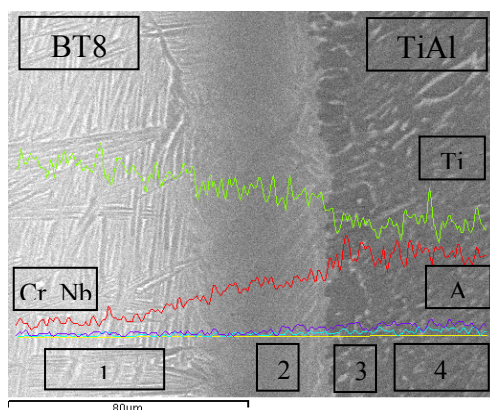


Номер вимірювання	Елемент %, ваг.				
	Al	Ti	Cr	Nb	Mo
Spectrum 1	28,57	61,27	2,16	7,87	0,13
Spectrum 2	31,88	65,90	0,85	0,98	0,39
Spectrum 3	15,00	82,93	0,17	–	1,90
Spectrum 4	6,00	89,73	–	–	4,27

Рис. 1. Мікроструктура й локальний хімічний аналіз зони з'єднання TiAl–BT8

Мікротвердість зони з'єднання знаходиться на рівні інтерметалідного сплаву і становить 4,2 ГПа. Характер розподілу елементів поблизу границі розділу вказує на дифузію атомів Al з TiAl в сплав титану й атомів Ti у протилежному напрямку. Як показує характер розподілу елементів, зона з'єднання характеризується значним концентраційним градієнтом у розподілі Ti і Al між TiAl і BT8.

Для усунення хімічної неоднорідності при зварюванні TiAl зі сплавом титану BT8 застосовували нанощаруваті прошарки системи Al-Ti. Як показали металографічні дослідження, у процесі зварювання формується дифузійна зона завтовшки 45...50 мкм, у стику дефекти відсутні (рис. 2). На колишній границі контакту фольги з TiAl спостерігається утворення дрібних рекристалізованих зерен. З боку сплаву BT8 в напрямку прошарку відбувається проростання зерен з утворенням характерних для сплаву BT8 структур кошикового плетіння, що складаються з  $\alpha$  і  $\beta$  фаз. Розподіл Ti і Al має плавний характер без різких перегинів концентрації. З боку сплаву TiAl у прошарок відбувається дифузія хрому і ніобію, де їх вміст досягає відповідно 0,80 і 1,58 % ваг.



Номер вимірювання	Елемент %, мас.				
	Al	Ti	Cr	Nb	Mo
Spectrum 1	5,95	89,34	–	–	4,71
Spectrum 2	20,81	76,82	0,80	1,58	–
Spectrum 3	29,90	60,87	2,38	6,84	–
Spectrum 4	29,35	61,50	2,74	6,40	–

Рис. 2. Мікроструктура й локальний хімічний аналіз зони з'єднання TiAl–Al/Ti–BT8

Такий розподіл елементів свідчить про те, що в зоні з'єднання відсутні небезпечні ділянки з високим рівнем залишкових напружень, які з'являються при охолодженні зварних з'єднань. У приконтактній зоні прошарок/алюмінід титану (~7 мкм від прошарку) спостерігається формування дрібних рекристалізованих зерен. Мікротвердість зони з'єднання близька до значень сплаву TiAl і становить 3,8 ГПа.

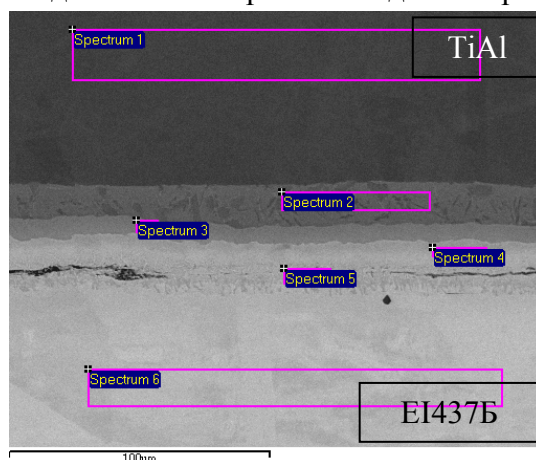
З аналізу кривих розподілу елементів у з'єднаннях отриманих без застосування проміжних прошарків і з застосуванням нанощаруватих фольг (рис. 1, 2) видно, що у випадку зварювання інтерметалідного сплаву TiAl безпосередньо зі сплавом BT8 по лінії з'єднання спостерігається різкий перепад у вмісті алюмінію й титану, що може негативно вплинути на працездатність зварних з'єднань. Застосування нанощаруватого прошарку системи Al-Ti забезпечує плавний характер зміни концентрації алюмінію і титану в зоні з'єднання.

#### **Зварювання інтерметалідного сплаву TiAl з жароміцних нікелевим сплавом.**

Зварювання інтерметалідного сплаву TiAl зі сплавом EI437Б проводили при температурі  $T_{зв} = 1050$  °С, тиску  $P_{зв} = 20$  МПа, тривалості  $t_{зв} = 20$  хв. Як проміжний прошарок використовували нанощаруваті фольги Ni-Al/Ni-Ni.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

При дифузійному зварюванні алюмініду титану з жароміцним сплавом EI437Б без проміжних прошарків утворюється зона з'єднання товщиною  $\sim 35$  мкм, в якій можна виділити 4 шари. У зоні з'єднання спостерігаються ділянки розтріскування (рис. 3).



Номер вимірювання	Елемент %, мас.						
	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb
Spectrum 1	30,91	–	62,19	3,19	–	–	3,71
Spectrum 2	23,11	–	65,11	4,27	–	3,81	3,69
Spectrum 3	24,57	–	39,97	4,54	0,55	27,23	3,13
Spectrum 4	12,10	–	18,06	4,87	–	64,97	–
Spectrum 5	9,17	–	9,37	22,85	–	58,61	–
Spectrum 6	0,68	0,39	2,63	20,61	0,75	74,95	–

Рис. 3. Мікроструктура й локальний хімічний аналіз зони з'єднання TiAl–EI437Б

На основі результатів мікрорентген-спектрального аналізу отриманих з'єднань можна зробити висновок, що за хімічним складом, перший шар складається переважно з  $Ti_3Al$ , а другий – із суміші TiAl з твердим розчином хрому в нікелі. Третій шар відповідно до [22] переважно складається з  $Ni_2AlTi$ , четвертий – із твердого розчину хрому в нікелі з домішками алюмінію й титану (рис. 3).

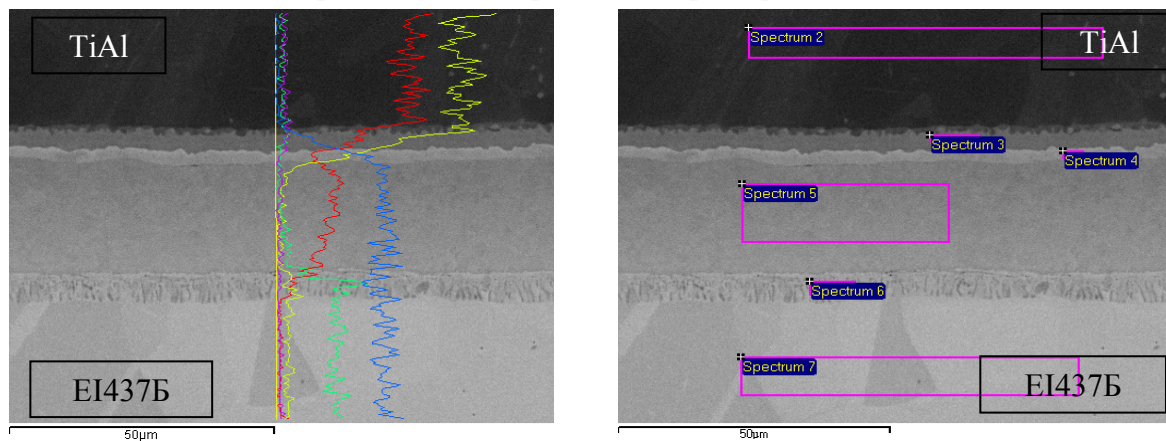
При цьому в зоні з'єднання з боку нікелевого сплаву спостерігається істотне підвищення мікротвердості з 4,10 ГПа (основний метал) до 14,01 ГПа, що може бути результатом формування крихких інтерметалідних фаз на основі системи Ni-Al-Ti і підвищенням вмісту хрому в приповерхневих шарах уздовж стику.

Надалі при зварюванні застосовували нанощаруваті фольги Ni-Al/Ni-Ni. Відповідно до даних роботи [14] нікель має хорошу розчинність у титані, а його застосування як елемента фольги має сприяти, з одного боку, зниженню схильності фольги до окислення, а з іншого – шар нікелю виступає в ролі бар'єра для дифузії хрому, титану і заліза з нікелевого сплаву в напрямку до інтерметалідного сплаву.

Були отримані бездефектні з'єднання, пори і тріщини у стику відсутні (рис. 4). Використання при зварюванні нанощаруватої фольги забезпечує формування з'єднання і сприяє активному протіканню дифузійних процесів між інтерметалідним сплавом і жароміцним сплавом на нікелевій основі. Так, взаємна дифузія компонентів сплаву і фольги призводить до формування у стику дифузійної зони шириною  $\sim 45$  мкм, в якій можна виділити 4 шари.

У стику сформувалися багатофазні шари з різним співвідношенням фазових складових, що утворюються за рахунок реакційної дифузії компонентів. Аналіз хімічного складу зони з'єднання дозволяє зробити висновок, що з боку алюмініду титану формуються шари  $Ti_3Al$  і TiAl. Велика центральна зона являє собою суміш  $Ni_3Al$  з твердим

розчином хрому в нікелі. Біля сплаву EI437Б формується прошарок твердого розчину хрому в нікелі з домішками алюмінію й титану. Наявність шарів нікелю з обох сторін фольги системи Al-Ni сприяє зниженню небажаної дифузії легуючих елементів зі сплавів, що зварюються, попереджаючи утворення інтерметалідних фаз із високою мікротвердістю, що дозволило знизити мікротвердість більше ніж удвічі (6,81 ГПа) в порівнянні зі з'єднаннями, отриманими без проміжних прошарків.



Номер вимірювання	Елемент %, мас.					
	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb
Spectrum2	30,46	62,64	3,35	–	–	3,56
Spectrum3	24,94	40,39	3,52	–	28,05	3,11
Spectrum4	13,77	24,07	0,40	–	60,67	1,10
Spectrum5	21,78	0,75	1,06	–	76,41	–
Spectrum 6	6,20	3,01	24,56	–	66,23	–
Spectrum 7	0,76	2,59	20,83	0,74	75,07	–

Рис. 4. Мікроструктура й локальний хімічний аналіз зони з'єднання TiAl–Ni–Al/Ni–Ni–EI437Б

На рис. 5 наведені значення мікротвердості в зоні з'єднання при зварюванні через проміжні прошарку і без них. При зварюванні TiAl з жароміцним сплавом на основі нікелю без проміжних прошарків у стику формуються інтерметалідне з'єднання з максимальними значеннями мікротвердості на рівні 14,01 ГПа. Застосування при дифузійному зварюванні наношаруватої фольги Ni-Ni/Al-Ni дозволяє знизити мікротвердість більше ніж удвічі (до 6,49...6,81 ГПа).

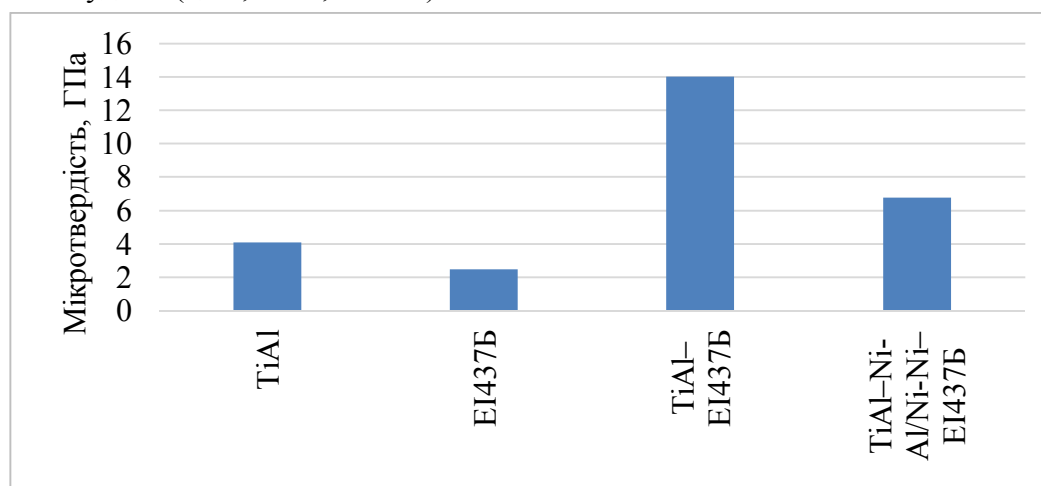


Рис. 5. Значення мікротвердості основного металу і зони з'єднання



**Висновки відповідно до статті.** При дифузійному зварюванні у вакуумі інтерметалідного сплаву TiAl зі сплавом титану ВТ8 зона з'єднання характеризується значним концентраційним градієнтом у розподілі Ti і Al між TiAl і ВТ8.

Застосування нанощаруватих прошарків системи Al-Ti при зварюванні у вакуумі TiAl з ВТ8 сприяє вирівнюванню хімічного складу в зоні з'єднання й утворенню загальних зерен на колишній границі контакту.

При дифузійному зварюванні TiAl з жароміцним сплавом EI437B без проміжних прошарків у зоні з'єднання з боку нікелевого сплаву спостерігається істотне підвищення мікротвердості з 4,10 ГПа до 14,01 ГПа, що може бути результатом формування крихких інтерметалідних фаз на основі системи Ni-Al-Ti і підвищення вмісту хрому у приповерхневих шарах уздовж стику.

Застосування при дифузійному зварюванні TiAl з EI437B нанощаруватої фольги Ni-Al/Ni-Ni забезпечує утворення бездефектних з'єднань, сприяє формуванню в стику дифузійної зони з монотонним характером розподілу легуючих елементів і зниженими значеннями мікротвердості.

### Список використаних джерел

1. Банних О. А., Поварова К. Б., Браславская Г. С., Масленков С. Б., Богатова М. Н. Механические свойства литых сплавов  $\gamma$ -TiAl. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1996. № 1. С. 11–14.
2. Польшин И. С., Колачев Б. А., Ильин А. А. Алюминиды титана и сплавы на их основе. *Технология легких сплавов*. 1997. № 3. С. 32–39.
3. Patterson R. A., Martin P. L., Damkroger B. K., Christodoulou L. Titanium aluminide: electron beam weldability. *Welding research supplement*. 1990. № 1. P. 39-s–44-s.
4. Замков В. Н., Великоиваненко Е. А., Сабокаръ В. К., Вржижевский Э. Л. Выбор температуры предварительного подогрева  $\gamma$ -алюминиды титана при ЭЛС. *Автоматическая сварка*. 2001. № 11. С. 20–23.
5. Wang Xiu-feng, Ma Mo, Liu Xue-bin, Wu Xue-qing, Tan Chao-gui, Shi Rong-kai, Lin Jiang-guo. Diffusion bonding of  $\gamma$ -TiAl alloy to Ti-6Al-4V alloy under hot pressure. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2006. Vol. 16. P. 1059–1063.
6. Holmquist M., Recina V., Pettersson B. Tensile and creep properties of diffusion bonded titanium alloy IMI 834 to gamma titanium aluminide IHI Alloy 01A. *Acta Materialia*. 1999. Vol. 47, Is. 6. P. 1791–1799.
7. Wang X. F., Luo Z. C., Liu X. B., Lin J. G. Probing into diffusion bonding of laser surface treated  $\gamma$ -TiAl alloy/Ti-6Al-4V alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2008. Vol. 13, Is. 5. P. 452–455.
8. Wang X. R., Yang Y. Q., Luo X., Zhang W., Zhao G. M., Huang B. An investigation of Ti-43Al-9V/Ti-6Al-4V interface by diffusion bonding. *Intermetallics*. 2013. Vol. 36. P. 127–132.
9. Xue Z., Yang Q., Gu L., Hao X., Ren Y., Geng Y. Diffusion bonding of TiAl based alloy to Ti-6Al-4V alloy using amorphous interlayer. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2015. Vol. 46, Is. 1. P. 40–46.
10. Simoes S., Viana F., Ramos A.S., Vieira M. T., Vieira M. F. Diffusion Bonding of TiAl to Ti6Al4V Using Nanolayers. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018. Vol. 27, Is. 10. P. 5064–5068.
11. Peng He, Jun Wanga, Tiesong Lin, Haixin Li. Effect of hydrogen on diffusion bonding of TiAl based intermetallics and Ni-based superalloy using hydrogenated Ti6Al4V interlayer. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39. P. 1882–1887.
12. Li Z. F., Wu G. Q., Huang Z., Ruan Z. J. Diffusion bonding of laser surface modified TiAl alloy/Ni alloy. *Materials Letters*. 2004. Vol. 58. P. 3470–3473.
13. Ramos A. S., Vieira M. T., Simoes S., Viana F., Vieira M. F. Joining of Superalloys to Intermetallics Using Nanolayers. *Advanced Materials Research*. 2009. Vol. 59. P. 225–229.
14. Ramos A. S., Vieira M. T., Simoes S., Viana F., Vieira M. F. Reaction-Assisted Diffusion Bonding of Advanced Materials. *Defect and Diffusion Forum*. 2010. Vols. 297–301. P. 972–977.

15. Люшинский А. В. Критерии выбора промежуточных слоев при диффузионной сварке в вакууме разнородных материалов. *Сварочное производство*. 2001. № 5. С. 40–43.
16. Юштин А. Н., Замков В. Н., Сабокарь В. К., Чертко П. Н., Петриченко И. К. Сварка давлением интерметаллидного сплава  $\gamma$ -TiAl. *Автоматическая сварка*. 2001. № 1. С. 33–37.
17. Ustinov A. I., Falchenko Yu. V., Ishchenko A. Ya., Kharchenko G. K., Melnichenko T. V., Muraveynik A. N. Diffusion welding of  $\gamma$ -TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*. Vol. 16, Is. 8. 2008. P. 1043–1045.
18. Чечулин Б. Б., Разуваева И. Н., Гольдфайн В. Н. Титановые сплавы в машиностроении. Ленинград: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1977. 248 с.
19. Аникеев А. И., Верещака А. А., Верещака А. С., Бубликов Ю. И. Ультрадисперсные твердые сплавы как инструментальный материал для фрезерования труднообрабатываемых материалов. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион*. 2015. № 3. С. 152–162.
20. Гуляев А. П. Металловедение: учебник для вузов. 6-е изд. перераб. и доп. Москва: Металлургия, 1986. 544 с.
21. Фирстов С. А., Горбань В. Ф., Печковский Э. П., Мамека Н. А. Уравнение индентирования. *Доповіді Національної академії наук України*. 2007. № 12. С. 100–106.
22. Qi Xiansheng, XueXiangyi, Tang Bin, Kou Hongchao, Hu Rui, Li Jinshan. Phase Evolution of Diffusion Bonding Interface between High Nb Containing TiAl Alloy and Ni-Cr-W Superalloy. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2015. Vol. 44, Is. 7. P. 1575–1580.

### References

1. Bannykh, O. A., Povarova, K. B., Braslavskaja, H. S., Maslenkov, S. B., Bohatova, M. N. (1996). Mekhanicheskie svoystva litykh splavov  $\gamma$ -TiAl [Mechanical properties of cast alloys  $\gamma$ -TiAl]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov – Metallurgy and heat treatment of metals*, 1, 11–14 [in Russian].
2. Polkin, I. S., Kolachev, B. A., Ilin, A. A. (1997). Aluminidy titana i splavy na ikh osnove [Aluminides of titanium and alloys based on them]. *Tekhnologija legkikh splavov – Technology of light alloys*, 3, 32–39 [in Russian].
3. Patterson R. A., Martin P. L., Damkroger B. K., Christodoulou L. (1990). Titanium aluminide: electron beam weldability. *Welding research supplement*, 1, 39-s–44-s.
4. Zamkov, V. N., Velikoivanenko, E. A., Sabokar, V. K., Vrzhyzhevskiy, E. L. (2001). Vybory temperatury predvaritelnogo podogreva -aluminida titana pri ELS [Choice of temperature for preheating  $\gamma$ -titanium aluminide in EBW]. *Avtomaticheskaja svarka – Automatic welding*, 11, 20–23 [in Russian].
5. Wang Xiu-feng, Ma Mo, Liu Xue-bin, Wu Xue-qing, Tan Chao-gui, Shi Rong-kai, Lin Jiang-guo (2006). Diffusion bonding of  $\gamma$ -TiAl alloy to Ti-6Al-4V alloy under hot pressure. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16, 1059–1063.
6. Holmquist, M., Recina, V., Pettersson, B. (1999). Tensile and creep properties of diffusion bonded titanium alloy IMI 834 to gamma titanium aluminide IHI Alloy 01A. *Acta Materialia*, 47 (6), 1791–1799.
7. Wang, X. F., Luo, Z. C., Liu, X. B., Lin, J. G. (2008). Probing into diffusion bonding of laser surface treated  $\gamma$ -TiAl alloy/Ti-6Al-4V alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*, 13 (5), 452–455.
8. Wang, X. R., Yang, Y. Q., Luo, X., Zhang, W., Zhao, G. M., Huang, B. (2013). An investigation of Ti-43Al-9V/Ti-6Al-4V interface by diffusion bonding. *Intermetallics*, 36, 127–132.
9. Xue, Z., Yang, Q., Gu, L., Hao, X., Ren, Y., Geng, Y. (2015). Diffusion bonding of TiAl based alloy to Ti-6Al-4V alloy using amorphous interlayer. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 46 (1), 40–46.
10. Simoes, S., Viana, F., Ramos, A. S., Vieira, M. T., Vieira, M. F. (2018). Diffusion Bonding of TiAl to Ti6Al4V Using Nanolayers. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27 (10), 5064–5068.
11. Peng, He, Jun, Wanga, Tiesong, Lin, Haixin, Li (2014). Effect of hydrogen on diffusion bonding of TiAl based intermetallics and Ni-based superalloy using hydrogenated Ti6Al4V interlayer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 1882–1887.
12. Li, Z. F., Wu, G. Q., Huang, Z., Ruan, Z. J. (2004). Diffusion bonding of laser surface modified TiAl alloy/Ni alloy. *Materials Letters*, 58, 3470–3473.
13. Ramos, A. S., Vieira, M. T., Simoes, S., Viana, F., Vieira, M. F. (2009). Joining of Superalloys to Intermetallics Using Nanolayers. *Advanced Materials Research*, 59, 225–229.
14. Ramos, A. S., Vieira, M. T., Simoes, S., Viana, F., Vieira, M. F. (2010). Reaction-Assisted Diffusion Bonding of Advanced Materials. *Defect and Diffusion Forum*, 297–301, 972–977.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

15. Liushynskiy, A. V. (2001). Kriterii vybora promezhutochnykh sloev pri diffuzionnoi svarke v vakuume raznorodnykh materialov [Criteria for choosing intermediate layers in diffusion welding in vacuum of dissimilar materials]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding production*, 5, 40–43 [in Russian].
16. Yushtyn, A. N., Zamkov, V. N., Sabokar, V. K., Chvertko, P. N., Petrychenko, I. K. (2001). Svarka davleniem intermetallidogo splava  $\gamma$ -TiAl [Pressure welding of the intermetallic alloy  $\gamma$ -TiAl]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 1, 33–37 [in Russian].
17. Ustinov, A. I., Falchenko, Yu. V., Ishchenko, A. Ya., Kharchenko, G. K., Melnichenko, T. V., Muraveynik, A. N. (2008). Diffusion welding of  $\gamma$ -TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*, 16 (8), 1043–1045.
18. Chechulin, B. B., Razuvaieva, I. N., Goldfein, V. N. (1977). *Titanovye splavy v mashinostroenii [Titanium alloys in mechanical engineering]*. Leningrad: Mashinostroenie [in Russian].
19. Anikeiev, A. I., Vereshchaka, A. C., Bublikov, Yu. I. (2015). Ultradispersnye tverдые splavy kak instrumentalnyi material dlia frezerovaniia trudnoobrabatyvaemykh materialov [Ultrafine carbides as a tool material for milling hard materials]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region – News of higher educational institutions. Volga region*, 3, 152–162 [in Russian].
20. Huljaiev, A. P. (1986). *Metallovedenie [Metal science]*. (6th ed., revised and sup.). Moscow: Metallurgy [in Russian].
21. Firstov, S. A., Horban, V. F., Pechkovskiy, E. P., Mameka, N. A. (2007). Uravnenie indentirovaniia [Indentation equation]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy – Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 12, 100–106 [in Russian].
22. Qi Xiansheng, XueXiangyi, Tang Bin, Kou Hongchao, Hu Rui, Li Jinshan (2015). Phase Evolution of Diffusion Bonding Interface between High Nb Containing TiAl Alloy and Ni-Cr-W Superalloy. *Rare Metal Materials and Engineering*, 44 (7), 1575–1580.

UDC 621.791

Yurii Falchenko, Lidiia Petrushynets, Oleh Novomlynets

**DIFFUSION WELDING OF TiAl INTERMETALLIC WITH STRUCTURAL ALLOYS THROUGH NANOLAYERED FOILS**

**Relevance of the research topic.** With the development of aerospace technologies and the emergence of new heat-resistant alloys, there is a need for their welding in a homogeneous and heterogeneous combination. These pairs include the coupling of intermetallic TiAl alloys with titanium or nickel structural alloys.

**Formulation of the problem.** Diffusion welding is a promising method of joining TiAl-based alloys with heat-resistant alloys. The formation of a joint may be accompanied by the formation of fragile phases.

**Analysis of recent research and publications.** For formation of defect-free joints it is necessary to use intermediate layers.

**Highlighting unexplored parts of a common problem.** To reduce chemical heterogeneity in the joint it is necessary to use nanolayer foils.

**Setting objectives.** The aim of this work is to investigate the peculiarities of forming joints of titanium aluminide with nickel and titanium alloys when using nanolayered foils.

**The main material.** The effect of nanolayered foils on the structure and microhardness of welded joints formed during diffusion welding is investigated.

**Conclusions of the article.** In the diffusion welding of TiAl alloys with VT8, the joint zone is characterized by a significant concentration gradient in the distribution of Ti and Al between TiAl and VT8. When applying Al/Ti nanolayered foils, the chemical composition in the joint area is aligned and the total grains are formed at the former contact boundary.

During the diffusion welding of TiAl alloys with EI437B without layers in the joint zone from the side of the Nickel alloy there is a significant increase in microhardness up to 14.01 GPa, which can be the result of the formation of fragile intermetallic phases on the basis of Ni-Al-Ti. The application of Ni-Al/Ni-Ni nanolayered foil provides the formation of defect-free joints, contributes to the formation of a diffusion zone with a monotonous nature of the distribution of alloying elements and reduced values of microhardness.

**Keywords:** vacuum diffusion welding; microstructure; TiAl; VT8; EI437B; nanolayered foils.

Fig.: 5. Table: 1. References: 22.

**Фальченко Юрій В'ячеславович** – доктор технічних наук, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (вул. Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна).

**Falchenko Yurii** – Doctor of Technical Sciences, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine (11 Malevich Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** falchenko@paton.kiev.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-3028-2964>

**Scopus Author ID:** 7801687476

**Петрушинець Лідія Вячеславівна** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (вул. Малевича, 11, м. Київ, 03680, Україна).

**Petrushynets Lidiia** – PhD in Technical Sciences, Senior staff scientist, Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine (11 Malevich Str., 03680 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** petrushynets@paton.kiev.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7946-3056>

**Scopus Author ID:** 55521777800

**Новомлинець Олег Олександрович** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Novomlynets Oleh** – Doctor in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Welding and Automated Engineering Design of Building Constructions, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** oon1@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0774-434X>

**Scopus Author ID:** 6507741249

Олег Шаповалов, Денис Колесник, Олег Пилипенко

## ЗАСТОСОВУВАНІСТЬ І ЗАЛЕЖНІСТЬ ПАРАМЕТРІВ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ АВІАЦІЙНИХ РЕДУКТОРІВ ВІД ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

**Актуальність теми дослідження.** Проблема надійності роботи зубчастих передач пов'язана з технологією їх виготовлення. Вирішення пов'язаних з цією проблемою завдань засноване на ретельному вивченні й використанні взаємозв'язку конструкторських і технологічних чинників з експлуатаційними показниками надійності зубчастих передач. Особлива увага при цьому приділяється управлінню технологічними процесами виготовлення зубчастих коліс, наданню робочим поверхням зубців необхідних фізико-механічних властивостей і забезпеченню заданих показників точності спряження.

**Постановка проблеми.** Виявлення можливості збільшення ресурсів зубчастих передач, зокрема головного, проміжного та хвостового редукторів вертольотів Мі-8 та їх модифікацій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що основними напрямками у виробництві зубчастих передач є підвищення силової напруженості та швидкохідності при зменшенні габаритів і маси, збільшенні термінів служби і ККД. Цьому сприяють сучасні досягнення у сфері металознавства і термічної обробки, які забезпечують істотне підвищення згинальної і контактної міцності зубців і, отже, підвищення їх питомих навантажень.

**Виділення не досліджених частин загальної проблеми.** Зв'язок параметрів застосовуваних зубчастих передач авіаційних редукторів із технологічними процесами їх виготовлення.

**Мета статті.** Розглянути застосовуваність зубчастих передач авіаційних редукторів і залежність їх параметрів від технологічних процесів виготовлення.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянуті застосовуваність зубчастих передач авіаційних редукторів, вплив технологічних процесів на доопрацювання зубчастих передач на більший ресурс, підвищення витривалості зубців при згині, вплив поверхневої деформації, електрополірування, віброшліфування, деформаційного старіння на контактну витривалість і довговічність.

**Висновок відповідно до статті.** Наявний позитивний досвід експлуатації циліндричних і конічних зубчастих коліс свідчить про ефективність застосування розглянутих технологічних процесів підвищення витривалості зубців при згині, вплив поверхневої деформації, електрополірування, віброшліфування, деформаційного старіння на контактну витривалість і довговічність і, у кінцевому підсумку, на підвищення ресурсу авіаційних редукторів.

**Ключові слова:** зубчасті передачі авіаційних редукторів; застосовуваність; технологічні процеси виготовлення для підвищення ресурсу.

Рис.: 5. Табл.: 4. Бібл.: 13.

**Актуальність теми дослідження.** Проблема надійності роботи зубчастих передач пов'язана з технологією їх виготовлення [1]. Вирішення пов'язаних з цією проблемою завдань засноване на ретельному вивченні й використанні взаємозв'язку конструкторських і технологічних чинників з експлуатаційними показниками надійності зубчастих передач. Особлива увага при цьому приділяється управлінню технологічними процесами виготовлення зубчастих коліс, наданню робочим поверхням зубців необхідних фізико-механічних властивостей і забезпеченню заданих показників точності спряження [2]. Зубчасті колеса останніх ступенів редукторів вертольоту [3] мають порівняно невеликі коллові швидкості (15-20 м/с) і їх напруцювання за увесь ресурс не перевищує  $10^9$  циклів навантажень. Лише 20 % циліндричних зубчастих коліс працюють із колловими швидкостями від 20 до 100 м/с і більше та близько половини застосовуваних конічних зубчастих передач – зі швидкостями від 35 до 100 м/с і більше [1].

Основною особливістю авіаційних зубчастих коліс є їхня мала відносна маса й ажурність конструкцій. Розподіл маси по деталях і вузлах головних редукторів вертольотів наведений в таблиці 1 [1].

Як бачимо, найбільшу масу (від  $1/4$  до  $1/3$  маси всього редуктора) мають зубчасті колеса основного кінематичного ланцюга і шестерні приводів.

В авіаційних редукторах переважна більшість (близько 97 %) циліндричних зубчастих передач виготовляється прямозубими і близько половини конічних коліс – із круговими (спіральними) зубцями.

## Розподіл маси по деталях і вузлах головних редукторів

Найменування деталі або вузла	Маса деталі або вузла, кг (%)				
	BP-2Б	P-5	BP-8А	P-7	P-26
Шестерні основного кінематичного ланцюга	80,7(28,3)	154,0(33,0)	215,0(28,7)	810,2(25,3)	45,8(22,8)
Шестерні приводів	5,4(1,9)	10,0(2,0)	14,4(1,9)	32,5(1,0)	5,0(2,5)
Підшипники основного кінематичного ланцюга	43,8(15,4)	43,2(9,2)	101,0(13,4)	450,4(14,1)	21,0(10,5)
Підшипники приводів	2,1(0,7)	–	9,2(1,2)	25,0(0,9)	1,0(0,5)
Корпус перебору і сателітів (води́ло)	–	45,3(9,5)	63,2(8,4)	205,0(6,5)	7,2(3,6)
Вал несучих гвинтів	31,3(11,0)	75,0(16,0)	108,0(14,4)	532,0(16,6)	42,9(21,4)
Вал основного кінематичного ланцюга	10,2(3,6)	–	16,8(2,2)	74,9(2,3)	2,5(1,3)
Кріпильні вироби	21,4(7,5)	–	31,5(4,2)	–	5,4(2,7)
Корпусне литво	61,2(21,4)	70,0(15,0)	133,0(17,7)	580,0(18,1)	42,2(21,0)
Муфта вільного ходу	7,8(2,3)	–	11,1(1,5)	95,0(3,0)	–
Маслосистема і агрегати	11,5(4,0)	–	23,3(3,1)	96,0(3,0)	1,9(0,9)
Сумарний % шестерень	30,2	35,0	30,6	26,3	25,3

Абсолютна більшість високонапружених зубчастих передач має кут зачеплення  $\alpha_w > 20^\circ$ , який є стандартним кутом зачеплення в загальному машинобудуванні. Зазвичай в одній ступені редуктора або привода передавальне число  $u \leq 4$ , а кількість зубців  $z \leq 20$  застосовуються лише у 5 % всіх типорозмірів зубчастих коліс авіаційної техніки. Здебільшого 50 % зубчастих коліс зовнішнього зачеплення мають  $25 \leq z \leq 45$ , а внутрішнього зачеплення –  $81 \leq z \leq 127$ . Що стосується модулів зачеплення, то вони розподіляються в межах  $m = 2,25 \dots 8$  мм, причому близько 40 % типорозмірів зубчастих коліс мають  $3 \leq m \leq 5$  мм [1].

Конструктивними параметрами зубчастого колеса, що впливають безпосередньо на міцність, є коефіцієнти  $\psi_{aw} = \frac{b_w}{a_w}$  і  $\psi_d = \frac{b_w}{mz} = \frac{\psi_m}{z}$ , де  $\psi_m = \frac{b_w}{m}$ , де  $a_w, b_w$  – міжосьова відстань і ширина коліс відповідно.

Коефіцієнт  $\psi_{aw}$  відображає вплив геометричних параметрів на контактну міцність, а коефіцієнт  $\psi_d$  – на деформацію кручення тіла зубчастого колеса. Ця деформація впливає на нерівномірність розподілу навантаження по довжині контактних ліній. З точністю до  $\cos\alpha \sec\alpha_w$  можна приймати, що  $\psi_d = 0,5(1+u)\psi_{aw}$ .

Результати статистичної обробки даних про застосовуваність високонапружених циліндричних коліс за параметром  $\psi_{aw}$  свідчать, що розподіл цього параметра відповідає нормальному закону і лежить у межах  $0,08 \leq \psi_{aw} \leq 0,45$ , причому медіана розподілу дорівнює 0,25 [1].

Дуже близький до нормального закону розподілу типорозмірів зубчастих коліс і параметр  $\psi_d$ , що лежить у межах від 0,08 до 0,88 з медіаною 0,3.

Застосовуваність зубчастих коліс за параметром  $\psi_m$  теж близька до нормального закону розподілу, причому  $6,55 \leq \psi_m \leq 14,5$ , медіана 10 [1]. Отже, авіаційні циліндричні зубчасті колеса треба віднести до категорії коліс із вузьким зубчастим вінцем. У зубчастих передачах, складених із таких коліс, нерівномірність розподілу навантаження по довжині контактних ліній, переважно, не обмежує несучу здатність таких передач. Проте під

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

час розрахунків на міцність завжди враховують деформацію тіла колеса залежно від місця прикладання і напрямку діючого силового потоку. Крім того, у конструкціях авіаційних редукторів і приводів прагнуть уникати консольного розташування зубчастих коліс.

У 70 % зубчастих коліс  $\psi_{\text{мт}} = \frac{L}{d_{\text{вал}}} \leq 1$ , де  $L$  – довжина маточини;  $d_{\text{вал}}$  – діаметр посадового отвору зубчастого колеса. Інтервал розподілу параметра  $\psi_L = \frac{b_w}{L}$  становить  $0,1 \leq \psi_L \leq 2,3$ , де медіана – 0,7 [1]. Між коефіцієнтами  $\psi_{\text{мт}}$  і  $\psi_L$  існує статистичний зв'язок, що записується у вигляді рівняння регресії:  $\psi_{\text{мт}} = 1,614 - 1,113\psi_L$ .

Ширина зубчастого вінця у конічних колесах зі спіральними зубцями зазвичай лежить у діапазоні  $0,37l \geq b \geq 0,25l$ , де  $l$  – довжина твірної ділильного конуса. У таких передачах напрямком спіралі повинен забезпечувати виникнення сили, що буде виштовхувати sprzęжені колеса із зачеплення.

За даними журналу Gear Technology [2; 4], який у 2011 р. провів опитування виробників зубчастих коліс щодо стану технологій виготовлення зубчастих передач, методи виробництва поділилися таким чином (рис. 1).

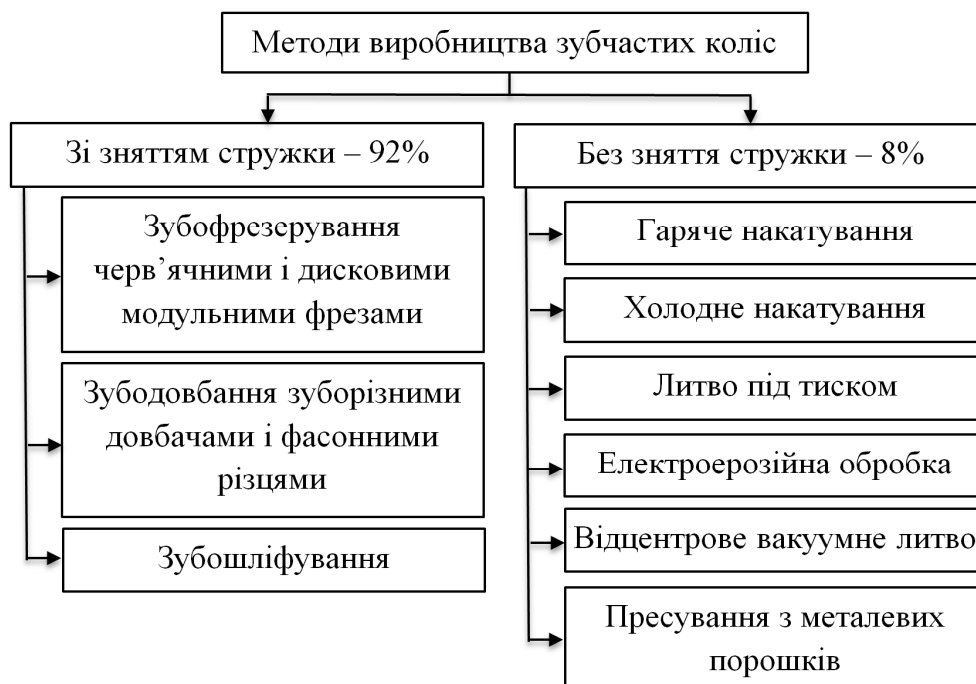


Рис. 1. Класифікація методів виробництва зубчастих коліс

Дослідження технологічного забезпечення надійності зубчастих коліс дозволяє встановити такі критерії оцінки ефективності виготовлення, представлені в табл. 2 [2].

У табл. 2:  $f_{pb}$  – відхилення зубчастого колеса;  $f_{fr}$  – похибка профілю зуба;  $F_{pr}$  – накопичена похибка кроку зубчастого колеса;  $F_{rr}$  – радіальне биття зубчастого вінця;  $F_{Uwr}$  – коливання довжини загальної нормалі;  $F_{\beta r}$  – похибка напрямку зуба;  $F_{shr}$  – відхилення відносних розмірів сумарної зони дотику;  $J_{n,\text{min}}$  – гарантований бічний зазор;  $E_{Ms}$ ,  $T_M$  – найменше відхилення розміру по роликах і допуск [5].

## Критерії оцінки ефективності виготовлення зубчастих коліс

Продуктивність	Конструктивні фактори	Технологічні фактори
	Ступінь точності	Швидкість різання (V)
	Число зубців ( $z_1, z_2$ )	Подача (s), глибина різання (t)
	Модуль (m)	Стійкість інструменту (T)
	Ширина зубчастого вінця (b)	ЗОР
Якість	Якість робочих поверхонь зубців шорсткість (Ra), твердість (H)	
	Плавність роботи ( $f_{pb}, f_{fr}$ )	
	Кінематична точність ( $F_{pr}, F_{tr}, F_{Uwr}$ )	
	Контакт зубців ( $F_{\beta r}, F_{shr}$ )	
	Норми бічного зазору ( $j_{n,min}, E_{Ms}, T_M$ )	

Усі способи поверхневої обробки сталевих деталей машин, за допомогою яких можна керувати міцністю, можна поділити на такі групи [2]: технологічні (різання, чистова обробка), механічні (обкочування роликками, обдування дробом), термічні (індукційне нагрівання струмами високої частоти), хіміко-термічні (цементування, азотування).

Основними напрямками у виробництві зубчастих передач є підвищення силової напруженості та швидкохідності при зменшенні габаритів і маси, збільшенні термінів служби та ККД. Цьому сприяють сучасні досягнення у сфері металознавства й термічної обробки, які забезпечують суттєве підвищення згинальної та контактної міцності зубців і, отже, підвищення питомих навантажень на зубці [6]. Наприклад, прямозуба авіаційна зубчаста передача зі сталі типу 12X2H4A-III працює при допустимому рівні контактних напружень  $\sigma_{np} = 1500$  МПа при  $N_{ц} = 5 \cdot 10^7$  циклів, границя згинальної витривалості  $\sigma_F = 950$  МПа при базовому числі циклів  $N_{F0} = 4 \cdot 10^6$  [7].

Проводяться роботи, скеровані на те, щоб дифузійні покриття зубчастих коліс нового покоління відповідали таким значенням експлуатаційних властивостей: границя контактної витривалості в зоні зачеплення – 1500-2000 МПа; границя витривалості при згині, що контролюється в основі зуба, – 900-1200 МПа; робоча температура поверхонь зубчастих коліс – понад 350-450 °С; температура миттєвих спалахів – 500-800 °С і більше.

При виробництві редукторів авіаційної техніки використовують евольвентні циліндричні прямозубі зубчасті колеса із зовнішнім зачепленням середнього модуля (від 2 до 6 мм) з цементованих (12X2H4A, 20X3МВФ та ін.) і азотованих (18X2H4МА 40ХНМА, 38ХМЮА та ін.) сталей із наступним зубофрезеруванням, хіміко-термічною обробкою (цементация), зубошліфуванням або зубофрезеруванням, зубошліфуванням, азотуванням.

Авіаційні зубчасті колеса виготовляють з цементованих високолегованих сталей електрошлакового або вакуумного переплаву. Вони піддаються складній хіміко-термічній обробці (загартування, обробка холодом, відпуск, цементация, азотування тощо), у результаті якої мають твердість поверхні не нижче HRC 60 при твердості серцевини HRC 30...42 [2]. При цьому суворо регламентується відсотковий вміст вуглецю в поверхневому шарі, однорідність і дрібнозернистість структури, глибина хіміко-термічного шару, механічні властивості та їх ізотропність. Особливо оцінюються величина й характер розподілу залишкових стискаючих напружень.

Як цементовані сталі застосовуються 12X2H4A-III, 14XГСН2МА-III, 30X2H2ВФМА-III, 20X3МВФА та інші. Ці сталі містять менше нікелю або є безнікелевими, більш стійкі проти заїдань, менш чутливі до припалів. Із цих сталей виготовляють не менше як  $\frac{3}{4}$  всіх авіаційних зубчастих коліс і, зокрема, зубчасті колеса головних редукторів вертольотів.

Азотуванню підлягають здебільшого зубчасті колеса планетарних редукторів, таких, наприклад, як епіцикли, для чого застосовують сталь 38ХМЮА.



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Слід зазначити, що припуск на шліфування поверхонь зубців повинен гарантувати отримання необхідної товщини зміцненого шару з урахуванням деформацій під час цементування. В ідеальному випадку цей шар не є рівномірним, оскільки ніжка зуба деформується більше, ніж голівка.

Несуча здатність хіміко-термічно оброблених зубчастих коліс великою мірою визначається величиною наведених залишкових стискаючих напружень. Ці напруження, які виникають у поверхневому шарі, врівноважуються відносно невеликими розтягуючими напруженнями в серцевині зуба, їх найбільша величина не перевищує  $\sigma < 1,15\sigma_T$ .

У процесі зубошліфування виводяться неточності зубофрезерування й основні деформації зубчастих коліс, пов'язані з термічною обробкою, а також знімається поверхневий шар із дефектами термообробки. Під дією високих температур відбуваються вторинні структурні зміни в матеріалі, що впливають на виникнення залишкових розтягуючих напружень. Мікроструктурні зміни у сталі, що відбуваються при підвищених режимах шліфування, призводять до так званих припалів.

Для збільшення надійності та несучої здатності зубчастих коліс їхні зубці виготовляють з піднутреною нешліфованою основою, шліфуванню піддають тільки евольвентний профіль зубців.

Значна частина авіаційних зубчастих коліс має евольвентну поверхню по 7...8 класу шорсткості за ГОСТ 2789-73, риси якої мають вигляд сітки. Така форма мікронерівностей має місце при шліфуванні зубчастих коліс на верстатах фірми «Мааг» з кутом встановлення шліфувального круга  $\alpha_{III} = 15^\circ$  або  $20^\circ$ . При цьому припускають, що зубчасті колеса працюють в умовах граничного змащування й орієнтована таким чином шорсткість сприяє утриманню масляного шару.

У зв'язку з доопрацюванням (доводкою) зубчастих передач на більший ресурс стала помітна тенденція переходу на «безперервне» шліфування, що має місце при нульовій – паралельній – установці робочих граней шліфувального круга. В основу цього методу шліфування, що дозволяє підвищити шорсткість поверхні до 9-го класу за ГОСТ 2789-73, покладено припущення про існування гідродинамічної масляної плівки.

**Досвід доопрацювання авіаційних двигунів на більший ресурс** підтверджує високу працездатність зубчастих коліс із шорсткістю, що відповідає 9...10 класу, причому поверхню з 10 класом шорсткості отримують зубохонінгуванням. Під час зубохонінгування зменшують похибки основного кроку при зніманні металу в 5...6 мкм. Шорсткість перехідної поверхні звичайно на 1...2 класи нижче, ніж шорсткість евольвентної поверхні, проте при тонких ободах чистота перехідної поверхні досягає 10...11 класу шорсткості. У цьому випадку, враховуючи вплив чистоти поверхні на опір згинальної втоми, застосовують ретельне полірування перехідної поверхні [1].

Іноді як остаточну операцію з доопрацювання евольвентної поверхні зуба застосовують електрополірування, що дозволяє отримати 9-й клас шорсткості. Недоліки електрополірування компенсуються дробоструменевим наклепом поверхні. Замість електрополірування як фінішну операцію застосовують притирання зубчастих коліс графітізованим перлітним чавунним притиром із пастами. Під час притирання знімається шар 20...30 мкм і переважно виправляються похибки основного кроку й напрямку зуба. Хонінгуванням або притиранням знімають тонкий дефектний шар, що залишився після термообробки, шліфування, травлення зубчастих коліс з метою винайдення припалів. Різні методи пластичного деформування також є завершальною операцією для підвищення якості зубчастих коліс.

Кінематограми на рис. 2, а і б демонструють зміну спряженості тієї ж самої пари зубчастих коліс, виготовлених на різних верстатах [1]. Перша пара виготовлена на верстаті KS-42 фірми «Мааг», що працює за схемою плоского виробляючого колеса, а друга – на верс-

таті 5870М конструкції ЭНИМС, побудованого за схемою плосковершинного виробляючого колеса. Це приклад виготовлення за одним кресленням різних коліс. Кінематограма рис. 2, в у порівнянні з 2, б показує, наскільки сильно впливає кількість зубців у зачепленні на ступінь неспряженості при обробці за схемою плосковершинного виробляючого колеса.

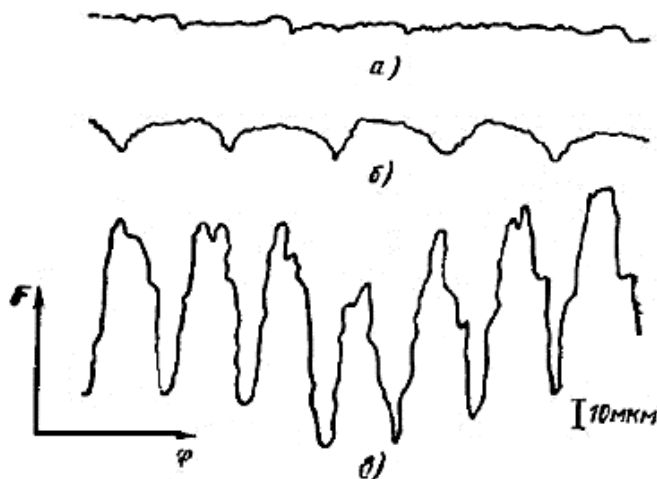


Рис. 2. Кінематичні похибки конічних прямозубих пар:

а – пара при  $m = 6$  мм,  $z_1 = 32$ ,  $z_2 = 47$ ,  $\alpha = 20^\circ$ , шліфувана на верстаті фірми «Maag» KS-42;  
 б – та ж сама пара, шліфувана на верстаті 5870М; в – пара при  $m = 5$  мм,  $z_1 = 15$ ,  
 $z_2 = 18$ ,  $\alpha = 20^\circ$ , оброблена за схемою плосковершинного колеса

Спряжені конічні зачеплення в навантажених передачах непрацездатні через деформації власне коліс, їх переміщень за рахунок деформації підшипників і корпусів, похибок виготовлення та температурних деформацій. У таких зачепленнях контакт під навантаженням виходить за кромку, і передача стає неможливою. У конструкціях навантажених передач застосовується виключно неспряжені, модифіковані по профілю і лініям зубців зачеплення (з локалізованою плямою контакту).

Під час виготовлення високонапружених зубчастих коліс визнано доцільним застосовувати тепломіцні, менш схильні до утворення припалів, сталі 12Х2НВФА, 20Х3МВФА, 16Х3НВМФБЦ і особливо 13Х3НВМ2Ф-Ш. Вони допускають більш продуктивний режим шліфування, що знижує час на обробку одного зуба на 30...50 %, у порівнянні зі сталлю 12Х2Н4А [1].

Зміцнення зубців коліс здійснюється обкочуванням роликками [8] або валками-шестернями [9] і обдувкою дробом [10; 11]. Обкочування валками-шестернями дозволяє зміцнити зубці по всьому профілю й воно більш продуктивне, ніж обкочування роликками, але вимагає застосування спеціального обладнання та профільованого інструменту. Збільшення границі витривалості після зміцнення дробом для сталі після відпалювання становить 9 %, після покращення – 18 %, після загартування і відпуску – 48 %.

У цементованих сталей залишкові напруження стиску після поверхневого пластичного деформування можуть перевищувати 1000 МПа, змінюючись більш суттєво (на сотні відсотків), ніж інші властивості (наприклад, твердість), що визначає для них високу ефективність деформаційного зміцнення. Високий градієнт залишкових напружень стиску, зменшуючи величину результуючого напруження розтягу в поверхні в небезпечному перерізі основи зуба, зміщує місце руйнування в приповерхневий шар. У результаті поверхневий наклеп знижує чутливість цементованої сталі до концентраторів напружень, дозволяючи тим самим найбільш повно використати її високоміцний стан, підвищити надійність роботи та несучу здатність зубчастих коліс.

Підвищення витривалості зубців при згині залежить від методу поверхневого пластичного деформування, режимів наклепу, початкового стану поверхні. Обкочування роликми методом Кузьміна [12] підвищує границю витривалості зубців при згині цементованих коліс на 30...50 % і суттєво збільшує їх довговічність (рис. 3) [1].

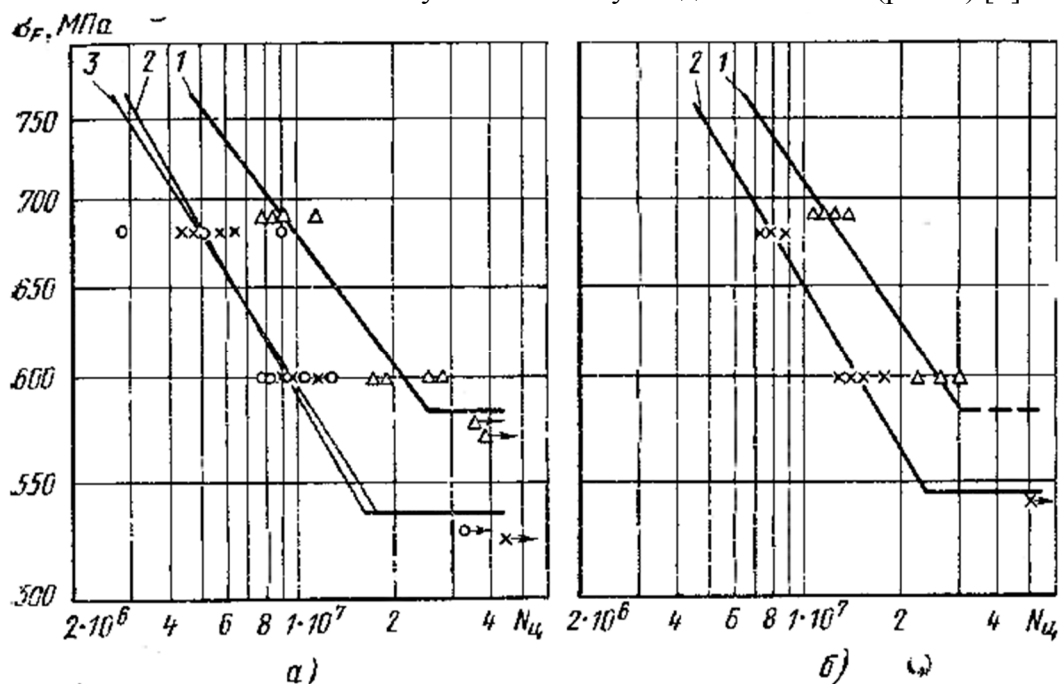


Рис. 3. Криві витривалості зубців коліс при згині:

а – зі сталі 12X2H4A; б – зі сталі 12X2HВФА; 1 – зубчасті колеса з нешліфованою піднутреною основою зубців; 2 – із нешліфованою основою з уступом; 3 – зі шліфованою основою зубців

На рис. 4 представлені границя витривалості й довговічність сталі 12X2H4A залежно від часу обробки і кінетичної енергії дробу при пневмодробоструменевому зміцненні.

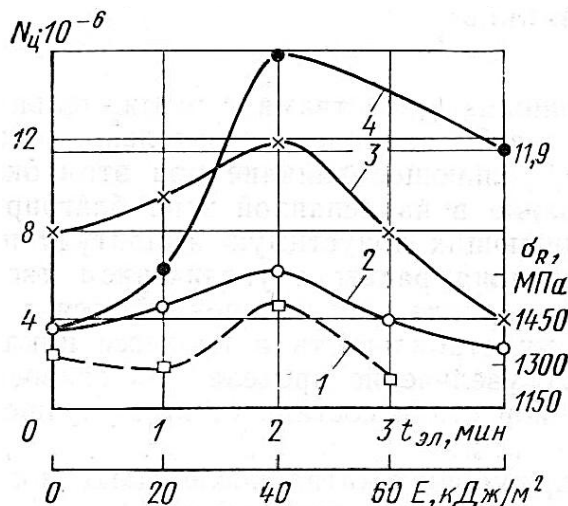


Рис. 4. Границя контактної витривалості  $\sigma_R$  (1) і довговічність  $N_{ц}$  (2...4)

при напруженні в контакт  $\sigma_{Zmax} = 1820$  МПа сталі 12X2H4A залежно від часу обробки  $t_{эл}$  і кінетичної енергії дробу  $E$  при пневмодробоструменевому зміцненні:

1...3 – наклеп і натуральне старіння; наклеп і старіння при  $t = 130^{\circ}C$  на протязі 2 год;  
1, 2, 4 – товщина цементованого шару 1,0 мм; 3 – товщина цементованого шару 1,3 мм

Границя витривалості при згині цементованої сталі 20X2H4A зростає з 838 МПа до 970 МПа під час обкочування роликками по мірі зростання напруження в контакті до 5000 МПа. При більших контактних напруженнях вона знижується [12].

Висока ефективність гідродробоструменевого зміцнення зубчастих коліс ( $m = 3$  мм,  $z = 50$ ,  $\alpha = 25^\circ$ ,  $b = 8$  мм) з нешліфованою піднутреною основою зубців зі сталі 20X3МВФ-Ш ( $HRC \geq 58$ ) встановлена в [13]. Після обкочування кожного зуба протягом 3 хв кульками діаметром 1,6 мм під тиском трансформаторного масла 0,8 МПа границя витривалості зубців при згині в порівнянні з незміцненим станом збільшується з 480 до 680 МПа, тобто на  $\cong 43\%$ . Обробка дробом нітроцементованих коліс збільшує витривалість зубців при згині у 3...5 разів.

**Вплив поверхневого деформування на контактну витривалість** менш суттєвий, оскільки залишкові напруження стиску не спричиняють на неї такого вирішального впливу, як на витривалість зубців при згині. Інші властивості змінюються менш суттєво і до того ж іноді в небажаному напрямку (наприклад, підвищення шорсткості під час наклепу дробом). Шорсткість поверхні залежить від способу зміцнення, часу наклепу та початкової шорсткості. Додаткові операції – електрополірування або віброшліфування – покращують шорсткість поверхні: знижують висоту мікронерівностей, змінюють характер мікрорельєфу, згладжуючи гострі виступи і западини. Вплив способу зміцнення стає непомітним.

Для сталей з високою поверхневою твердістю вважається більш переважним застосування алмазного вигладжування замість обкочування роликками. Вигладжування алмазним інструментом радіусом 1,5 мм дозволяє при невисокому зусиллі в 100...300 Н створювати високий тиск у контакті в 7000...10 040 МПа і тим самим значну пластичну деформацію, що розповсюджується на більшу глибину від поверхні, ніж під час наклепу дробом (рис. 5). У результаті зміцнений шар має більшу товщину (0,3...0,4 мм), а максимум залишкових напружень зміщений в глибину шару й величина напружень у поверхні менше. При зусиллях вигладжування 300 Н і більше залишкові напруження переходять в розтягуючі. Твердість поверхні підвищується зі збільшенням зусилля вигладжування до 200 Н і помітно знижується при  $P > 300$  Н.

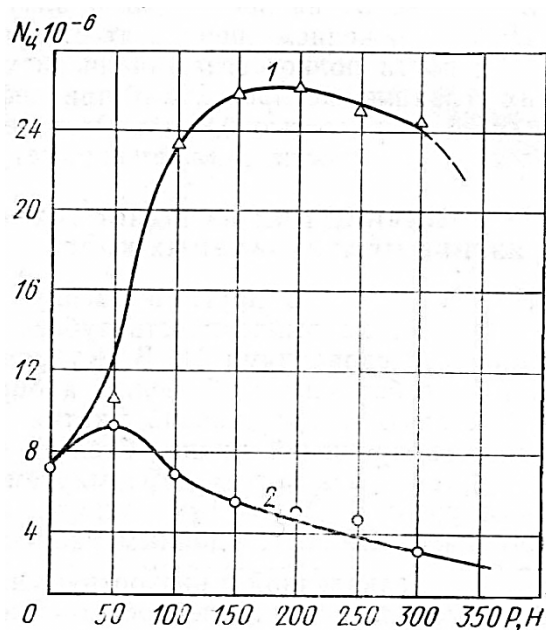


Рис. 5. Залежність контактної довговічності  $N_{ц}$  сталі 20X3МВФ-Ш від зусилля вигладжування  $P$  ( $S = 0,04$  мм/об;  $v = 0,8$  м/с):  
1 – вигладжування і старіння при  $160^\circ\text{C}$ , 2 год; 2 – вигладжування

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

**Деформаційне старіння** (низькотемпературний відпуск) після поверхневого пластичного деформування додатково покращує тонку структуру деформованого матеріалу і підвищує контактну витривалість цементованих сталей [1]. Деформаційне старіння знижує мікрвикривлення кристалічної решітки і призводить до більш високого ступеня закріплення дислокацій, ніж натуральне старіння.

Найменшу рухливість дефектів викликає старіння протягом 2 год. при температурі 130 °С для сталі 12Х2Н4А і 160 °С для сталей 12Х2НВФА і 20Х3МВФА. При більш високих температурах і витримках розвивається перестарювання, що призводить до утворення менш стабільної дислокаційної структури. Твердість поверхні та залишкові мікронапруження під час старіння змінюються незначно. Старіння після раціональних режимів наклепу дробом підвищують довговічність сталі 12Х2Н4А в 2,0...3,5 раза, а після алмазного вигладжування – в 3...5 разів. У табл. 3 представлена контактна витривалість сталі 12Х2НВФА після зміцнення різними способами [1].

Таблиця 3

*Контактна витривалість сталі 12Х2НВФА після зміцнення при  $E = 40 \text{ кДж/м}^2$  різними способами*

Спосіб обробки	Середня довговічність, млн циклів ( $\sigma_{z\max} = 2100 \text{ МПа}$ )	
	натуральне старіння	штучне старіння при $t = 160^\circ \text{C}$ , 2 год
Шліфування	2,04	-
Шліфування + пневмодробоструменеве зміцнення + віброшліфування	6,54	10,00
Шліфування + гідродробоструменеве зміцнення + віброшліфування	5,68	9,94
Шліфування + зміцнення мікрокульками + віброшліфування	3,40	6,51

**Вплив електрополірування й віброшліфування на контактну витривалість.** Наклеп дробом визнано доцільним суміщати з електрополіруванням або віброшліфуванням робочих поверхонь зубців, причому електрополірування можна проводити або до, або після наклепу дробом. Електрополірування як шліфованих, так і зміцнених дробом роликів зразків підвищує контактну витривалість у 2,0...2,5 раза, а віброшліфування при жорсткому зачепленні деталей – у  $\cong 1,5$  раза (табл. 4).

Таблиця 4

*Вплив технології обробки поверхні на контактну витривалість сталі 12Х2НВФА*

Варіант	Технологія фінішної обробки	Довговічність, млн циклів ( $\sigma_{Z\max} = 2160 \text{ МПа}$ )
I	Шліфування	3,3
II	Шліфування + електрополірування + наклеп дробом (пневмодробоструменеве зміцнення, $t_{\text{зн}} = 3 \text{ хв}$ )	3,6
III	Шліфування + електрополірування + наклеп дробом (пневмодробоструменеве зміцнення, $t_{\text{зн}} = 3 \text{ хв}$ ) + додаткове старіння при $t = 160^\circ \text{C}$ , 2 год	13,1
IV	Шліфування + наклеп дробом (пневмодробоструменеве зміцнення, $t_{\text{зн}} = 3 \text{ хв}$ ) + електрополірування	8,7
V	Шліфування + наклеп дробом (пневмодробоструменеве зміцнення, $t_{\text{зн}} = 3 \text{ хв}$ ) + електрополірування + додаткове старіння при $t = 160^\circ \text{C}$ , 2 год	16,8

Збільшенню довговічності сприяє підвищення класу шорсткості, покращення однорідності її структури та властивостей. Крім того, електрополірування деформованої поверхні в результаті її розігріву викликає розвиток початкових стадій деформаційного старіння. З цієї причини його ефективно застосовувати після наклепу. Електрополірування після зміцнення дробом (варіант IV) у порівнянні з варіантами I і II підвищує довговічність у 2,4 раза. Старіння після наклепу й електрополірування (варіанти III і V) додатково збільшують довговічність.

Зміна контактної витривалості від режимів наклепу відбувається по-іншому, ніж для витривалості при згині, границя якої змінюється за кривою з «насиченням». Під час поверхневого дробоструменевого зміцнення контактна витривалість підвищується лише при одному (раціональному) режимі: час електрополірування  $t_{el} = 2$  хв, енергія деформування  $E = 40$  кДж/м<sup>2</sup>. Зміна  $t_{el}$  на 1 хв ( $E$  на 20 кДж/м<sup>2</sup>) спричиняє вирішальний вплив [1].

Твердість поверхні та залишкові напруження стиску набувають найбільших значень при  $t_{el} = 4$  хв ( $E = 80$  кДж/м<sup>2</sup>), проте контактна витривалість при цьому режимі знижується у 1,5...2,0 рази. Аналогічна закономірність характерна для алмазного вигладжування і є загальною для всіх методів поверхневого пластичного деформування.

Контактна витривалість при алмазному вигладжуванні підвищується лише при зміцненні зусиллям 50 Н ( $p_0 = 5540$  МПа). Збільшення зусилля вигладжування більше 100 Н призводить до зниження довговічності.

**Висновки відповідно до статті.** Найвний позитивний досвід експлуатації циліндричних і конічних зубчастих коліс свідчить про ефективність застосування розглянутих технологічних процесів підвищення витривалості зубців при згині, поверхневого деформування, електрополірування, віброшліфування, деформаційного старіння на контактну витривалість та довговічність і, в кінцевому підсумку, для підвищення ресурсу авіаційних редукторів.

#### Список використаних джерел

1. Авиационные зубчатые передачи и редукторы. Справочник / под ред. Э. Б. Вулгакова. Москва: Машиностроение. 1982. 375 с.
2. Жукова С. И. Разработка метода технологического обеспечения противозадирной стойкости в кромочной зоне контактирования эвольвентных цилиндрических зубчатых колёс редукторов газотурбинных двигателей: дис. ... канд. техн. наук / Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева. Рыбинск, 2018. 166 с.
3. Шаповалов О., Колесник Д., Пилипенко О. Конструкції, кінематичні схеми та технічні характеристики вертольотних редукторів. *Технічні науки та технології*. 2018. № 2(12). С. 34-48.
4. Shen T., Krantz T., Sebastian J. Advanced Gear Alloys for Ultra High Strength Applications. *Официальный сайт NASA*. 2011. URL: <http://ntrshttp://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20110023751.pdf>.
5. ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. [Взамен ГОСТ 1643-72; дата введения 1981-07-01]. Москва: Изд-во стандартов, 1981. 75 с.
6. Маликов А. А., Сидоркин А. В., Ямников А. С. Инновационные технологии обработки зубьев цилиндрических колёс: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 335 с.
7. Поклад В. А., Яковлев В. А., Дорофеев В. Л. Обеспечение работоспособности центрального привода двигателей в условиях повышенных вибраций. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 9. С. 72-75.
8. Балтер М. А. Упрочнение деталей машин. Москва: Машиностроение, 1978. 184 с.
9. Орлов В. В., Юдин Д. А., Петраков А. П. О деформированном поверхностном упрочнении зубчатых колёс. *Вестник машиностроения*. 1979. № 1. С. 17-19.
10. Морозов В. И., Шубина Н. Б. Наклеп дробью тяжело нагруженных зубчатых колёс. Москва: Машиностроение, 1972. 104 с.
11. Петрогов В. В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента. *Машиностроение*. 1977. № 3. С. 47-50.
12. Кузьмин М. И. Упрочнение и отделка наклепыванием профиля зубьев шестерен. *Повышение износостойкости и срока службы машин*. Киев: Изд. АН УССР, 1960. Т. 2. С. 47-56.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

13. Иосилевич Г. Б., Беляев В. А., Точилкин А. А. Исследование изгибной усталостной прочности зубьев зубчатых колес, подвергнутых гидродробеструйной обработке. *Труды УАИ*. 1974. Вып. 78. С. 107-118.

## References

1. Vulgakov, A. B. (Ed.) (1982). *Aviazionnye zubchatye peredachi i reduktory [Aviation gearing and reducers]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
2. Gukova, S. I. (2018). *Razrabotka metoda technologicheskogo obespechenia protivozadirnoi stoikosti v kromochnoi zone kontaktirovaniya evolventnykh zilindricheskikh zubchatykh koles reduktorov gazoturbinykh dvigatelei [Development of method of the technological providing of antiscuff firmness is in the edge area of contact of involute cylindrical gear-wheels of reducing gears of turbo-engines]* (Candidate's thesis). Rybinskii gosudarstvennyj aviazionnyi tehnikeskii universitet imeni P. A. Solovjeva, Rybinsk [in Russian].
3. Shapovalov, O., Kolesnik, D., Pilipenko, O. (2018). Konstruktsii, kinematychni shemy ta tehnicni kharakterystyky vertoliotnykh reduktoriv [Structures, kinematic schemes and technical characteristics of helicopter reducers]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 2 (12), 34-48 [in Ukrainian].
4. Shen, T., Krantz, T., Sebastian, J. (2011). *Advanced Gear Alloys for Ultra High Strength Applications*. Official site NASA. Retrieved from <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20110023751.pdf>.
5. GOST 1643-81. *Osnovnye normy vzaimozameniamosti. Peredachi zubchatye zilindricheskie. Dopuski. [Basic norms of interchangeability. Transmissions toothed cylindrical. Admittances]*. Moscow: Izd-vo standartov [in Russian].
6. Malikov, A. A., Sidorkin, A. V., Jamnikov, A. S. (2011). *Innovazionnye tehnologii obrabotki zubiev zilindricheskikh koles [Innovative technologies of treatment of teeth of cylindrical wheels]*. Tula: Izd-vo TulGU [in Russian].
7. Poklad, V. A., Jakovlev, V. A., Doropheev, V. L. (2008). Obespechenie rabotosposobnosti zentralnogo privoda dvigatelei v usloviakh povyshennykh vibratsii [Providing of capacity of central drive of engines in the conditions of enhanceable vibrations]. *Aviatsionno-kosmicheskaja tekhnika i tekhnologija – Aerospace Engineering and Technology*, 9, 72–75 [in Russian].
8. Balter, M. A. (1978). *Uprochnenie detalej mashin [Work-hardening of machine elements]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
9. Orlov, V. V., Judin, D. A., Petrakov, A. P. (1979). *O dephormirovannom poverhnostnom uprochnenii zubchatykh koles [About the deformed superficial work-hardening of gear-wheels]*. *Vestnik mashinostroenia* № 1. [in Russian].
10. Morozov, V. I., Shubina, N. B. (1972). *Naklep drobiu tiazhelonagruzennykh zubchatykh koles [Riveting by the shot of heavy-loading gear-wheels]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
11. Petrogov, V. V. (1977). Gidrodobestruinoe uprochnenie detalei i instrumenta [Hydroshotblast work-hardening of parts and instrument]. *Mashinostroenie – Engineering*, 3, 47-50 [in Russian].
12. Kuzmin, M. I. (1960). Uprochnenie i otdelka naklepyvaniem prophilia zubiev shesteren [Work-hardening and finishing by riveting on of profile of teeth of pinions]. *Povyshenie iznosostojkosti i sroka sluzby mashyn – Increased wear and tear of machines*. Kiev: Izd-vo AN USSR. Vol. 2, 47-56 [in Russian].
13. Iosilevich, G. B., Beljaev, V. A., Tochilkin, A. A. (1974). Issledovanie izgibnoj ustalostnoj prochnosti zubjev zubchstykh koles, podvergnutykh gidrodobestrujnoj obrabotke. [Research of bending tireless resistance of teeth of gear-wheels, exposed to hydroshotblast treatment]. *Trudy UAI – Proceedings of the AIM*, 78, 107-118 [in Russian].

UDC 629.735.45

*Oleg Shapovalov, Denis Kolesnik, Oleg Pilipenko*

**APPLIED AND DEPENDENCE OF PARAMETERS OF GEARING  
OF AVIATION REDUCING GEARS FROM TECHNOLOGICAL  
PROCESSES THEIR MAKING**

**Urgency of the research.** *The problem of reliability of work of gearing is closely related to technology of their making. Decision of the tasks related to this problem is based on a careful study and use of intercommunication of designer and tech-*

nological factors with operating reliability of gearing indexes. The special attention is here spared to the management by the technological processes of making of gear-wheels, to giving to the working surface of teeth necessary physical and mechanical properties and providing of the set indexes of exactness of interface.

**Target setting.** Exposure of possibility of increase of resource of gearing main, intermediate and tail reducing gears of helicopters of Mu-8 and their modifications.

**Actual scientific researches and issues analysis.** It is possible to conclude from the analysis of literary sources, that basic directions in the production of gearing is an increase of power tension and high-speed at reduction of sizes and mass, increase of tenures of employment and efficiency. It is assisted by modern achievements in the areas of physical metallurgy and heat treatment, that provide the substantial increase of bending and contact resistance of teeth and, consequently, increase of their specific loading.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Association of parameters of the applied gearing of aviation reducing gears with the technological processes of their making.

**The research objective.** To consider applied of gearing of aviation reducing gears and dependence of their parameters from the technological processes of making.

**The statement of basic materials.** The applied of gearing of aviation reducing gears, influence of technological processes of revision of gearing is considered on a greater resource, increase of endurance of teeth at a bend, influence of superficial deformation, electro-polishing, vibration grinding, deformation aging on contact endurance and longevity.

**Conclusion in accordance with the article.** Existent positive experience of exploitation of cylindrical and conical gear-wheels testifies to efficiency of application of the considered technological processes of increase of endurance of teeth at a bend, influence of superficial deformation, electro-polishing, vibration grinding, deformation aging on contact endurance and longevity and, in final analysis, - on the increases of resource of aviation reducing gears.

**Keywords:** gearing of aviation reducing gears; applied; technological processes of making for the increase of resource. Fig.: 5. Table: 4. References: 13.

**Шаповалов Олег Леонідович** – начальник відділу, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєнь та військової техніки Збройних сил України (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).

**Shapovalov Oleg** – Head of Department, State Research Institute of Tests and Certification of Armaments and Military Technique of the Armed Forces of Ukraine (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** ak1149cv@ukr.net

**Колесник Денис Миколайович** – начальник відділення, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєнь та військової техніки Збройних сил України (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).

**Kolesnik Denis** – Chief of Separation, State Research Institute of Tests and Certification of Armaments and Military Technique of the Armed Forces of Ukraine (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** denis1971@ukr.net

**Пилипенко Олег Іванович** – доктор технічних наук, професор, керівник секції основ конструювання машин кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна), провідний науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєнь та військової техніки Збройних сил України (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).

**Pilipenko Oleg** – Doctor of Technical Sciences, Professor, leader of the Fundamental Machine Design section, the Welding Technology and Automated Projecting of Building Structures Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine), leading scientific coworker, State Research Institute of Tests and Certification of Armaments and Military Technique of the Armed Forces of Ukraine (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** opilip@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-003-0590-0107>

**Scopus Author ID:** 16510833000

**ResearcherID:** G-2533-2016



*Oleksandr Andrienko, Mykola Huchenko, Volodymyr Zinchenko, Oleksandr Zhorniak*  
**SOFTWARE-HARDWARE COMPLEX OF QUALIFICATION EVALUATION  
OF MI-171 HELICOPTER SIMULATOR**

**Urgency of the research.** Flight safety is an actual practical issue which solving influences the future of Ukraine as a transport state. As a consequence of technical progress aviation technology is becoming more and more sophisticated and reliable. However, the intensity of the impact on a person caused by various adverse factors, including information overloads, is constantly increasing. Statistics show that up to 80% of accidents and disasters occur due to pilot errors. The reason for about 35 % of these errors is lack of professional training, and about 40% of the errors are caused by inexperience of the crew.

**Target setting.** The cost of aircraft, crew training and the "price" of error increase simultaneously. Cost of professional training of helicopter crews on complex flight simulators is an order of magnitude lower than on real helicopters. Therefore, today the focus of increasing the safety of flights is to improve the level of flight training and flight experience via the use of flight simulators with a high level of information adequacy to a real helicopter.

**Actual scientific researches and issues analysis.** In order to ensure the possibility of the trained crew to obtain the appropriate official documents stating their professional training level, the simulator must be certified according to national and international requirements, i.e. the adequacy of its handling qualities to the appropriate qualities of a simulated helicopter must be guaranteed.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** The equipment allows simulating the conduct of the helicopter in all flight modes, including critical ones: control failure, landing in the mode of main lift rotor autorotation, etc., developing practical recommendations for the flight crew, as well as to train the flight crew to find ways out of emergencies. Receiving information about the flight mode, the parameters of the onboard systems, the external environment, etc., the crew envision the information flight model. The information model of the simulator should be as similar as possible to the information model of the real helicopter. Consequently, the basic components of the simulator are the imitation systems providing the influence of the information creating the adequate picture of the flight on sense organs of the crew, including eyesight – a visualization system, flight control equipment, etc.; hearing – a system of aviation noise simulation; vestibular apparatus – a motion generation system; tactile channel – a system for loading control levers.

**The research objective.** The listed systems form the informational model of the simulator, which should be coordinated with the movement of the helicopter. A mathematical model of the helicopter movement dynamics and the models of the mentioned systems provide this coordination. To provide the operation of the complex flight simulator, nonlinear mathematical models of helicopter dynamics based on the modified discrete vortex method have been developed. The models describe the flow of the volumetric design of the propeller apparatus and allow simulating a real-time flight in different modes, including "post-stall" condition.

**The statement of basic materials.** The principles and approaches to the qualification evaluation of complex flight helicopter simulators in accordance with the requirements of the EU (CS-FSTD (H)) and ICAO (Doc 9625) are analyzed. The performance capabilities of a complex full-flight Mi-171 helicopter simulator created by SPA "AVIA" are described. The necessity of certification of flight simulators in compliance with international standards is substantiated. The analysis of the validation procedure is performed. The structure and functioning of the software complex designed to automate validation tests are described.

**Conclusions.** An algorithm for obtaining a conclusion on the test result for one of the tests is presented.

**Keywords:** flight safety; pilot error; flight simulator; information model; validation tests.

*Fig.: 1. Table: 1. References: 12.*

**Urgency of the research.** Flight safety is an actual practical issue which solving influences the future of Ukraine as a transport state. As a consequence of technical progress aviation technology is becoming more and more sophisticated and reliable. However, the intensity of the impact on a person caused by various adverse factors, including information overloads, is constantly increasing. Statistics show that up to 80 % of accidents and disasters occur due to pilot errors. The reason for about 35 % of these errors is lack of professional training, and about 40 % of the errors are caused by inexperience of the crew [1].

**Target setting.** The cost of aircraft, crew training and the "price" of error increase simultaneously. Cost of professional training of helicopter crews on complex flight simulators is an order of magnitude lower than on real helicopters. Therefore, today the focus of increasing the safety of flights is to improve the level of flight training and flight experience via the use of flight simulators with a high level of information adequacy to a real helicopter.

**Actual scientific researches and issues analysis.** In order to ensure the possibility of the trained crew to obtain the appropriate official documents stating their professional training level, the simulator must be certified according to national and international requirements, i.e. the adequacy of its handling qualities to the appropriate qualities of a simulated helicopter must be guaranteed. Consequently, a complex scientific and practical task is the development of an adequate model of flight dynamics of a helicopter.

**The research objective.** In order to enable helicopter training crews to receive high-level professional training, SPA "AVIA", Kremenchuk developed and produced a complex full-flight simulator (FSTD) of the Mi-171 helicopter type V (by classification [2]), or level FFS(D) (by classification [3]). The equipment allows simulating the conduct of the helicopter in all flight modes, including critical ones: control failure, landing in the mode of main lift rotor autorotation, etc., developing practical recommendations for the flight crew, as well as to train the flight crew to find ways out of emergencies.

Receiving information about the flight mode, the parameters of the onboard systems, the external environment, etc., the crew envision the information flight model. The information model of the simulator should be as similar as possible to the information model of the real helicopter. Consequently, the basic components of the simulator are the imitation systems providing the influence of the information creating the adequate picture of the flight on sense organs of the crew, including eyesight – a visualization system, flight control equipment, etc.; hearing – a system of aviation noise simulation; vestibular apparatus – a motion generation system; tactile channel – a system for loading control levers.

The listed systems form the informational model of the simulator, which should be coordinated with the movement of the helicopter. A mathematical model of the helicopter movement dynamics and the models of the mentioned systems provide this coordination. To provide the operation of the complex flight simulator, nonlinear mathematical models of helicopter dynamics based on the modified discrete vortex method have been developed. The models describe the flow of the volumetric design of the propeller apparatus and allow simulating a real-time flight in different modes, including "post-stall" condition.

**The statement of basic materials.** The guidance on the criteria for qualifying flight simulators [2] designates the following levels of adequacy: "N (None or Not Applicable)" – not required; "G (Generic)" – basic; "R (Representative)" – typical; "S (Specific)" – high. For instance, the high level of adequacy S means that a helicopter of the specific type is being simulated, and initial and periodic validation tests should be made on the basis of objective comparison of the data of the simulator with the approved data of the helicopter.

FSTD characteristics important for training, testing and checking flight crewmembers need evaluating. They include the reactions of FSTD in the longitudinal and lateral motion directions; flight technical characteristics while taking-off, hovering and moving, climbing, cruising flight, downgrading, landing approach, power-on landing and landing in autorotation; while performing all-weather flights, as well as checking control systems; and, if necessary, checking the functions performed at the pilots and the instructor's workplaces. To guarantee the correct functioning, the performance of the systems simulating acceleration, vibrational, visual and sound effects is also evaluated.

The performance data, flying qualities, and other necessary parameters recorded on a helicopter by means of calibration system of data accumulation with sufficient resolution and experimentally proved accuracy that allow forming a set of corresponding parameters, which can be compared with similar FSTD parameters are considered validation data of flight tests.

The approved data is the performance data of the helicopter, collected through the application of the appropriate engineering practice and accepted by the National Aviation Administration, which is responsible for the qualification for use. The best sources of such data are helicopter producers, although the data from other competent sources may also be considered. For instance, the validation tests of the simulator by SPA "AVIA" rest on the data obtained in the flight tests [4, 5], agreed with the National Aviation Administration and [6] which states, that "The Mi-171, Mi-8AMT, Mi-172 and Mi-8MTV helicopters have the same flight performance and operational characteristics".

In order to compare the performance data of the helicopter with one of the helicopter simulator in [2, 3], a system of tests in the form of the table of validation tests is given. The requirements of one of the tests for comparing the balancing curves of the helicopter and the simulator in the horizontal flight are given in Table 1.

Table 1

*The requirements of one of the tests for comparing the balancing curves of the helicopter and the simulator in the horizontal flight*

TESTS	TOLERANCE	FLIGHT CONDITIONS	FSTD LEVEL											COMMENTS
			FFS				FTD			FNPT				
			A	B	C	D	1	2	3	I	II	III	MCC	
<b>f. Level Flight Performance and Trimmed Flight Control Position</b>	Torque $\pm 3\%$ Pitch angle $\pm 1.5^\circ$ Sideslip angle $\pm 2^\circ$ Longitudinal control position $\pm 5\%$ Lateral control position $\pm 5\%$ Directional control position $\pm 5\%$ Collective control position $\pm 5\%$	Cruise stability  Stability augmentation on or off	C T & M	✓	✓	✓	C T & M	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Two combinations of gross weight /kg and at least two speeds (including Vy and maximum cruise speed) within the flight envelope. May be snapshot tests. For FNPT level 1 changes in kg are not required. For FNPT (any level), only one stability augmentation case is required.

The resulting balancing curves should be within the limits of the tolerances with the results of flight tests.

To automate the validation tests, the software package TSFlightChart (Fig. 1) has been developed. It allows making the following processes operational:

- receiving real time flight parameters of the simulator and displaying their diagrams on the flight control officer's monitor;
- managing recording of flight parameters (recording, stopping, pausing, putting custom labels, etc.);
- saving flight information records;
- graphing flight parameters changes in time;
- editing diagrams (changing the set of displayed parameters, cutting out the desired areas, changing the scale, etc.);
- saving the edited records in digital and graphic formats;
- processing flight information in accordance with the tasks of a particular test;
- generating a formal report on the results of the test.

The examples below demonstrate a fragment of the content of the flight task and a general algorithm for forming the conclusion about the result of the test 1.f. Level flight Performance and Trimmed Flight Control Positions.

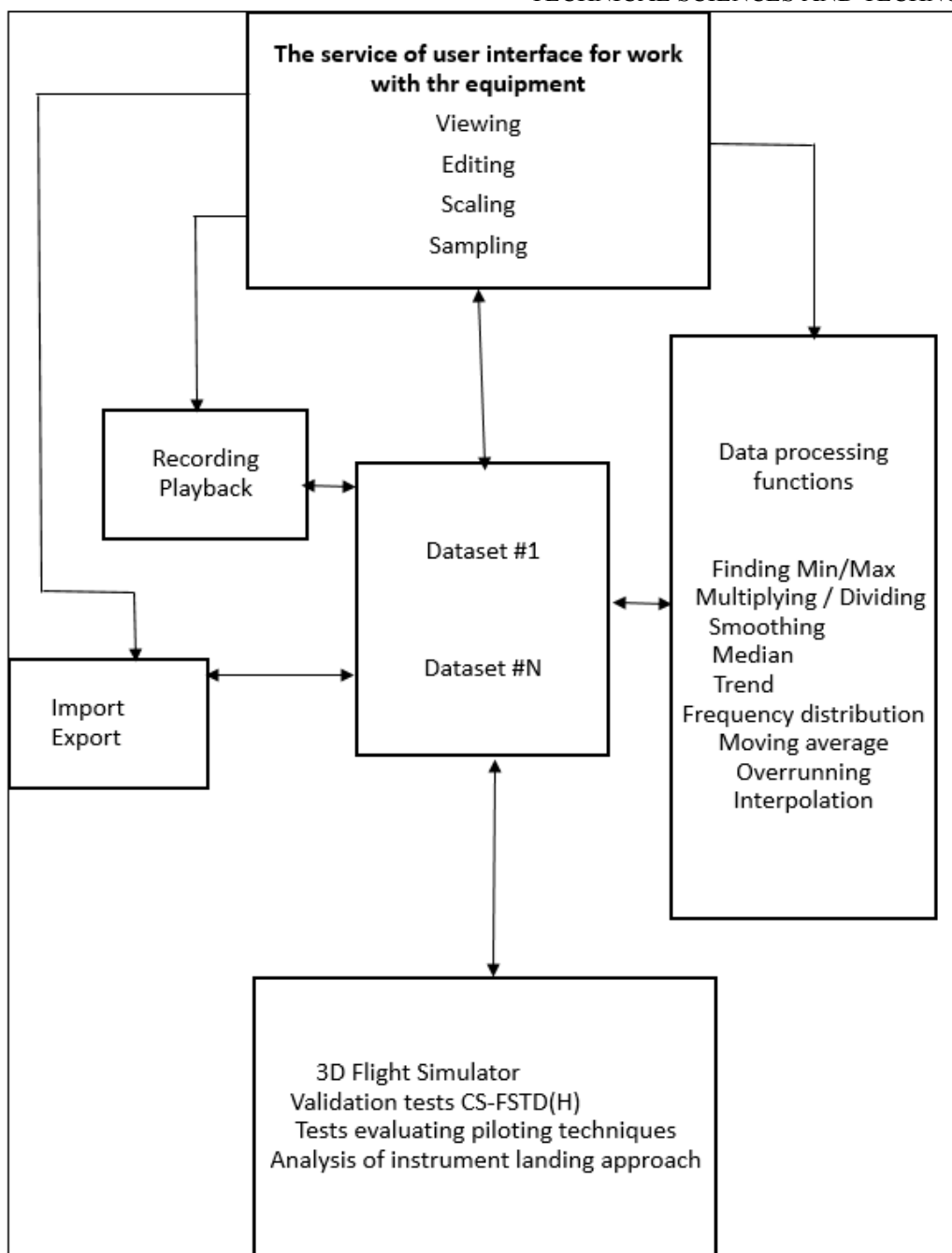


Fig. 1. Functional structure of the TSFlightChart complex

For a comparison test of balancing curves on the simulator, flights with the minimum and maximum flight mass and with the extreme front and the extreme rear centering are performed. In the horizontal flight phase without sideslip with the autopilot turned off and on, several speeds within the permitted range for 10 ... 15 seconds are recorded. The following algorithm processes the obtained records.

1. Generating a values array of the parameters to be evaluated.
2. Preparing the zones where the constant test speed was maintained during the test. Determining the beginning and end reference numbers of the zones (according to the labels placed during the test), their quantity and length.
3. Calculating medium speed on each of the zones. Generating an array of speeds, which were kept constant during the test.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

4. Calculating the average parameter value for each of the zones. Generating an array of average parameter values for each zone.

5. Approximating the discrete dependencies of mean values of the parameters of the results obtained on stage 4 from average speed by power polynomials with increasing degree till obtaining a sufficiently large coefficient of approximation reliability.

6. Obtaining continuous balancing curves by spline-interpolation of discrete dependences obtained on stage 5.

7. Comparing the results of the balancing curves obtained on stage 6 with those obtained in the flight tests. Identifying the maximum deviation of the simulator. Making conclusion about the test result.

Adjusting the actual performance data of the simulator in accordance with the tolerance limits determined by the requirements of validation tests CS-FSTD(H) is used as a method for refining the parameters of the mathematical model of the complex helicopter simulator.

Determining the list of available (obtained as a result of flight tests) characteristics of stability and control, performance data and field performance for refining the parameters of the mathematical model of the complex helicopter simulator is performed by comparing the list of required characteristics and parameters contained in CS-FSTD(H) with corresponding characteristics and parameters contained in the Helicopter Test Acts.

**Conclusions.** Thus, the developed training complex is certified according to the rules of CS-FSTD, implemented in batch production of SPA "AVIA" and accepted for supply by the Armed Forces of Ukraine, in accordance with the Order of the Minister of Defense of Ukraine. To make validation tests automatic, the software package TSFlightChart has been developed. The next stage of the software and hardware complex development should be the development and implementation of an automatic flight control system, enabling automatic validation tests. This, in turn, will significantly accelerate validation tests and reduce their cost.

### References

1. *Opređenje i klasifikacija ošibok pilota [Definition and classification of pilot errors]* (2014). Retrieved from <http://avia.pro/blog/opredelenie-i-klasifikaciya-oshibok-pilota>.
2. Doc 9625. *Rukovodstvo po kriterijam kvalifikacionoi otsenki trenazhernykh ustroystv imitatsii poleta [Guidance on qualification assessment criteria for simulated flight simulators]*. (2014). Vol II. Vertolety – Vertolety. 999 University Street, Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7.
3. Certification Specification for Helicopter Simulation Training Devices (CS-FSTD(H)). Initial issue, 26 June 2012, European Aviation Safety Agency.
4. Akt №2/94102-007 po kontrolnym ispytaniyam vertoleta Mi-8MT po opredeleniyu kharakteristik ustoychivosti i upravlyemosti letno-tekhnicheskikh i vzletno-posadochnykh kharakteristik [Akt №2/94102-007 for control tests of the mi-8mt helicopter to determine the stability and controllability characteristics of flight technical and take-off and landing characteristics] (1997). DANVC ZSU.
5. *Udoskonalennia matematychnoi modeli kompleksnoho trenazheru vertoliota typu Mi-8MTV [Improvement of mathematical model of complex Mi-8MTV of Ukraine helicopter simulator]* (2015). DNVC ZS Ukrainy.
6. Spravka po identifikatsii grazhdanskikh vertoletov Mi-8MTV i Mi-172, Mi-8AMT i Mi-171 № 2738 ot 09.06.04 [Information on the identification of civil helicopters Mi-8MTV and Mi-172, Mi-8AMT and Mi-171 No. 2738 dated 06.09.04]. Moscow Helicopter Plant named after M.L. Milia, 107113, Russia, Moscow, Sokolnichesky Val, 2, mvz@mi-helicopter.ru.

УДК 629.735.45

*Олександр Андрієнко, Микола Гученко, Володимир Зінченко, Олександр Жорняк*

### ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС КВАЛІФІКАЦІЙНОГО ОЦІНЮВАННЯ ТРЕНАЖЕРА ВЕРТОЛЬОТА МІ-171

*Актуальність теми дослідження.* Безпека польотів є актуальною практичною проблемою, від вирішення якої залежить майбутнє України, як транспортної держави. В результаті технічного прогресу авіаційна техніка стає все більш досконалою і надійною. Однак, постійно збільшується інтенсивність впливу на людину різноманітних

несприятливих факторів, зокрема інформаційних перевантажень. Статистика свідчить, що до 80 % аварій та катастроф стається через помилки пілота. Причому, причиною біля 35 % з цих помилок є недостатня професійна підготовка, і ще близько 40 % помилок мають причиною недосвідченість екіпажу.

**Постановка проблеми.** Для забезпечення можливості отримання підготовленим екіпажем відповідних офіційних документів про рівень професійної підготовки тренажер має бути сертифікований за національними та світовими вимогами, тобто має бути гарантована адекватність його пілотажних якостей відповідним якостям модельованого вертольота.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Були розглянуті останні дослідження, принципи і підходи до кваліфікаційного оцінювання комплексних льотних тренажерів вертольотів згідно з вимогами ЄС (CS-FSTD(H)) та ІКАО (Doc 9625).

**Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми.** Інформаційна модель тренажера повинна якомога менше відрізнятися від інформаційної моделі реального вертольота. Відповідно, базисними компонентами тренажера є системи імітації, що забезпечують вплив на органи відчуттів екіпажу інформації для створення адекватної картини польоту, у тому числі: зір – система візуалізації, пілотажно-навігаційні прилади, тощо; слух – система імітації авіаційних шумів; вестибулярний апарат – система рухливості; тактильний канал – система завантаження важелів керування. Для забезпечення роботи комплексного льотного тренажера розроблено нелінійні математичні моделі динаміки вертольота, на основі модифікованого методу дискретних вихорів, які описують об'ємного компонування гвинтокрилого апарата і дозволяють моделювати політ у реальному масштабі часу на різних режимах, включаючи «закритичні».

**Постановка завдання.** Перераховані системи формують інформаційну модель тренажера, яка повинна бути скоординована з рухом вертольота. Цю координацію забезпечує математична модель динаміки руху вертольота й моделі функціонування вказаних систем.

**Мета роботи.** Аналіз процедури валідаційних випробувань тренажера.

**Виклад основного матеріалу.** Керівництвом з критеріїв кваліфікаційного оцінювання тренажерних пристроїв імітації польоту [2] визначені наступні рівні адекватності: "N (None або Not Applicable)" - не вимагається; "G (Generic)" - базовий; "R (Representative)" - типовий; "S (Specific)" - високий. Зокрема, високий рівень адекватності S означає, що імітується вертоліт конкретного типу, а початкові і періодичні валідаційні оцінювання слід проводити на основі об'єктивного порівняння даних тренажера з затвердженими даними вертольота. Необхідно оцінювати характеристики FSTD, які мають важливе значення для підготовки, тестування та перевірки членів льотних екіпажів. Вони включають реакцію FSTD в поздовжньому і боковому напрямках руху; льотно-технічні характеристики при виконанні льоту, в режимах висіння і переміщення, на етапах набору висоти, крейсерського польоту, зниження, заходу на посадку і посадки з працюючими двигунами і на режимі авторотації; при виконанні всепогодних польотів, а також перевірки систем управління; і, у разі необхідності, перевірки функцій, які виконуються на робочих місцях пілотів і інструктора. Для гарантії правильності функціонування оцінюється також робота систем імітації акселераційних, вібраційних, візуальних і звукових впливів.

Валідаційними даними льотних випробувань вважаються льотно-технічні характеристики, характеристики стійкості і керованості та інші необхідні параметри, зареєстровані на вертольоті за допомогою тарованої системи накопичення даних, що має достатню роздільну здатність і експериментально доведена точність, що дозволяє сформулювати набір відповідних параметрів, з якими можна порівняти аналогічні параметри FSTD.

**Висновки відповідно до статті.** Наводиться алгоритм отримання висновку про результат проходження для одного з тестів.

**Ключові слова:** безпека польотів; помилки пілота; льотний тренажер; інформаційна модель; валідаційні випробування.

Рис.: 1. Табл.: 1. Бібл.: 12.

**Andrienko Oleksandr** – PhD in Psychological Sciences, senior Researcher, State Research Institute of Tests and Certification of Armaments and Military Technique of the Armed Forces of Ukraine (1 Striletska Str., 14033 Chernihiv, Ukraine).

**Андрієнко Олександр Віталійович** – кандидат психологічних наук, старший науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (вул. Стрілецька, 1, м. Чернігів, 14033, Україна).

E-mail: Flater2009@ukr.net

**Huchenko Mykola** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Scientific and production association "AVIA", Ltd. (2/27 Leonova Str., 39612 Kremenchuk, Ukraine).

**Гученко Микола Іванович** – доктор технічних наук, професор, старший науковий співробітник, Науково-виробниче об'єднання «АВІА» (вул. Леонова, 2/27, м. Кременчук, 39601, Україна).

**Zinchenko Volodymyr**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Scientific and production association "AVIA", Ltd. (2/27 Leonova Str., 39612 Kremenchuk, Ukraine).

**Зінченко Володимир Павлович**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Науково-виробниче об'єднання «АВІА» (вул. Леонова, 2/27, м. Кременчук, 39601, Україна).

**Жорняк Олександр Валерійович**, інженер-програміст, Науково-виробниче об'єднання «АВІА» (вул. Леонова, 2/27, м. Кременчук, 39601, Україна).

**Zhorniak Oleksandr**, software engineer, Scientific and production association "AVIA", Ltd. (2/27 Leonova Str., 39612 Kremenchuk, Ukraine).

*Michal Kelemen, Lukas Bobal*

## TRACKED ROBOT FOR CLEANING OF PIPE

**Urgency of the research.** Service robot is as device which is currently used for standard works as cutting the grass or vacuum cleaning and also teleoperation robot which is remote controlled by human for special tasks as exploring, bomb removing, rescue action etc. Tendency is substitute human in dangerous or monotonous works via using of robots.

**Target setting.** Tracked robot is designed for cleaning of pipe, which has inner pipe wall covered by sediments. The typical example is chimney, where carbon particles cover the pipe wall. Carbon particles can start burning process with result of total damaging of chimney and also building. Pipe robot can be used as practical aid for cleaning and inspection of pipes.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Other similar task is repairing of damaged inner pipe wall. Robot which repair pipe from inside pipe saves the costs for site excavation works.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** The questions of the design of pipe repairing robots are uninvestigated, because the next research will be focused to this.

**The research objective.** In-pipe robot is as device for locomotion inside pipe with aim to make inspection or cleaning of inner surface of pipe wall. Tracked robot is designed because of better properties as overcoming of problematic places inside pipe and also lower normal force between the tracks and inner pipe wall.

**The statement of basic materials.** Tracked segments are pressed to inner pipe wall and normal force is controlled by controller on the base of measurement of normal force. Cleaning brush module is connected to robot for dirties removing. CCD camera for inspection can be also connected to robot.

**Conclusions.** The cleaning robot is important device for service of pipe systems as prevention of pipe damage of other negative phenomena. Contribution of this robot is significant, because it saves money and time.

**Keywords:** Mobile robot; locomotion; pipe; cleaning; parallelogram; chimney.

Fig.: 10. References: 17.

**Introduction.** Service robotics are often used for various activities as cutting the grass, vacuum cleaning, swimming pool cleaning, mine exploring, mars exploring, bomb destroying etc. It is activities which are very monotonous, tiring, very difficult or dangerous for human. The main idea is to help us with hard work. Special case is when robots work in highly dangerous application as munition destroying, nuclear power plant, defensive mine countermeasures [1-10].

There are many various application, where is a need of any cleaning and inspection of pipe wall as prevention of accident with great impacts. The pipe is used for transporting of any medium inside pipe. The problem is when a sediments occur on inner pipe wall. Also if pipe is made from a corrosive material, it is necessary to inspect state of inner pipe wall. Chimney is also as pipe, which has to be cleaned and checked for cracks. Steam generators in nuclear power plants consist of many pipes, which have to be periodically inspected for micro cracks as prevention of radioactivity leaks. Heat exchanger also includes bended pipes, which have tendency to be covered by sediments.

Exploring of these pipes can be executed via using of in-pipe robots (fig. 1). In-pipe robot is able to locomote inside pipe with any aim.

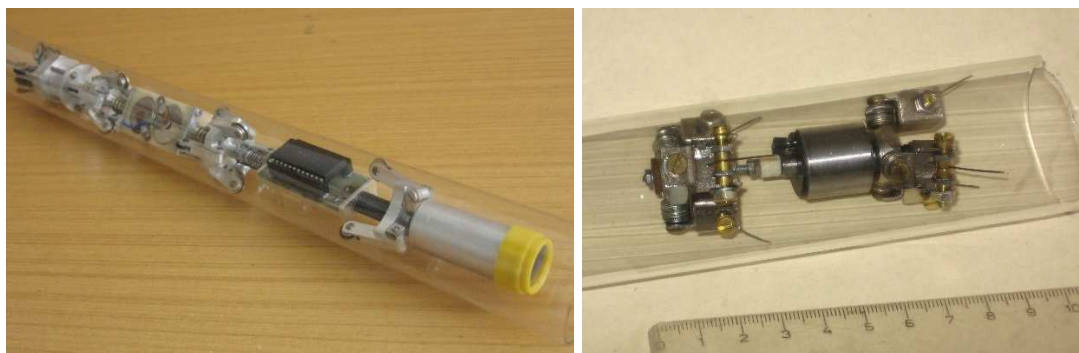


Fig. 1. In-pipe robots

**1. Design of robot concept.** Pipe systems also has technological changes of inner pipe diameter and also construction barriers as diameter reduction, elbow, T-joint etc. All these mentioned factors are as problem for design of in-pipe robots.

Situation is also complicated when pipe is underground. Using of in-pipe robot decreases the need of site excavation works, which cause the problems for our streets, for traffic, for people, for environment etc. So using of in-pipe robots reduces costs for earth works.

The main subject of this paper is pipe cleaning robot for inner pipe diameter in range from 130mm up to 200mm. The main concept of robot is shown on (fig. 2). The concept proposes the adjustable in-pipe robot, which is able to adapt to inner pipe diameter for optimal locomotion inside pipe. Robot is loaded with own weight. Normal force between the wheels and inner pipe wall should be controlled for achieving of optimal tracking velocity and force. If normal force is low, then friction force is low and wheels slipping occur and also completely falling down of robot can occurs. When normal force is too large, then friction force is very large and robot is blocked and it cannot locomote inside pipe.

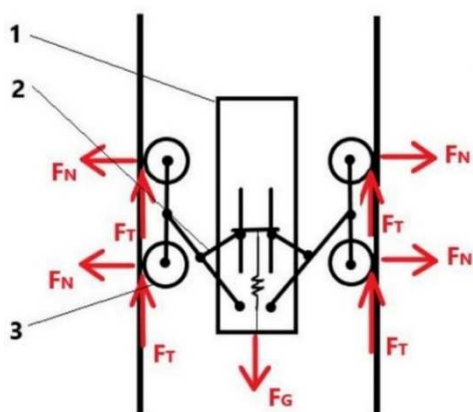


Fig. 2. Concept of wheeled in-pipe robot:  
1 – robot body; 2 – adjusting mechanism; 3 – wheels

Increasing of normal force can damage inner pipe wall, because contact area is too small. This problem can be solved via using of tracked in-pipe robot (fig. 3). Tracked segments have bigger contact area and local stress on inner pipe wall will be less and it reduces risk of pipe damage.

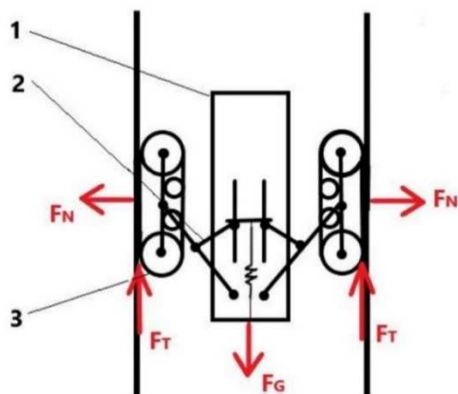


Fig. 3. Concept of tracked in-pipe robot:  
1 – robot body; 2 – adjusting mechanism; 3 – tracks

Tracked concept (fig. 3) has been selected, because of mentioned reasons. Figure 3 shows concept only with two arms pressed against the wall. For higher stability is better to design three arms (fig. 4). If angle between arms is 120°, then forces between pipe wall and arms are the same. It is result from static force analysis.

$$\begin{aligned} -R_2 \cdot \cos 30^\circ + R_3 \cdot \cos 30^\circ &= 0 \\ -R_1 + 2 \cdot R_2 \cdot \sin 30^\circ &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

Result from this set of equation is:

$$R_1 = R_2 = R_3 \tag{2}$$



It means that in every case these forces are in balance and this concept is self-centered inside pipe defined with contact points on inner pipe wall.

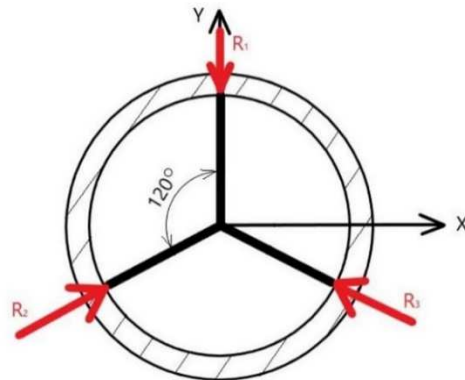


Fig. 4. Arrangement of tracked arms on robot body

**2. Kinematic of robot arms.** The main requirement is that normal force on pipe wall should be adequate. Second point is need of adjustability to inner pipe diameter. Parallelogram mechanism has been selected for design of arms on robot body. The proposed mechanism is able to adapt to inner pipe diameter in range from 120 mm up to 200 mm.

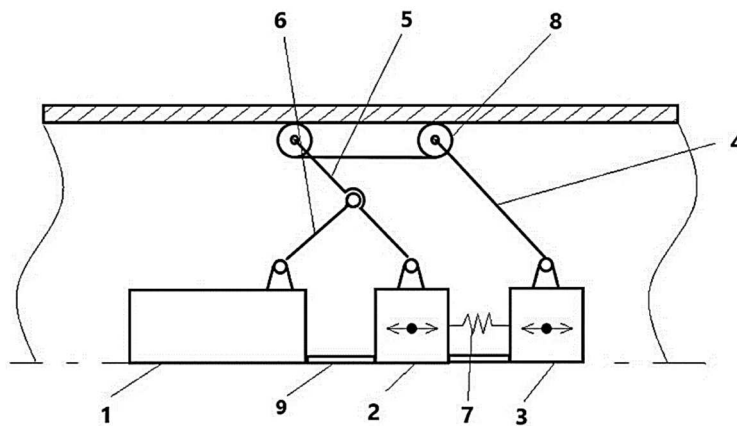


Fig. 5. Kinematic of arms on robot body:  
1-robot body; 2, 3 – sliding body; 4, 5, 6 – parallelogram arms;  
7 – spring; 8 – tracked segment; 9 – sliding guide

The proposed kinematic (fig. 5) works as follow. Sliding guide (9) is fixed to robot body (1) and sliding bodies (2) and (3) are able to move on this guide. Moving of sliding bodies (2) and (3) cause the movement of arms (4), (5) and (6). Sliding bodies are connected with spring (7), which can compensate the irregularities on inner pipe wall.

Basic dimensions of mechanism is shown on figure 6.

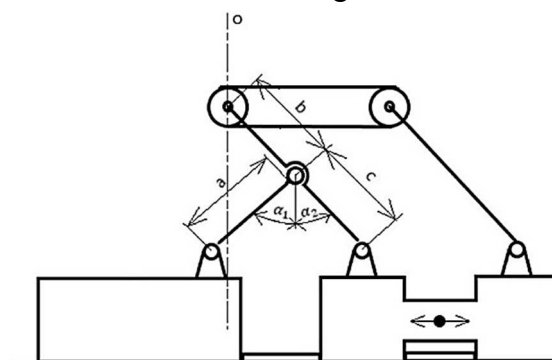


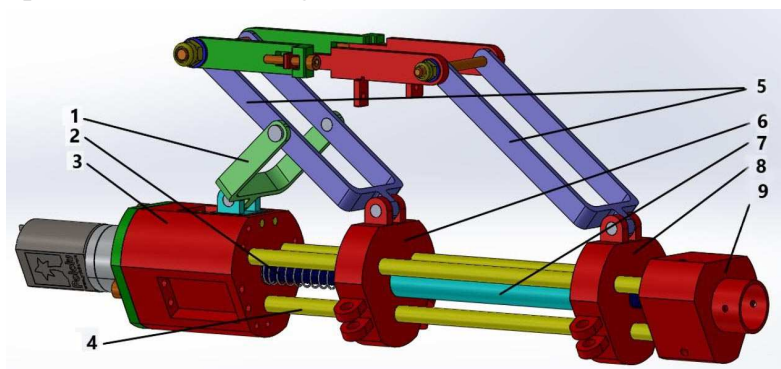
Fig. 6. Basic dimensions of mechanism

Functionality of proposed mechanism is based on fact that arms (4) and (5) on figure 5 are equal. For obtaining of right position of centre of gravity is proposed that members  $a = b = c$  (fig. 6).

If robot locomotes to the up, then the requirement is that friction force between tracks and pipe wall should be higher than gravity. In other case robot will fall down.

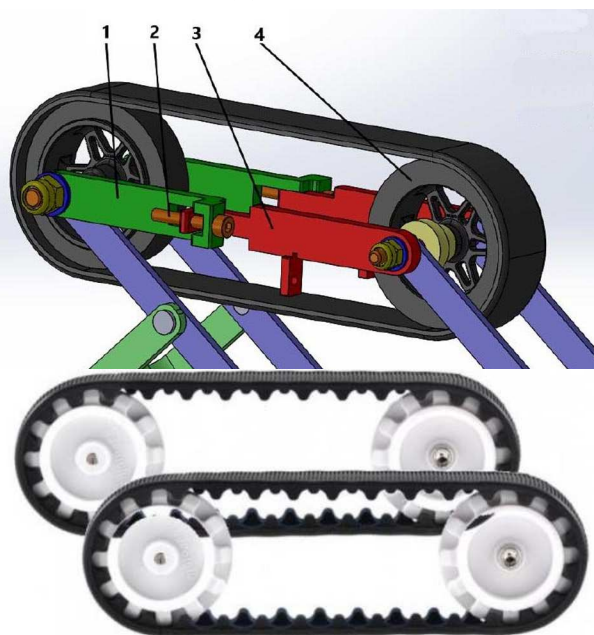
$$F_t > G \quad (3)$$

**3. Design of parallelogram arms.** Parallelogram mechanism (fig.7) consists of several parts. It is used for change of displacement of track segments and also change of normal force between the track segments and inner pipe wall. Short arm (1) is connected by joint to basic frame (3). Guiding slide rods (4) are also connected to basic frame (3). Sliding members (6) and (8) can move on sliding rods (4). Sliding members (6) and (8) are placed on thin pipe (7) which can move on screw rod (2). Member (6) has inner thread which interacts with screw rod (2). Rotating of screw rod (2) causes the moving of the member (6) together with member (8). End of slide rods (4) are fixed on flange (9). Arms (5) are connected via joint to the members (6) and (8). Consequently, rotating of screw rod (2) causes the moving of the arms (5) and desired displacement of track segment.



*Fig. 7. Parallelogram mechanism*

Track segment (fig. 8) is contact system between robot body and inner pipe wall. Plates (1) and (3) together with adjusting screw (2) compose the setting up mechanism for adjusting of distance between axes of track wheels (4).



*Fig. 8. Track segment*

Servomotors are used as drive unit for adjusting of parallelogram and also as drive for tracked segments. The robot also can carry the cleaning brush (fig. 9) for cleaning of inner pipe wall. It is connected on the end of flange. This brush also helps to improve the stability inside pipe. This cleaning module can be dismantled and camera module can be placed on the flange. The robot also includes sensors for detection of inner pipe wall and also collision sensors and sensors for detection of normal force between the pipe wall and track segments.

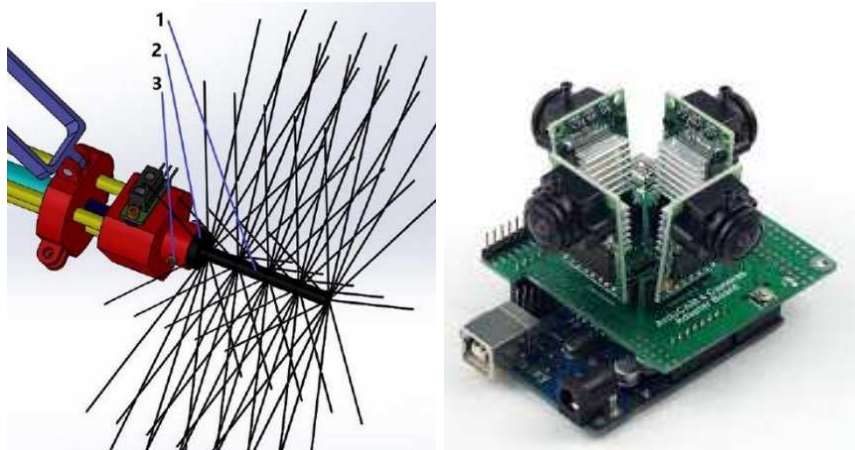


Fig. 9. Cleaning brush and camera module

**4. Overall composition of pipe robot.** Completed robot can consist of two or more segments with adjustable track segment as it shown on fig. 10. Connecting of more modules ensures the better overcoming of T-joint and other obstacles inside pipe.

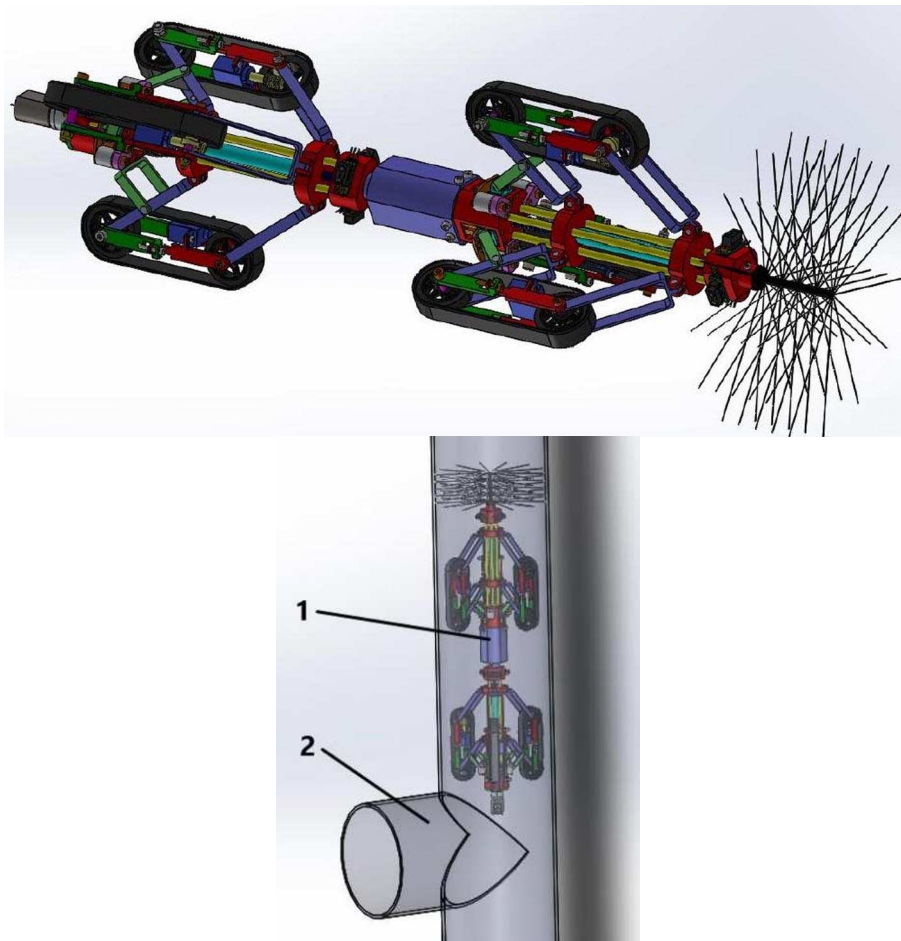


Fig. 10. Composition of robot

**5. Final robot realization.** Robot is controlled as teleoperation system but it has also automatic function as overcoming of T-joint, self-protection against the falling down, automatic adjusting of normal force on inner pipe wall, etc.

**Conclusion.** Proposed robot has important role for chimney sweeper as assistive device for cleaning and also inspection. The main contribution is lied on fact that it is applicable from service door entry on chimney and human doesn't need to go on house-top. This is a typical example where robot helps to make dangerous work instead of human. Human became as application technician [11-16].

**Acknowledgement.** *The authors would like to thank to Slovak Grant Agency – project KEGA 018TUKE-4/2018, and VEGA 1/0872/16 supported by Ministry of Education of Slovak Republic.*

### References

1. DEGANI, A., FENG, S., CHOSET, H., and MASON, M. T. (2010). Minimalistic, Dynamic, Tube Climbing Robot, In Proc. of 2010 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation Anchorage Convention District, May 3-8, 2010, Anchorage, Alaska, USA, pp. 1100-1101.
2. REN, T., LIU, Q., LIU, Y., CHEN, Y. (2017). Design, analysis and innovation in variable radius active screw in-pipe drive mechanisms. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 2017; vol. 14, issue 3, First Published May 8, 2017. doi 10.1177/1729881417703564.
3. YANG, J., XUE, Y., SHANG, J., LUO, Z. (2014). Research on a New Bilateral Self-locking Mechanism for an Inchworm Micro In-pipe Robot with Large Traction, *International Journal of Advanced Robotic Systems* 2014; vol. 11, 10, First Published January 1, 2014. doi 10.5772/59309.
4. TREBUŇA, F., VIRGALA, I., PÁSTOR, M., LIPTÁK, T., MIKOVÁ, Ľ. (2016). An inspection of pipe by snake robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 2016; vol. 13, issue 5, First Published October 24, 2016.
5. BABINEC, A., DEKAN, M., DUCHON, F., et al. (2012). Modifications of VFH navigation methods for mobile robots. *Procedia Engineering*. 48 (2012), pp. 10-14. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.09.478.
6. SIMONOVA, A., HARGAS, L., KONIAR, D. (2017). Uses of on-off controller for regulation of higher-order system in comparator mode. *Electrical Engineering*. 99 (4), pp. 1367-1375. DOI: 10.1007/s00202-017-0610-7.
7. DUCHON, F., HUNADY, D., DEKAN, M. et al. (2012). Optimal navigation for mobile robot in known environment. 11th International Conference on Industrial, Service and Humanoid Robotics (ROBTEP 2012) Location: Strbske Pleso, Slovakia. pp. 33. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.1000.33.
8. KONIAR, D., HARGAS, L., LONCOVA, Z., ET AL. (2017). Visual System-Based Object Tracking Using Image Segmentation For Biomedical Applications. *Electrical Engineering*. 99 (4), PP. 1349-1366. DOI: 10.1007/S00202-017-0609-0.
9. GMITERKO, A., KELEMEN, M., KELEMENOVÁ, T., MIKOVÁ, Ľ. (2010). Adaptable Mechatronic Locomotion System. *Acta Mechanica Slovaca*. 14 (2). pp. 102-108.
10. KONIAR, D., HARGAS, L., SIMONOVA, A. et al. (2014). *Virtual Instrumentation for Visual Inspection in Mechatronic Applications*. 6th Conference on Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems (MMaMS) Location: Vysoke Tatry, SLOVAKIA Date: NOV 25-27, 227-234.
11. DUCHOŇ, F., HUBINSKÝ, P., HANZEL, J., BABINEC, A., & TÖLGYESSY, M. (2012). Intelligent Vehicles as the Robotic Applications. *Procedia Engineering*, 48 (2012), 105–114. doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.492.
12. KONIAR, D., HARGAŠ, L., & ŠTOFAN, S. (2012). Segmentation of Motion Regions for Biomechanical Systems. *Procedia Engineering*, 48 (2012). 304–311. doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.518.
13. TURYGIN, Y., & BOŽEK, P. (2013). Mechatronic systems maintenance and repair management system. *Transfer of innovations*, 26 (2013). 3-5.
14. SPANIKOVA, G., SPANIK, P., FRIVALDSKY, M. et al. (2017). Electric model of liver tissue for investigation of electrosurgical impacts. *Electrical Engineering*, 99 (4). 1185-1194. doi.org/10.1007/s00202-017-0625-0.
15. JANOS, R., DOBIAS, D. (2018). Design of industrial robot with increased locomotion. *Technical sciences and technology*. No. 4 (14), 2018. ISSN 2411-5363 (Online) | ISSN 2519-4569 (Print). DOI:10.25140/2411-5363-2018-4(14)-95-100.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

16. GMITERKO, A., MIKOVÁ, L., PRADA, E. (2018) Analysis of air-spring for a link of hyper-redundant manipulator. *Technical sciences and technology*. No. 4 (14), 2018. ISSN 2411-5363 (Online) | ISSN 2519-4569 (Print). DOI: 10.25140/2411-5363-2018-4(14)-66-77.

17. VIRGALA, I., FILAKOVSKÝ, F. (2018) Concertina locomotion of a snake robot in the pipe. *Technical sciences and technology*. No. 4 (14), 2018. ISSN 2411-5363 (Online) | ISSN 2519-4569 (Print). DOI:10.25140/2411-5363-2018-4(14)-109-117.

УДК 004.4

Міхал Келемен, Лукаш Бобал

## ГУСЕНИЧНИЙ РОБОТ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ТРУБ

**Актуальність теми дослідження.** Службовий робот – це такий пристрій, який в даний час застосовується як для стандартних робіт, таких як підстригання трави або вакуумне очищення, так і в якості телеопераційного робота, що дистанційно керується людиною для виконання спеціальних завдань, зокрема, дослідження, знешкодження бомб, рятувальні дії тощо. Задумом є заміна людини у небезпечних або монотонних роботах через використання робота.

**Постановка проблеми.** Гусеничний робот призначений для очищення труби, яка має покриття осадами внутрішню стінку. Типовий приклад – димохід, де частинки вуглецю покривають стінку труби. Частинки вуглецю можуть спричинити процес горіння разом із повним пошкодженням димоходу, а також будівлі загалом. Трубний робот може бути використаний як практичний засіб для очищення та огляду труб.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Іншим подібним завданням є ремонт пошкодженої внутрішньої стінки труби. Робот, який ремонтує трубу зсередини, економить витрати на проведення робіт по викопуванню майданчика.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Питання проектування роботів з ремонту залишається невивченим, тому наступне дослідження буде зосереджено саме на цьому.

**Постановка завдання.** Робот-очисник труб є пристроєм для переміщення всередині труби з метою огляду або очищення внутрішньої поверхні стінки труби. Гусеничний робот розроблений завдяки кращим властивостям, оскільки долає проблемні місця всередині труби, а також знижує нормальну силу між доріжжками та внутрішньою стінкою труби.

**Виклад основного матеріалу.** Гусеничні сегменти притискаються до внутрішньої стінки труби, а сила контролюється контролером на основі вимірювань нормальної сили. Модуль щітки для чищення підключений до робота для видалення бруду. Для огляду до робота можна також підключати CCD-камеру.

**Висновки відповідно до статті.** Очисний робот є важливим пристроєм для обслуговування трубних систем для запобігання пошкодженню труб іншими негативними явищами. Внесок цього робота є вагомим, оскільки він економить фінанси та час.

**Ключові слова:** мобільний робот; переміщення; труба; очищення; паралелограм; димохід.

Fig.: 10. References: 17.

**Kelemen Michal** – professor, PhD in Technical Sciences, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Келемен Міхал** – професор, кандидат технічних наук, Технічний університет Кошице (Letna 9, 04200 Košice, Slovak Republic).

**E-mail:** michal.kelemen@tuke.sk

**Researcher ID:** J-2845-2013

**Scopus Author ID:** 8396804800

**Lukas Bobal** – PhD graduate, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Лукаш Бобал** – аспірант, Технічний університет Кошице (Letna 9, 042 00 Košice, Slovak Republic).

UDC 004.4

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-62-67

Rudolf Jánoš

## ANALYSIS OF RESCUE ROBOTS

**Urgency of the research.** The analysis shows that besides keeping pace in “classic” applications of robots (industrial robots) for manufacturing (engineering) industrial processes, at the same time the applications tend to concentrate mainly in the so-called non-engineering industrial and non-manufacturing (service) industries.

**Target setting.** Trends bring functional and constructional new requirements for robots and their applications, especially those related to the efficient usability of robots in new segments of the non-manufacturing and service sector.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Actual research is nowadays focused at such problematics, because return of investments based on robotic devices seems to be reliable and people at workplace can realize and focus to another type of tasks.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Within this sector, it is primarily the area of rescue, where service robots have to overcome various obstacles in the performance of their activities, get into hard-to-reach and dangerous places, etc. depend mainly on its conceptual solution.

**The research objective.** Given that the company's priority is to continually improve its products, this group of robots is also looking for new innovative approaches that would improve the conceptual solutions of service robots and their operation in the application space. On this basis, it can be assumed that this aspect of continuous innovation opens up a large number of possibilities for new improvements to this group of robots.

**The statement of basic materials.** The emergence of this group of robots was conditioned by the requirements of practice, which required the concept of robots to be incorporated into non-industrial and non-production areas where robots would only perform activities that would be useful to humans or to technical and operational systems. For these reasons, the first designs of these robots began to emerge, which have been continuously improved over time and adapted to the needs of practice to such an extent that today they are an integral part of the service industry.

**Conclusions.** Mobile robotic systems are currently under intensive development. Variety brings service activities in service robotics need to use different principles for dealing with their mobility. The most prevalent application of the principle of a wheeled chassis. In terms of theory as well as technical solutions are the most sophisticated wheeled chassis and most widely used in service robotics. This work is developed in the direction of the current service robotics and the essential characteristics and problems associated with the solution that we applied in the educational process.

**Keywords:** Service robot; mobility subsystem; undercarriage; rescue robots.

Fig.: 4. References: 12.

**Introduction.** Until recently the use of service robots for protection and human health (police and emergency services, fire departments, protecting against terrorism ...) were seen as cost-consuming experiment. The current global security situation in the world, as well as the reality of geographical and operational disasters (terrorist attacks, trade in hazardous materials, natural disasters, natural disasters, traffic accidents, ...) and in particular their adverse developments radically changed their minds and activities to use the service robots in the execution of the corresponding safety and rescue actions, as well as the performance of preventive and responsive exploration activities. Despite their wide use, rescue service robots are considered a costly experiment. Nevertheless, they have found their application mainly in hazardous environments and situations such as fires, floods, earthquakes, rescue, ie in various types of geographical and operational disasters. The rescue work in these disasters is considered to be a race against the clock, where the rescuer - robot must move fast enough to save as many living people as possible, but on the other hand, move without causing further damage or threats to human life.

**Analysis of current IED and EOD service robots.** Conceptual evaluation of solutions of individual modules was done by references leading manufacturers and service robots with their custom applications. The basic objective of the SR application in this area is to save human lives as well as to investigate life-threatening environments. Another reason is the ability of the Slovak Republic to get into spaces and places where one could not get and would be dangerous for him. The deployment of the Slovak Republic at the level of rescue services can be explained mainly by the nature of the risks related to the performance of the corresponding activity and the relation to human beings. These risks are:

- Risk from poor knowledge of the terrain and space of the event;
- Risk of not recognizing the rescue facility;
- The risk of an unknown state of danger of the intervention environment;
- As well as the risk of an unrecognized actual rescue situation and conditions for carrying out rescue activities.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

In addition to the advantages of using these robots in this area, their application also brings disadvantages and unpleasant consequences, which can be characterized from two points of view:

- Failures to perform tasks that result from a person being excluded from decision making;
- In terms of the morality of the performance associated with the risks of above-average autonomy of the MSR in its performance and performance of the desired task.

The application possibilities of these robots can be explained on the model, which gives space for the classification of SR, which are suitable for application in the safety sector, but also for the compilation of the type series of robots for service tasks.

The robots can be deployed in the rescue area by deploying robots in locations that require direct performance of activities. These places respectively areas are:

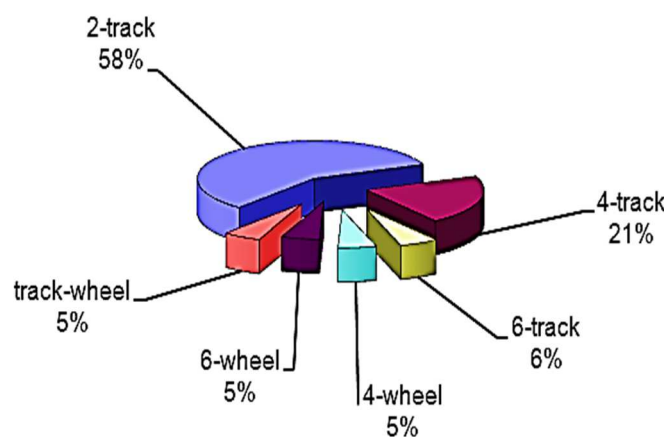
Inspection and monitoring of the area and objects - the application is similar to that of the same segment of the security sector, but the difference is in the effects and technologies of the performance of monitoring and control as well as in the area and object of control. These applications are characterized by streamlining control performance as well as eliminating the mentally and physically strenuous control activities performed by man.

Rescue actions - the application is characterized by a high degree of operational risk and a high degree of readiness, with the aim of reducing the risks of performing rescue activities, eliminating demanding procedures of human intervention as well as trying to increase the independence and safety of performing intervention procedures.

Handling of hazardous material - the application is oriented to the performance of handling activities with designated hazardous material such as explosives, chemicals, unknown objects, etc., but it is also possible to monitor the degree of material risk or disposal of this material. The main objective of the application is to increase the safety of the implementation of procedures for handling and disposal of hazardous materials. Performance of given tasks is bound to confined space, inaccessible and dangerous space.

The conducted survey shows:

1. The basic principle of generating movement is where the movement of non-standard indoor and outdoor environments are the most commonly used tracked undercarriages, a 2, 4 and 6 band versions. Wheeled trucks are used rather to move on urbanized terrain. What is interesting is the combination of wheel and belt (f. REMOTEC) and can take advantage of the belt and the wheel to the terrain in the area of deployment, fig. 1 [3].



*Fig. 1. Representation of service robots according to the principle of movement*

For the design of the SR for deployment in the security services are the most typical of the following: As a source of energy Fig. 2, the most commonly used batteries, but mostly with robots for firefighting often use an external power source. To improve battery performance using the hybrid system, where the combustion engine recharges the battery cells.

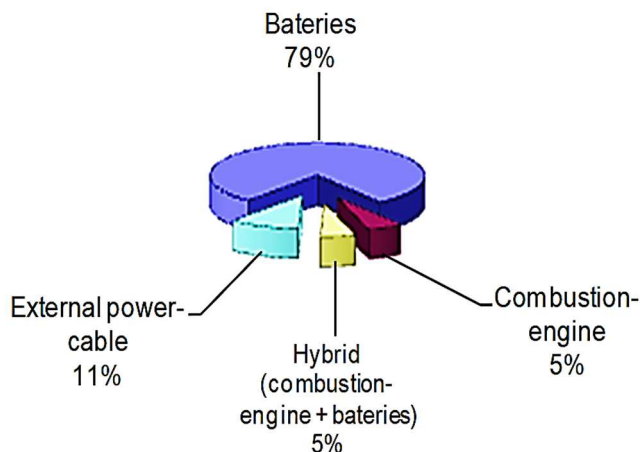


Fig. 2. Representation of service robots according to the source of energy

In Figure 3 the evaluation of climbing ability, we found that the greatest percentage of hill-starting ability of robots to 45 degrees and 47%. Robots from the hill-starting ability 40 ° up 24%, the rest are hill-starting ability of robots to 30 °.

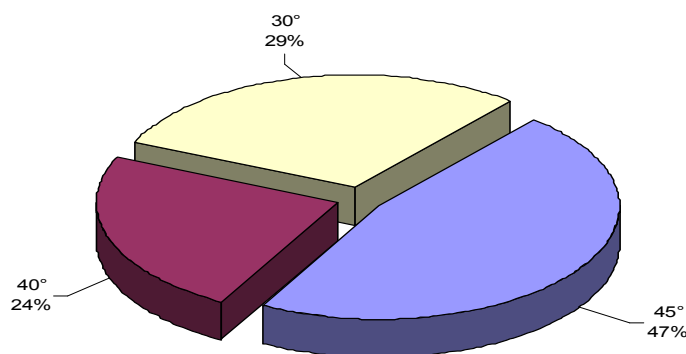


Fig. 3. Maximum gradeability of service robots

In the evaluation of velocities, we found that the largest share of the robots at 5 to 10 km / h. The type used are represented in virtually all known concepts of 1 ° to 6 ° of freedom. Preval arms with 2 ° and 4 ° degrees of freedom. In terms of the kinematic pairs, the most common rotation axis.

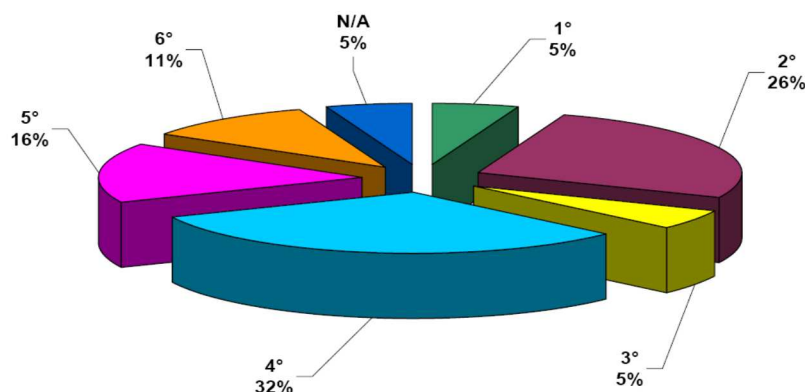


Fig. 4. Number of degrees of freedom of action of the superstructure

The abundance of arms to the base of the overriding concept of action with one arm (79% rated agents), especially in the category Fire and prieskumnických robots. Contrast, double-arm approach prevails in the category of heavy vyslobodzovacích robots.



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Note: The arm was treated for fire-fighting robot machine with a nozzle for extinguishing medium with at least 1 degrees of freedom.

Evaluation of the presence of effector and technical execution points to the fact that the effector is used most gripping in the 2-finger concept. Even if the equipment arm device for the automatic exchange of effector in most cases were listed as primary footed tentacles.

3. The vast majority of SR is controlled by the operator if necessary. teleoperator, which controls the movement and application hit the robot from a safe distance.

4. The development and production of service robots is required close cooperation with manufacturers of robots - mostly producers of service robots in the field of terrorism. Thus many companies unifies its new mobile chassis for use in different applications. The process of unification is often initiated by manufacturers and service robots. The most comprehensive approach in this area, attesting to the company QinetiQ.

By researching the conceptual solutions of the Slovak Republic in this area, where we focused mainly on the mobility subsystem, we obtained conclusions that can be written into the following points:

- Service robots are approximately equally represented in all rescue applications (inspection and monitoring, rescue operations, hazardous materials handling).
- The most used concepts are built on a crawler chassis in 2, 4 and 6 crawler versions.
- Applications on wheeled chassis in 4 and 6 wheel versions are also used, as well as applications based on a 6-foot walking chassis.
- Possibility to use a conceptual solution based on a hybrid system, such as a walking-wheel system.
- The most commonly used power source is a battery or battery. external power source - cable (fire extinguishing).
- Some applications are also based on a hybrid system (improving battery life).
- The maximum speed of the SR is in most cases from 5 - 10 km / h
- Service robots with the 45% climb rate are the most represented in the rescue sector.
- Arms with 4 ° - 6 ° freedom are predominantly used.
- Single arm concepts are applied in inspection and reconnaissance and firefighting
- Two-arm concepts are mainly applied in the field of rescue and hazardous materials handling.
- Service robots control is based on operator or teleoperator control.
- The most common way of communication is based on WiFi technology.

**Recommendations for designing EOD and IED robots.** Analysis of the current implementation of SR in this field allows formulating the framework conditions for SR, but also specifically bound by the requirements to perform specific tasks. Requirements can be summarized for each sub-SR as follows:

- mobility subsystem solved by belt-type locomotion system because the benefits provided by this solution (specific surface pressure, permeability, maneuverability, Wading depth ...). Motion control is recommended to solve the differential form of governance that meets the desired range of speed of movement (3, respectively. 5 ms<sup>-1</sup>) and the minimum turning radius. The proposed solution is recommended to structurally solve a manner that the degree of resistance (degree of protection, resistance to environmental factors ...).

- action extension (as is clear from the submission) as a single-deal - the kinematics of the action mechanism is recommended to deal with 6 degrees of freedom with angular workspace. Since our body is assumed as a modular solution, are permitted other kinematic arrangement pairs. It is recommended to resolve system stability of the subsystem mobility in relation to the maximum reach and capacity of each of the planned arms. The end effector is recommended to deal with the needs of a particular application of determining the arm. Consider the possibility of a need for an automatic exchange of the end effector, respectively tools.

- intelligent control subsystem teleoperator deal with the possibility of autonomous management tasks. Communication with the robot operator dealt with in accordance with the

compatibility interface bus systems with open architecture. Sensor Used to guarantee the required communication with the working and operating environment.

- sensor subsystem in relation to a report by the internal sensors to solve application usage on the monitored parameters and mechanism function (accuracy, range of measured values, for the principle of scanning parameters, performance measurement, performance monitoring, ...); in relation to the compatibility of the control-control system according to the interface (mechanical, electrical, programming, data transfer); prepare outputs from the sensors for management purposes;

- set of external sensors addressed by technology and the role of controlling environmental factors, respectively. Role of service performance parameters (sensitivity, sensing principle for variables, functions, monitoring, alarm function, night vision, thermography, virtual 3D gloves, 3D cameras, etc.).

- in relation to the performance features to address the operating range for diluted version of the cable operators across a range max. 150 m, a wireless version with a max. deal range to 1000 meters (outdoors). For wireless version to consider the duration of the mission about 3 hours possible forms of sleep waiting for the mission until 24 hours. Operational readiness and resolve to intervene when necessary could be implemented immediately. The same condition applies for transportability (own transfer activity, transfer to another means of stability for transport and so on.).

The current development of service robots is associated with two approaches to their design and their construction.

- classical concept design by the chosen system structure, based on its own (original) design, in which the use of appropriate components,

- modular design and modular structure according to the chosen system, and the best use of available modular units and components.

Sets of modular units (translational and rotational) with staggered parameters, strokes, and performance sections, to create more complex system, allow considering the compatibility Interface compilation of different robot configurations as required by the shape and size dimensions, useful load, throughput, and the like.

**Conclusions.** Mobile robotic systems are currently under intensive development. Variety brings service activities in service robotics need to use different principles for dealing with their mobility. The most prevalent application of the principle of a wheeled chassis. In terms of theory as well as technical solutions are the most sophisticated wheeled chassis and most widely used in service robotics. This work is developed in the direction of the current service robotics and the essential characteristics and problems associated with the solution that we applied in the educational process.

**Acknowledgement.** This work has been supported by the Slovak Grant VEGA 1/0872/16 - Research and design of algorithms and systems for the fusion of heterogeneous data in multi-sensor architectures.

### References

1. Al-Hussaini, S., Gregory, J. M., & Gupta, S. K. (2018). Generation of context-dependent policies for robot rescue decision-making in multi-robot teams. In. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 4317-4324. DOI: 10.1109/IROS.2018.8594114.
2. Jafari, S., Fashandi, S. A. M., & Nikolaidis, T. (2018). Control requirements for future gas turbine-powered unmanned drones: JetQuads. Applied Sciences (Switzerland), 8(12) doi:10.3390/app8122675.
3. Moridian, B., Kamal, A., & Mahmoudian, N. (2018). Learning navigation tasks from demonstration for semi-autonomous remote operation of mobile robots. In. IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, SSRR 2018, doi:10.1109/SSRR.2018.8468640.
4. Ramos, D. C., Moreno, U. F., & Almeida, L. (2016). Method for design and performance evaluation of ad hoc networked mobile robotic systems using OMNET++. IFAC-PapersOnLine, 49(30), 144-149. doi:10.1016/j.ifacol.2016.11.144.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

5. Tan, N., Mohan, R. E., & Elangovan, K. (2016). A bio-inspired reconfigurable robot doi:10.1007/978-3-319-23327-7\_42.
6. Sucuoglu, H. S., Bogrekci, I., Demircioglu, P., & Turhanlar, O. (2016). Design & FEA and multi body system analysis of human rescue robot arm doi:10.1007/978-3-319-23923-1\_91.
7. Zhu, X., Kim, Y., Minor, M. A., & Qiu, C. (2016). Autonomous mobile robots in unknown outdoor environments. *Autonomous mobile robots in unknown outdoor environments* (pp. 1-255).
8. Chowdhury, M. S. S., Nawal, M. F., Rashid, T., & Rhaman, K. (2016). Terminal analysis of the operations of a rescue robot constructed for assisting secondary disaster situations. In. *IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference, R10-HTC 2015 - Co-Located with 8th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management, HNICEM 2015*, doi:10.1109/R10-HTC.2015.7391868.
9. Endo, G., & Hirose, S. (2011). Study on roller-walker - energy efficiency of roller-walk. In. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 5050-5055*. doi:10.1109/ICRA.2011.5980144.
10. Garcia, J. M., Martinez, J. L., Mandow, A., & Garcia-Cerezo, A. (2015). Steerability analysis on slopes of a mobile robot with a ground contact arm. In. *2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2015 - Conference Proceedings, 267-272*. doi:10.1109/MED.2015.7158761.
11. Saranli, U., Buehler, M., & Koditschek, D. E. (2001). RHex: A simple and highly mobile hexapod robot. *International Journal of Robotics Research*, 20(7), 616-631. doi: 10.1177/02783640122067570.
12. Taylor, B. K., Balakirsky, S., Messina, E., & Quinn, R. D. (2008). Modeling, validation and analysis of a whegs™ robot in the USARSim environment. In. *Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering, 6962* doi:10.1117/12.777604.

УДК 004.4

Рудольф Янош

## АНАЛІЗ РОБОТІВ-РЯТУВАЛЬНИКІВ

**Актуальність теми дослідження.** Аналіз показує, що, окрім збереження «класичних» застосувань роботів (промислових роботів) для виробничих (інженерних) промислових процесів, останнім часом їх застосування переважно, сконцентровано в так званих неінженерних промислових і невиробничих (сервісних) галузях.

**Постановка проблеми.** Тенденції висувають нові функціональні та конструктивні вимоги до роботів та їх застосування, особливо тих, що стосуються ефективного використання роботів у нових сегментах невиробничого та сервісного секторів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Актуальні на сьогодні дослідження орієнтовані на сформульовану проблему повернення інвестицій у роботизовані пристрої, що є гарантованим завдяки тому, що люди на робочому місці можуть розвиватись та зосередитись на інших видах завдань.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми** у цьому секторі, а це передусім сфера порятунку, де роботам доводиться долати різні перешкоди при здійсненні своєї діяльності, потрапляти у важкодоступні та небезпечні місця тощо, залежить головним чином від концептуального рішення робота.

**Постановка завдання.** Враховуючи, що пріоритетом компанії є постійне вдосконалення своєї продукції, ця група роботів також шукає нові інноваційні підходи, які б покращили концептуальні рішення сервісних роботів та їх використання в прикладних галузях. Зважаючи на це, можна припустити, що цей аспект постійних інновацій відкриває велику кількість можливостей для нових удосконалень цієї групи роботів.

**Виклад основного матеріалу.** Поява цієї групи роботів була зумовлена вимогами практики, яка вимагала включення концепції роботів у непромисловій та невиробничій сферах, де роботи виконували б лише дії, які були б корисні людям або технічно-експлуатаційним системам. З цієї причини почали з'являтися перші конструкції таких роботів, які з часом постійно удосконалювалися та адаптувались до практичних потреб настільки, що сьогодні вони є невід'ємною частиною сфери послуг.

**Висновки відповідно до статті.** Мобільні роботизовані системи сьогодні перебувають в стадії інтенсивного розвитку. Різноманітність сервісної діяльності у сфері обслуговування вимагає залучення робототехніки з різними концептуальними рішеннями щодо їх мобільності. Найбільш поширене застосування принципу колісного шасі. З погляду теорії, а також технічних рішень найскладнішим є колісне шасі і саме воно найбільш широко застосовується в сфері робототехніки. Ця стаття виконана в напрямку сучасного обслуговування робототехніки та основних характеристик і проблем, пов'язаних із рішенням, яке ми застосовували у навчальному процесі.

**Ключові слова:** сервісний робот; підсистема мобільності; ходова частина; рятувальні роботи.

Рис.: 4. Бібл.: 12.

**Jánoš Rudolf** - Doctor of Technical Sciences, associate professor, Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics Komenského (Park 8, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Янош Рудольф** – доцент, кандидат технических наук, Технический университет Кошице (Park 8, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**E-mail:** rudolf.janos@tuke.sk

**Scopus Author ID:** 55016528600

UDC 681.2

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-68-74

Tatiana Kelemenová, Miroslav Dovica

## IDENTIFICATION OF MAXIMUM INACCURACY OF TOOLMAKERS MICROSCOPE

**Urgency of the research.** There are several types of measurement devices. Industrial practice needs simple, fast and cheap measurement system for inspection of produced parts. There is a need for system like toolmakers microscope.

**Target setting.** Toolmakers microscope is very popular because of its simplicity, but producer often do not provide information about the errors during the measurements.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Toolmakers microscope uses two methods of measurements – micrometer head slides in two axes XY and CCD camera for measurements of very small dimensions.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** The main problem is with expressing of uncertainty of measurements for both methods of measurements. There is no regulations and recommendation for using of both methods. The question of the probability distribution of measured values and number of minimum required measurements are uninvestigated, because the next research will be focused to this are.

**The research objective.** The aim is to obtain maximum permissible error of explored toolmakers microscope. On the base of this the uncertainty of measurement could be expressed. Uncertainty measurement is non-separable parts of measurement results.

**The statement of basic materials.** Gauge length blocks have been used for calibration of both measurement systems. Maximum permissible error has been estimated as math model for next using.

**Conclusions.** The toolmakers microscope is suitable device for fast and cheap measurement right in industry condition. The producer did not provide information about the accuracy of measurement on this device. Calibration process can be used for estimation of this maximum error achieved during the measurement via using this device. Also this approach can be used for estimation of actual condition of measuring device.

**Keywords:** optical microscope; distance; measurement; uncertainty; gauges.

Fig.: 10. References: 10.

**Introduction.** This work will be focused on examination of Toolmaker microscope. A described device is optical measuring microscope for quick measuring of produced parts [1-3]. The microscope is mainly used for miniature parts or completed products. It enables fast measurement of dimensions, angles, deviations of shape and position etc. There are two basic groups of measuring microscopes used in engineering metrology – laboratory measuring microscope and toolmakers microscope (fig. 1). Laboratory microscope is more accurately but also more expensive than toolmakers microscope. The overall price of measurement depends also on price of measurement equipment. Toolmakers microscope is simpler and also cheaper solution. This type of microscope is good alternative in the comparison with the expensive coordinate measurement machines.



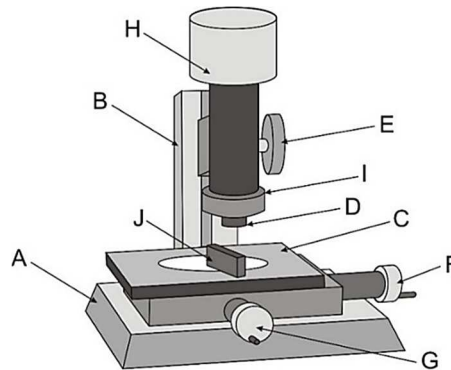
Fig. 1. Example of Laboratory measuring microscope (left)  
and example of Toolmakers microscope (right)

Toolmakers microscope is simple and easy to use. Standard toolmakers microscope (fig. 2) consists of vertical column with optical system with eyepiece and also CCD camera can be included. There are two lights. One is placed on the bottom and one is placed above the measured object. Measured object is placed on XY axis positioning table. The principle of measuring is lied on the precise positioning with table and optical system. Coordinate of position is sensed with micrometer head slide or CCD camera. If object is rotary, then rotary table

can be placed on the XY table for this purpose. Both coordinate X and Y is measured and evaluated for identification of measured dimension.

The main aim of this paper is to identify maximum inaccuracy of the toolmakers microscope. The type and producer of the microscope is not specified because of GDPR and protection of good reputation.

Expressing of all measurement should be coupled with expressing of uncertainty of measurement. Uncertainty is non-separable part of measurement result. The problem is in case, when producer does not express inaccuracy of microscope or it is necessary to verify. Calibration process is needed for this purpose and also it is necessary periodically to inspect if microscope fulfils the inaccuracy declared by producer.

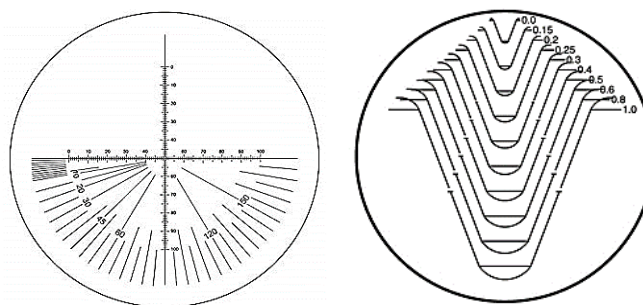


*Fig. 2. Basic parts of Toolmakers microscope:*

*A – Base; B – vertical column; C – XY position table; D – optical system; E – focusing screw;  
F – micrometer head slide position in X-axis; G – micrometer head slide position in Y-axis;  
H – CCD measuring camera; I – upper light; J – measured object*

**1. Description of examined toolmakers microscope.** Tested microscope is mainly assigned for measurement in production hall environment. Temperature is non-stable and also moisture can affects the properties of measurement equipment's. Also there is a risk of noise which can influence electrical systems. Signal from digital micrometer slide can be affected.

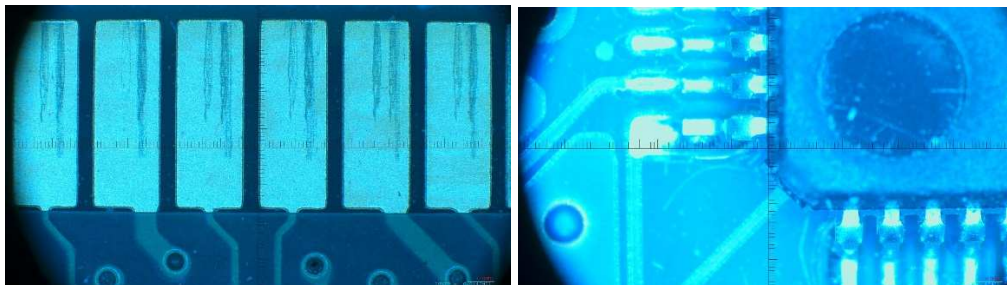
The tested microscope can be used for dimension measurement and also checking of gears and threaded parts. For these purposes a cross-hair or reticle should be implemented into optical systems, mainly into eyepiece of microscope. Reticles are used for fast checking. The checked thread or gear is compared with pattern on glass shown in eyepiece. This fast checking can be used for fast diagnosis of production processes and reduction of losses. For example, it shows that production device is damaged and it needs the maintenance or adjustment.



*Fig. 3. Microscope cross-hair and microscope reticle for eyepiece*

The microscope also enables to measure or inspect the electrical parts or their parts, defects of parts surface, which are not possible to measure with contacts methods. Printed circuits boards (PCB) are frequently checked for defects or mistakes from assembly process and soldered completed boards. Connectors are mechanically stressed and wear can be detected with microscope inspection.

Maximum optical enlargement of microscope can be achieved with combination of optical parts of microscope up to 200 times. Measured on inspected object is placed on XY position table coupled with micrometer slides for obtaining of position of the object in measuring plane. Micrometer slides have range 25mm and resolution 1 $\mu$ m. The inaccuracy of micrometer slides is declared with value of  $\pm 0.002$  mm.



*Fig. 4. Printed circuits boards' inspection via using of microscope*

Micrometer slides have also digital output for another data processing and evaluation with external data units. Microscope also can be arranged with rotary table with swivel centre for measuring of shafts and threads.

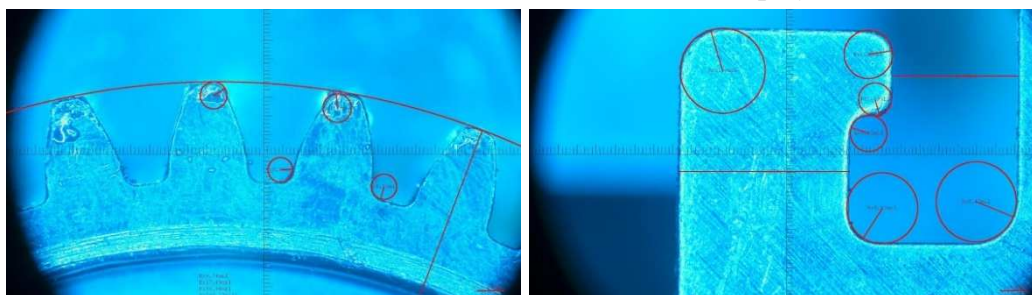
Microscope includes bottom and up LED lights with adjustable intensity of light. In accordance with used light, measurement methods can be divided into these types:

- Measurement via using of transmitted illumination also called as “shadow method”, where only bottom light is used. If part is non-transparent, shadow of part is visible in eye-piece and all measurements can be realised only on this shadow.
- Measurement via using of reflected illumination also called as “surface projection method”, where up light is used for lighten of measured part.

In some special cases also combination of both these lights is necessary for obtaining of best measurement results.

Mechanical adapter enables to mount the CCD measuring camera with digital output. The provided software enables to measure dimensions, angles, radiuses, diameters etc. The camera provides images or video, where can be saved also moving processes. This system can be used for detection of failure in inspected system. The microscope optical system consists of lenses, optical prisms, mirrors and final visualization is made with CCD camera with any resolution defined in pixels. From the viewpoint of data reading, the microscope enables measuring via using of these methods:

- Measuring with CCD camera, where measurement result is number of image pixels and after calibration it is possible to assign concrete length unit to concrete number of pixels. Measurement can be realized with PC mouse by clicking to desired points on image of part. Range of measurement is limited with maximum dimension, which can be displayed on monitor.



*Fig. 5. Measurement by using the CCD camera*

- Measurement with micrometric head slides and rotation table, where microscope cross-hair is used for localization of required points on part image shown on display screen. The actual position is obtained from both micrometer heads mounted on slide of XY table. Angle value can be obtained from grade on rotation table placed on XY table.

Calibration is needful for both measurement methods. Calibration results give recommendation for using of both measurement systems. Which method is better for which range of lengths.



Fig. 6. Example of XY table with micrometer heads

**2. Calibration of optical toolmakers microscope.** The calibration process needs any suitable etalons. Microscope micrometer calibration ruler and calibration slide are frequently used in practice, because of simple using and manipulation with them. These etalons consist of length grades, lines with defined width, raster with defined spacing, circles with specified diameter, angles with specified value etc.

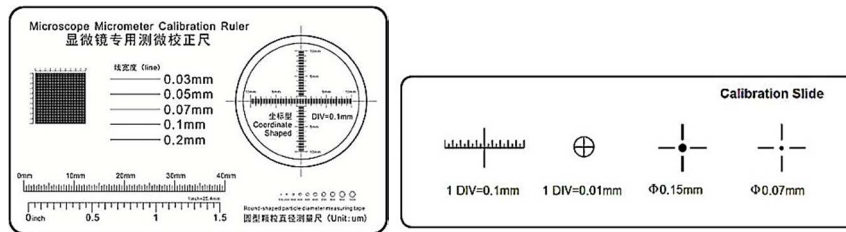


Fig. 7. Calibration ruler and MultiScale Micrometer Glass Slide for Microscope

However engineering metrology is based on calibration where standard is as Set of length gauge blocks. It consist of several blocks made with specified length with defined inaccuracy. Blocks are made from steel or ceramic. These etalons are following up with other superior etalons and there is available certificate about inaccuracy and uncertainty. In accordance with international standards (EALR-R2, ISO 3650), it is possible to use them for calibration of other measurement length devices.

Set of ceramic length gauge blocks have been used for calibration of optical toolmaker microscope. The calibration has been executed with gauges with nominal length in range from 1mm to 25mm with step 1mm.



Fig. 8. Length gauge blocks

Normally, calibration ruler is used for calibration of microscope, but in this work the set of gauge blocks has been used for this purpose as traditional etalon for engineering metrology.

CCD camera method has been calibrated in range from 1 mm to 6 mm and the maximum error was 29µm. Graph of measured values (fig. 9 left) shows growing tendency of measured error from gauge blocks. Reason of these results is probably low resolution of CCD camera system, which was only 0.01 mm. In this moment it is not possible to improve it.

Analogically, the micrometer head slide method has been calibrated with the same set of gauge blocks in range from 1 mm to 25 mm with step 1 mm. Obtained errors (fig. 9 right) have also growing character. The maximum error was 11µm. Mentioned calibrations have been executed only for X-axis and it is assumed that Y-axis will be similar. Resolution of micrometer head is 0.001 mm and it causes the better results than previous method. These results show that CCD camera is useful for dimension range up to 3 mm and for larger distances is better to use micrometer heads system.

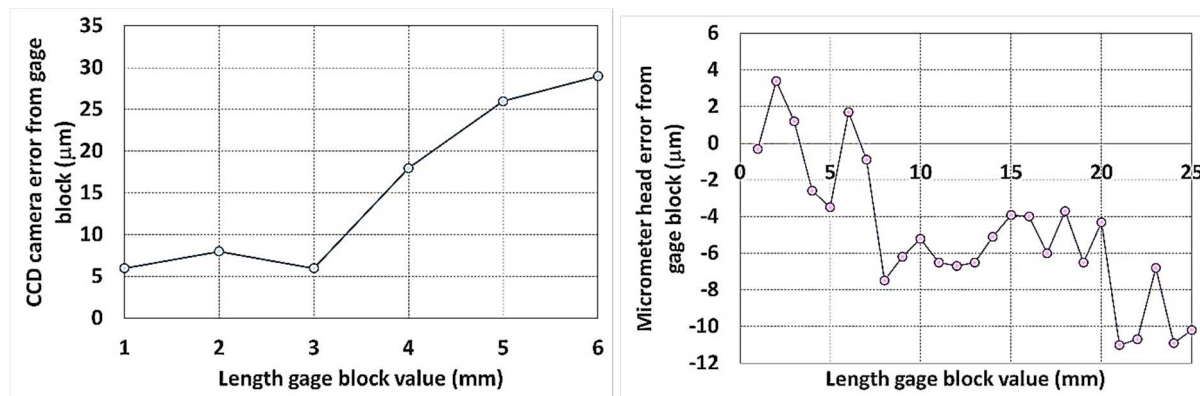


Fig. 9. Calibration of CCD camera measurement method (left) and Calibration of micrometer head measurement method (right)

Error in measurements was also affected by the focusing and identification of searched edge or point on inspected part. This phenomenon is very influenced by the experience of operator. The edge or point detection is the basic principle of the measurement on microscope. The operator has to know detailed information about the dimensional and shape topology of inspected part.

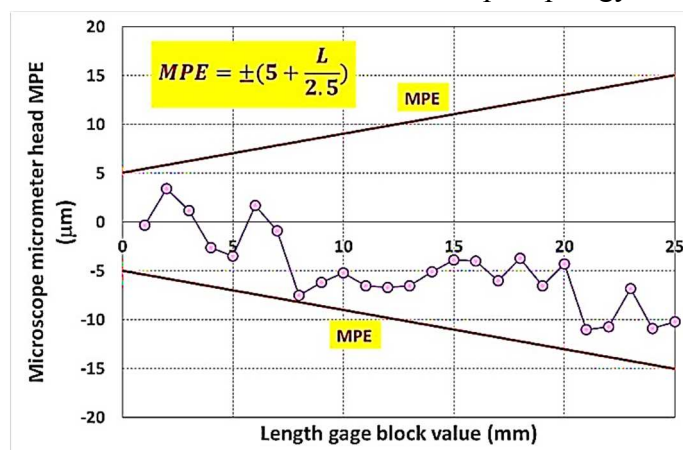


Fig. 10. Maximum permissible error MPE for micrometer head measurement method

The micrometer heads measurements can be assumed for better results obtaining. In accordance with standard ISO 10360 it is possible to use approach for evaluation of maximum permissible error – MPE. MPE describes maximum error which can occurs during the measurement using the equipment. For our microscope MPE is two line, which are borders of our obtained errors from calibration process. Normally it is described with linear model  $MPE = A + L/B$ , where  $A$  and  $B$  are constants of line equations (from fig. 10) and  $L$  is measured distance (in mm). After approximation and math correction it is possible to obtain math model of maximum permissible error  $MPE=5+L/2.5$ .

**Conclusion.** In practice the frequently used devices are coordinate measuring machines CMM and computer tomography scanners, but measurement on these devices are very precise



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

and also very expensive. These expensive devices need large place and need the air-conditioned room with special computer and software. Operating costs cannot be neglected.

Production practice frequently needs less precision but cheaper and fast measurements. The toolmakers microscope is suitable device for fast and cheap measurement right in industry condition. The producer did not provide information about the accuracy of measurement on this device. Calibration process can be used for estimation of this maximum error achieved during the measurement via using this device. This information is necessary for uncertainty balance, because every measurement results also include information about uncertainty of measurement.

The inspected part is produced on the base of technical drawing with specified tolerances which are as input requirements for measurements. This information is necessary for selection of measurement device. Operator for checking of the part often select CMM machine without adequate reasons and measurements is very expensive. All these aspects about the measurements and uncertainties have to be taken into consideration with inspection tasks during the production process [4-16].

**Acknowledgement.** *The work has been accomplished under the research project APVV-15-0149, VEGA 1/0224/18, KEGA 006STU-4/2018 financed by the Slovak Ministry of Education.*

### References

1. EA-4/02 M:2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement In Calibration. Publication Reference. European Accreditation Laboratory Committee. September 2013 rev 01. cited August, 8th, 2019. Available online: <https://european-accreditation.org/wp-content/uploads/2018/10/ea-4-02-m-rev01-september-2013.pdf>. EA-4/02 is a mandatory document belongs to Category: Application documents and Technical Advisory documents for Conformity Assessment Bodies.

National translation MSA-L/12 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration (EA-4/02 M:2013).

2. ISO 3650:1998(E) International Standard, "Length standards – Gauge Blocks," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

3. ISO 10360-7:2011 Geometrical product specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) -- Part 7: CMMs equipped with imaging probing systems.

4. KONIAR, D., HARGAS, L., SIMONOVA, A. et al. (2014). *Virtual Instrumentation for Visual Inspection in Mechatronic Applications*. 6th Conference on Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems (MMaMS) Location: Vysoke Tatry, SLOVAKIA Date: NOV 25-27, 227-234.

5. TURYGIN, Y., & BOŽEK, P. (2013). Mechatronic systems maintenance and repair management system. *Transfer of innovations*, 26 (2013). 3-5.

6. HARGAS, L., KONIAR, D., SIMONOVA, A., HRIANKA, M., LONCOVA, Z. (2014). Novel Machine Vision Tools Applied in Biomechatronic Tasks. *Procedia Engineering*. Volume 96, 148-156.

7. CHUDÝ, V., PALENČÁR, R., KUREKOVÁ, E., HALAJ, M. (1999). Measurement of technical quantities (in Slovak). Edition of STU, 1st. ed., 1999. ISBN 80-227-1275-2

8. JCGM 100 – Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (ISO/IEC Guide 98-3). First edition September 2008. Available online: <http://www.iso.org/sites/JCGM/GUM-JCGM100.htm>; [http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum\\_print.html](http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum_print.html).

9. WIMMER, G., PALENČÁR, R., WITKOVSKÝ, V. (2001). Stochastic models of measurement. (In Slovak) Graphic Studio Ing. Peter Juriga, L. Fullu 13, 841 05 Bratislava. 1st. ed., 2001. ISBN 80-968449-2-X.

10. KRYACHOK, S. (2019). Researches of criteria for determination of residual systematic errors in the results of double geodetic measurements unequal accuracy. *Technical sciences and technology*. No. 1 (15), 2019. ISSN 2411-5363 (Online) | ISSN 2519-4569 (Print). DOI:10.25140/2411-5363-2019-1(15)-258-266.

УДК 681.2

Тетяна Келеменова, Мирослав Довіца

**ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОХИБКИ  
ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МІКРОСКОПА**

**Актуальність теми дослідження.** Існує кілька типів вимірювальних приладів. Промислова практика потребує простої, швидкої та дешевої системи вимірювання для контролю виготовлених деталей. Існує потреба в системі, подібній інструментальному мікроскопу.

**Постановка проблеми.** Інструментальний мікроскоп користується великою популярністю через його простоту, але виробник часто не надає інформацію про похибки, які виникають при вимірюванні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Інструментальний мікроскоп використовує два способи вимірювань – мікрометричну головку, яка переміщується вдовж осей ХУ та CCD-камеру для вимірювань дуже малих розмірних величин.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Основна проблема полягає у вираженні невизначеності вимірювань для обох методів вимірювань. Немає жодних правил та рекомендацій щодо використання обох методів. Питання ймовірності розподілу вимірюваних значень та кількості мінімально необхідних вимірювань не досліджено, тому наступні дослідження будуть зосереджені саме на цьому.

**Постановка завдання.** Метою є визначення максимально допустимої похибки досліджуваного інструментального мікроскопа. На основі цього може бути представлена невизначеність вимірювання. Невизначеність вимірювання – це невід’ємна частина результатів вимірювань.

**Виклад основного матеріалу.** Калібровані міри довжини були використані для калібрування обох вимірювальних систем. Максимально допустима похибка була визначена як математична модель для подальшого використання.

**Висновки відповідно до статті.** Інструментальний мікроскоп – це підходящий пристрій для швидкого та дешевого вимірювання безпосередньо в умовах виробництва. Виробник не надав інформацію про точність вимірювань на цьому пристрої. Процес калібрування можна використовувати для оцінки максимальної похибки, яка досягається під час вимірювання за допомогою запропонованого пристрою. Також цей підхід може бути використаний для оцінки діючого стану вимірювального приладу.

**Ключові слова:** оптичний мікроскоп; відстань; вимірювання; невизначеність; калібри.

Fig.: 10. References: 10.

**Kelemenová Tatiana** – associate professor, PhD in Technical Sciences, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Келеменова Тетяна** – доцент, кандидат технічних наук, Технічний університет Кошице (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**E-mail:** tatiana.kelemenova@tuke.sk

**Scopus Author ID:** 55260126300

**Miroslav Dovica** – professor, PhD in Technical Sciences, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Мирослав Довіца** – професор, кандидат технічних наук, Технічний університет Кошице (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Scopus Author ID:** 6507274736

*Peter Marcinko, Martin Kočan*

## THE REVIEW FOR IMPLEMENTATION OF SIMPLE 3D PRINTERS TO EDUCATIONAL PROCESS

**Urgency of the research.** Interest in this topic is aroused, because students are using 3D modelling programs and they can then print and assemble their models during the lessons and verifying some parameters during printing or compare models after.

**Target setting.** The main goal is to implement 3D printing with a learning process and to acquaint students with 3D printing technology and materials used in this sector. These printers should be used by students on lessons to create 3D objects. Then students create functional assemblies of these objects.

**Actual scientific researches and issues analysis.** In the past few years there has been rapid use of 3D printing. Many 3D printers have gone through various modifications. This is a modification of the construction site. Various types of printers started to be used, such as Cartesian 3D printers, but also printers that use parallel kinematic structure. Many changes have also been made to the electronic site. Whether they are 8 or 32 bit controllers.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** This article focuses on analysis of 3D printers, technology and materials in 3D printing, features and use in the educational process.

**The research objective.** The aim of the research is to design and assembly workplace with 3D printers for educational process. Students at this workplace can experimentally use these printers. In the future, these printers could be upgraded and using the Arduino or Raspberry Pi system, could measure some of the printer's features directly in the printing process. These electronic components should be used, for example, to measure moisture, which significantly affects the quality of the print and the filament.

**The statement of basic materials.** The analysis consists of basic information about 3D printer technologies. The definition of this problem is described below. Based on this knowledge and next information about some 3D printers, was chosen one of these.

**Conclusions.** Our vision is to implement knowledge about 3D printing into the learning process so that students can not only create objects using 3D modelling programs, but also realize this knowledge. This way they will prove 3D technology, which is fast moving nowadays. By further research in this area we would like to set up a 3D centre for these technologies, where other systems would verify the properties of the printing itself.

**Keywords:** printers; materials; technology; educational process; parameters.

**Fig.:** 7. **References:** 12.

**Problem definition.** In the mid-1990s, the world economy became a revolutionary situation. Companies began to fight for consumer goods. Monotonous production has ceased to win millions of orders. This opened up the era of small-scale production. During this period, equipment became increasingly popular, capable of producing various types of models at minimal cost. However, many of them remained in the manufacturing sector, but the rapid development of individual departments resulted in the emergence of volume printing office printers - so the history of 3D printing began.

The first 3D prototype machine was a machine that utilized stereolithography (SLA) technology, developed and patented by Charles Hull in 1986 in the United States. This machine has not yet resembled modern 3D printers, but it is this invention that defined how a 3D printer works: it builds objects in layers. Hull created the company 3D Systems, which produced the first bulky printing device called Stereolithography Apparatus. The first model of this machine, which had a wide spread, developed in 1988, SLA-250.

In 1990 a new method of model production was used - the fixation method. This method was developed by Scott Crump, the founder of Stratasys, and his wife, who continued to develop 3D printing together. The modern historical phase of 3D printing began in 1993 with the creation of Solidscape. In 1995, two students from the Massachusetts Institute of Technology modified the inkjet printer, but in special containers, these images were already cubic, and at the same time the concept of 3D printing and the first 3D printer appeared.

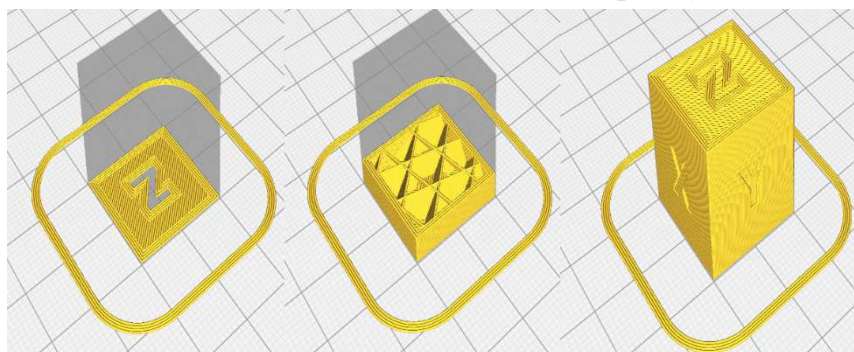
The history of creating a 3D printer continues with the advent of a technology called PolyJet, which is based on the use of photopolymer liquid plastic. With this method, the print head „draws“ a photopolymer layer that is immediately irradiated with a lamp. The method has proven to be advantageous in many respects: its cost is significantly lower, and the high precision of production provides the opportunity not only for models but also for ready-to-use parts.

Over time, the development of 3D printing has greatly accelerated: the use of new materials and foundations, the dimensions and cost of the devices have decreased. The first 3D

printers were huge, but now they are also suitable for the desk (except industrial 3D printers). A modern three-dimensional printer is increasingly similar to an ordinary printer that prints images on paper. At the beginning of the development, the price of a single printer was only available to very large companies, but now anyone can buy a 3D printer. On average, the price of one model is more than 200 euros. The history of the 3D printer is not yet over and the most interesting is waiting for us in the near future [1].

**3D printing technology.** The basic principle is additive manufacturing, which in practice means that we do not have a large block of material at the beginning, but printing begins on a clean surface by gradually applying the material in individual layers as precisely as possible. In this way, the printer prints the material in portions in 2D space. Subsequently, it is moved horizontally by another layer until a complete 3D model is created. Although the individual printing methods differ from one another, the application of the material layer by layer all have in common.

Therefore, the 3D model (most often in STL format) needs to be „cut“ in the software (slicer) before printing, which will be divided by several thin layers forming the whole object. The layer thickness corresponds best to the model quality. The thinner the layers, the more precise the print quality. Printing in the very least layers therefore seems to be the best quality, but has its limitations. The hardware itself has limits on how thin it can create. Even if the hardware allows extremely thin layers, we waste a lot of time in software that has the model cut into many layers. The printing time itself is also considerably extended, since it takes longer to create one layer and at the same time to create multiple layers [2].



*Fig. 1. Calibration cube in layers*

**Types of 3D technology.** FDM/FFF printers are the most commonly Cartesian type of printers. Cartesian refers to the coordinate system used by the printer to move the print head and the build plate. In these printers, there are three rails corresponding to each axis (X, Y, & Z).

Firstly, the raw material, filament, is fed into the extruder. FDM/FFF printer filaments are available in two different diameters, 1.75 mm which is the most common type and 2.85 mm. A particular printer uses only one type of filament. The gear mechanism in the extruder pulls the filament and pushes it down to the heater, where the filament gets melted. The melting temperature depends on the type of filament used and generally ranges from 190 °C for PLA to 300 °C for polycarbonate. This melted filament then flows to the nozzle.

The nozzle is generally available in multiple diameters (0.2 to 1 mm). The nozzle diameter can affect the layer thickness and the print quality. The nozzle deposits the material onto the build platform in the appropriate geometry as per the model to be printed. The nozzle moves in X & Y direction and deposits the first layer of the print. Once the first layer is completely deposited, the build platform drops down by a small amount equal to the layer thickness and the printing again starts for the second layer. This time the first layer and the second layer are still hot and as a result, they fuse together for a strong bond. This process continues till the complete object is printed.

After printing, the object can be easily removed by hand or with a simple scraper. The FDM/FFF printed parts have visible layer lines and are generally very coarse. It can be further

post-processed by sanding, polishing, priming & painting, acetone vapour smoothing, electroplating, etc.

The accuracy of FDM/FFF printers is least in comparison with the other technologies. It is dependent on the minimum distance vertical distance the bed (nozzle in some cases) can travel. Minimum the distance better will be the accuracy. The accuracy also depends on various other factors like the filament, layer thickness, speed, and other parameters set while slicing the object.

FDM/FFF printed parts are mostly recommended to be used for Form and fitment testing, jigs & fixture, and most industrial usage for prototyping. The parts have good dimensional accuracy but are aesthetically very coarse [3].

SLA - Stereolithography is an additive manufacturing technique that works by targeting a UV laser to a bath filled with a photosensitive resin. Points that are generated from 3D data are used to focus the laser. The photosensitive polymers cure under the influence of ultraviolet light, forming layer-by-layer the desired part. Stereolithography requires the use of support structures that are anchored to the lifting platform to prevent deformation. It makes it possible to build large parts with very high precision, attention to detail and excellent surface finish. A wide range of materials allows to build parts with specific properties [4]. Often use materials: Protogen 18420, NeXt, NanoTool etc. The disadvantages is higher price of the printer and materials.

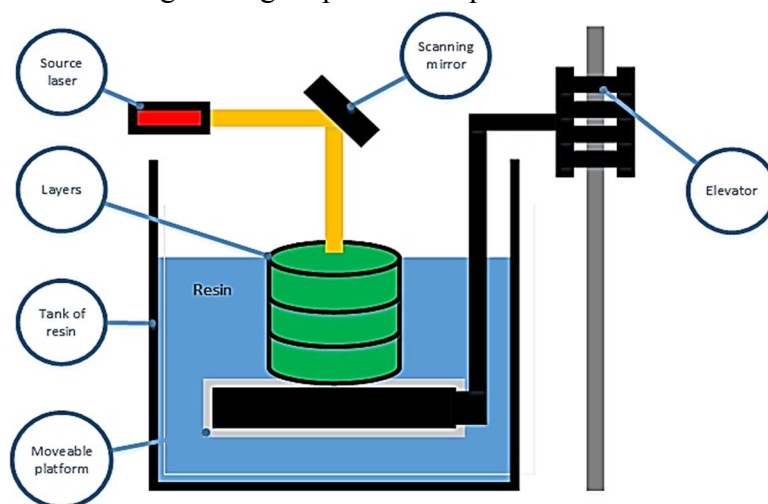


Fig. 2. Stereolithography printer (SLA)

Other methods include: SLS, DMLS, EBM or SLM. These methods are different from FDM and SLA in that the material used is powder. SLS applies a thin layer of the powder on platform. The powder is thermoplastic [5]. All layers are irradiated with a laser. This method can work with various materials which are in the form of a powder, e.g. ceramics, plastics, etc. Other methods are DMLS and EBM. DMLS also has the same principle as SLS, but it is dedicated to metals and their alloys. EBM uses an electron beam to melt the material. It is used for dense objects made of titanium, cobalt and chrome. SLM is an energy process because the laser produces heat for each layer that exceeds the melting point of the material. Objects are extremely rigid. SLM uses only some materials, e.g. steel, titanium, cobalt, aluminium, copper, tungsten and chrome [6].

**Materials for 3D printing.** Polylactide (PLA) - one of the most widely used thermoplastics. This material is a lactic acid polymer, causing PLA to be a fully degradable material. The raw material for the production of polylactide is corn and cane. We can say that the environmentally friendly material of the material has been reflected in its longevity. Plastic easily absorbs water and is relatively softer.

Usually PLA models are not intended for functional use, but serve as design models, souvenirs and toys. Among some practical industrial applications, we can mention the production of packaging for food products, medicament containers and surgical fibers, as well as applications in bearings that do not have a high mechanical load (for example in modeling), which is possible due

to the excellent material slip coefficient. for use in 3D printing, the low melting temperature is only 170-180 ° C, which contributes to low energy consumption and the use of cheaper brass and aluminum nozzles. Typically, the extrusion is carried out at a temperature of 160-170 °C.

At the same time, the PLA solidifies slowly (the solidification temperature is about 50 °C), which should be taken into account when selecting a 3D printer. The best option is a device with an open cover, heated work platform (to avoid distortions of large models) and with optional fans to cool the fresh layers of the model. PLA has a low shrinkage, ie a loss of volume during cooling, helping to prevent deformation. Nevertheless, shrinking has a cumulative effect as the size of printed models increases. In the latter case, it may be necessary to heat the work platform to cool the printed objects evenly [7].

Akrylonitril Butadien Styren (ABS) plastic is characterized by extraordinary strength and toughness, has high impact and shock resistance (even at low temperatures), resistance to crack propagation and abrasion. It also withstands adverse weather conditions and UV radiation. ABS has a very low thermal conductivity, so there is no need for additional insulation. Due to its chemical resistance, plastic does not mind salts, while concentrated acids, strong alkalis, organic solvents and aromatic hydrocarbons can harm it. ABS is non-absorbent and harmless to health. Styrene gives the plastic a glossy and impermeable surface. Polybutadiene is a rubbery substance and provides ABS elasticity even at low temperatures [8].

Another material for 3D printing is High Impact Polystyrene (HIPS), used as a backing material for ABS. For this printing, it is necessary to have 2 extruders. first for construction material and second for support material. Polyvinyl alcohol (PVA) is also used as a support material, but it can be easily dissolved in water and the HIPS material using only a solvent. We also know materials like Nylon, Polycarbonate (PC), wood-like material and many others [9].



*Fig. 3. Filaments for 3D printing and some models*

**Proposed 3D printers.** Of the many types of printers, three were considered. The first printer was Anet A8. Anet A8 is a complete printer that lets you turn ideas from paper into reality. Its great feature is that it can provide printing accuracy of much more expensive devices and is also suitable for home and educational use. Other advantages of this printer include the ability to print from a variety of materials, although it works best with PLA and ABS materials. The price of this printer is around 130 €. Fig. 4 shown this 3D printer [10].



*Fig. 4. Anet A8*

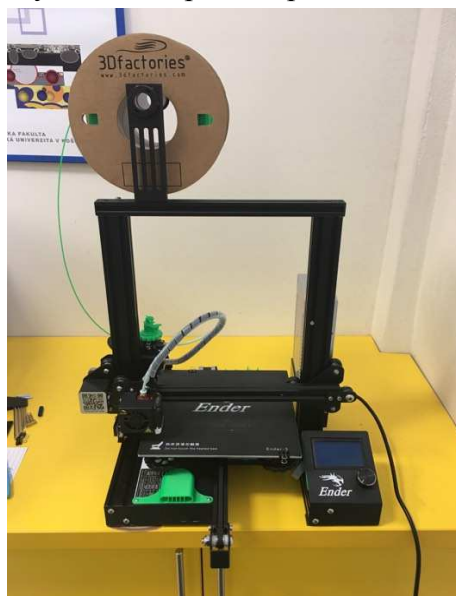
## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

The second printer is the 3D printer Tevo Tarantula. Inspired by the Prusa I3 printer, whose popular, proven design has fallen in love with thousands of people around the world. Tarantula is part of the RepRap project and all parts are open source. This means that the printer is designed from readily available parts and parts. The construction of the printer is made of extruded aluminium frame with a black finish. This is complemented by acrylic connecting parts. Quiet and smooth operation of the printer is ensured by laser-cut metal parts of moving parts, bearings and wheels. The Tarantula comes with a heated aluminium print pad of 200 mm x 200 mm for better filament attachment. The price of this printer is around 250 € [11].



*Fig. 5. Tevo Tarantula*

The last printer to be selected is Ender 3. This printer also supports FDM technology. It also supports printing with PLA, ABS, etc. The size of the object can be up to 220×220×250 mm. It has a relatively compact and very robust shape. The price is around 220 €.



*Fig. 6. Ender 3*

Among these printers, Ender 3 was chosen. The other two are also come into consideration in the future. It was chosen for its compact solution. It should serve as a teaching equipment students learn the basics of modelling in multiple programs, e.g. Creo, SolidWorks, and Autodesk Inventor. Based on their knowledge of these programs, they would like to show them how to work with this type of 3D printer technology. They also want to be able to not only design their final thesis, but also print them out and then assemble them.



*Fig. 7. Box with 3D printers*

In the next period, the lessons will focus more on 3d printers. 3D printers have made great progress in recent years and many people buy them home as a hobby. Countless objects can be printed on these devices. Therefore, there should not be only one printer, and therefore in the future it would be necessary to buy several printers, which the students folded and subsequently could use. In addition to modeling in 3D environments, the lessons could also focus on the programs that use these printers. These are so-called slicer programs, e.g. Cura, Idea-Maker, Repetier, OctoPrint, Slic3r, Simplify3D and many more [12]. So after creating a 3D model, whether it is a single part or the whole assembly, these objects could then be implemented in the program slicer. In these programs, students would try different parameters to adjust the quality of the printed object. It would be mainly to choose the right layer from which the object will be printed and also to set the right print speed.

**Conclusions.** This article describes the basic technologies used in 3D printing. It introduces the materials used in printing. The aim is to acquaint students with the possibilities of 3D printing. In the future, it would be necessary to purchase several printers that use different types of technology to experience the development process practically. From the design of the part in the modeling program to its production - printing. This printer is sufficient, but it needs some improvements that will have to be done to make it better.

#### **Acknowledgements**

This research was funded by Slovak Grant Agency VEGA 1/0389/18 “Research on kinematically redundant mechanisms”.

#### **References**

1. *História vývoja 3D tlače*. Retrieved from <https://xyzprint.eu/aktuality/historia-3d-tlace.html>.
2. *Úvod do 3D tlače*. Retrieved from <https://portal.fmed.uniba.sk/download.php?fid=575>.
3. *How FDM/FFF 3D Printing Technology Works?* Retrieved from <https://manufactur3dmag.com/working-fdm-fff-3d-printing-technology>.
4. *Stereolitografia*. Retrieved from <http://www.sethal.sk/technologie/sla>.
5. *Laser sintering, melting and others –SLS, SLM, DMLS, DMP, EBM, SHS*. Retrieved from <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/laser-sintering-melting-sls-slm-dmls-dmp-ebm-shs>.
6. *FAQ – vysvětlení DMLS, SLS, SLM, EBM, Laser Cusing*. Retrieved from <http://www.innomia.cz/faq-vysvetleni-dmls-sls-slm-ebm-laser-cusing>.



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

7. *Materiály pre tlač na 3D tlačiarňi metódou vrstvomého natavenia (FDM/FFF)*. Retrieved from <https://xyzprint.eu/aktuality/co-je-potrebne-vediet-o-plaste-typu-ABS-PLA.html>.

8. *Rozdiel medzi PLA a ABS*. Retrieved from <https://tvaroch.sk/blog/rozdiel-medzi-abs-pla>.

9. *3D Printer Materials Guide: 3D Printing Plastics*. Retrieved from <https://www.3dnatives.com/en/plastics-used-3d-printing110420174>.

10. *3D tlačiareň Anet A8 nebola nikdy takto lacná!* Retrieved from <https://vosveteit.sk/3d-tlaciaren-anet-a8>.

11. *3D tlačiareň Tevo Tarantula*. Retrieved from <https://www.roboking.sk/products/3d-tlaciaren-tevo-tarantula?variant=12973115277354>.

12. *Top 10 Best Slicer Software For All Levels*. Retrieved from <https://www.3dnatives.com/en/top-10-slicer-software-200520194>.

UDC 624.01

*Петер Марцінко, Мартин Кочан*

### ОГЛЯД З МЕТОЮ ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОСТИХ 3D ПРИНТЕРІВ У НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС

**Актуальність теми дослідження.** Зростаючий інтерес до цієї теми викликаний тим, що студенти використовують програми 3D моделювання і можуть друкувати та збирати свої моделі під час занять, а також контролювати деякі параметри впродовж друку або порівнювати моделі після друку.

**Постановка проблеми.** Головною метою було впровадження 3D друку в навчальний процес і ознайомити студентів із технологією 3D друку та матеріалами, що застосовуються в цьому процесі. Такі принтери мають використовуватися студентами на заняттях для створення 3D об'єктів. Далі студенти можуть створювати з них функціональні збірки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Протягом останніх декількох років спостерігається бурхливе використання 3D друку. Багато 3D принтерів вийшли з використання через різні модифікації. Це зміни, що стосуються конструктивної будови. Почали використовуватися різноманітні типи принтерів, зокрема картезіанські 3D принтери, а також принтери, що мають паралельну кінематичну конструкцію. Багато змін також відбулося в електронній будові. Поки що вони використовують 8- або 16-бітні контролери.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Ця стаття присвячена аналізу 3D принтерів, технології та матеріалів у 3D друці, особливостям та використанню їх у навчальному процесі.

**Постановка завдання.** Метою дослідження була розробка та складання робочого місця з 3D принтерами для навчального процесу. Студенти на цьому робочому місці можуть експериментально використовувати ці принтери. Надалі ці принтери можна буде оновлювати та з використанням систем Arduino або Raspberry Pi з'явиться можливість вимірювати деякі параметри принтера безпосередньо в процесі друку.

**Виклад основного матеріалу.** Аналіз складається з основної інформації про технології 3D друку. Формулювання цієї задачі описано нижче. На основі цих знань та наступної інформації про деякі 3D принтери було обрано один із них.

**Висновки відповідно до статті.** На наш погляд, впровадження знань про 3D друк у навчальний процес повинен відбуватися так, щоб студенти могли не лише створювати об'єкти з використанням програм 3D моделювання, а також реалізувати ці знання. Таким чином вони зможуть удосконалювати 3D технології, що стрімко розвиваються в наш час. У подальших дослідженнях у цьому напрямку планується створити 3D центр технологій, в якому інші системи будуть самостійно перевіряти властивості друку.

**Ключові слова:** принтери; матеріали; технології; навчальний процес; параметри.

**Рис.:** 7. **References:** 12.

**Peter Marcinko** – PhD student, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Петер Марцінко** – аспірант, Технічний університет Кошице (Letna 9, 04200 Košice, Slovak Republic).

**SCOPUS Author ID:** 57200138054

**E-mail:** peter.marcinko@tuke.sk

**Martin Kočan** – PhD student, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Мартин Кочан** – аспірант, Технічний університет Кошице (Letna 9, 04200 Košice, Slovak Republic).

**E-mail:** martin.kocan@tuke.sk

UDC 624.01

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-82-88

*Patrik Šarga, Adrián Kollár***DESIGN AND REALIZATION OF MYRIO CONTROLLED ROBOTIC CAR**

**Urgency of the research.** Human safety comes first. Therefore, human activity in many areas is being replaced by machines. In many cases, this replacement comes in the form of robotic cars that are sent to places inaccessible or dangerous to humans. The use of robotic cars starts from the smallest models for inspection of pipelines, confined spaces, sewers, etc., to larger and more perfect cars that are able to carry more weight and thus more electronics and robotic parts, to overcome difficult terrain, unevenness, obstacles and replace the work of a humans, which can be life-threatening. Robotic cars for the exploration, search and destruction of explosives are a great example.

**Target setting.** The goal of the research was to create inspection robotic car controlled by MyRIO device.

**Actual scientific researches and issues analysis.** When designing the model and preparing this paper, we took into account both current sources – publications and papers dealing with the current state of development of the inspection robotic cars as well as existing robotic car solutions, which are widely available on the market.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Autonomous driving has not been addressed at this stage, but can be carried out in further research.

**The research objective.** The purpose of this article is to explain how a robotic car can be built using MyRIO hardware and LabVIEW software.

**The statement of basic materials.** In our work were used components from National Instruments. Specifically, MyRIO device and LabVIEW software.

**Conclusions.** The robotic car's construction was designed in Solidworks. The control system for computer was programmed in the LabVIEW environment, and its specific variables enabled sharing with other devices. In the end, the robotic car was controlled with a tablet in the Data Dashboard application. The functionality has been tested in the field and approved, that the inspection robotic car was ready for use in practice.

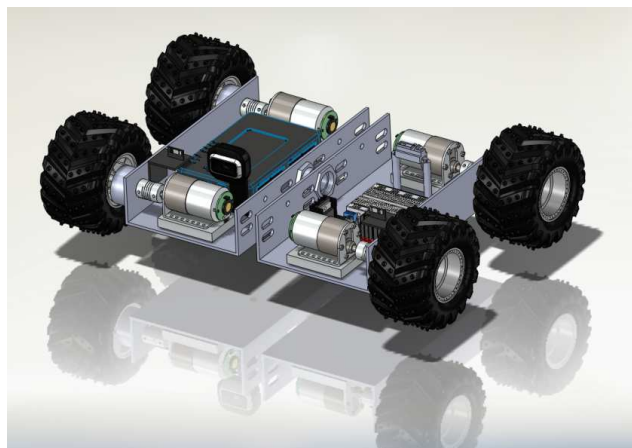
**Keywords:** robotic car; inspection robot; MyRIO; LabVIEW.

*Fig.: 15. References: 12.*

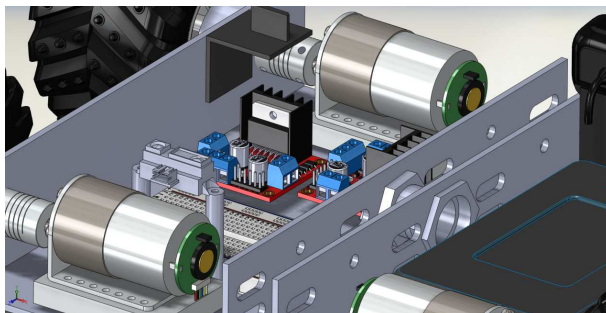
**Introduction.** Our goal was to create a functional inspection robotic car capable of operating in the field under various conditions. The operation is programmed in LabVIEW using the MyRIO control unit located in the car. A remote control is done using the Data Dashboard application on the tablet. Being an inspection robot, a very important part of its equipment is a webcam placed on the car, capable of transmitting images directly to a computer (tablet) and enabling the user to view the ongoing survey. If the robotic car operates at night, the connected LED lights will provide enough illumination to continue the survey. The research activity also includes two optical sensors for measuring the distance to the objects of inspection.

The robotic car operation is programmed in LabVIEW and all data is transferred directly to the computer via Wi-Fi, allowing the user to control the car and all its components in real-time. The user interface works through the Data Dashboard application installed on a tablet.

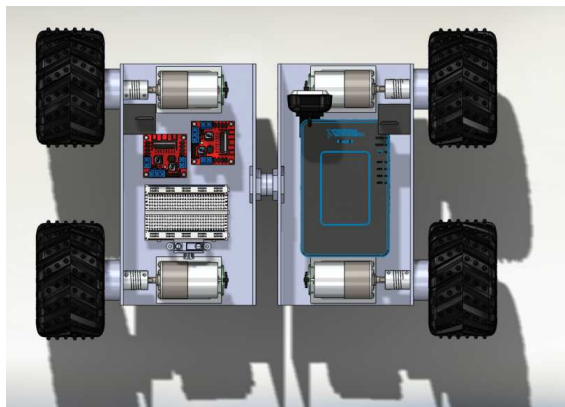
**Design of the robotic car controlled by MyRio.** The realisation was divided into two parts, construction and programming. First, we created the design of the inspection robotic car in Solidworks software (Fig. 1, 2, 3, 4, 5, 6) [1]. According to the design we made individual components and together with the purchased parts we assembled them into a physical solution.



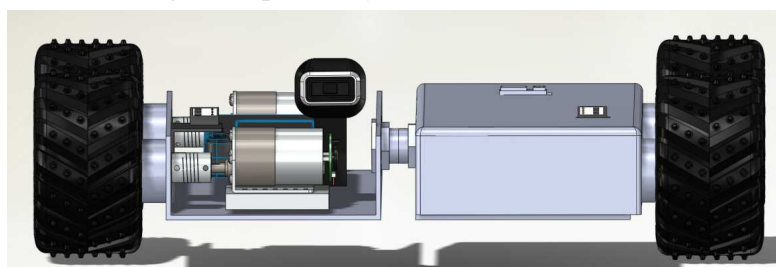
*Fig. 1. Design of the robotic car in Solidworks*



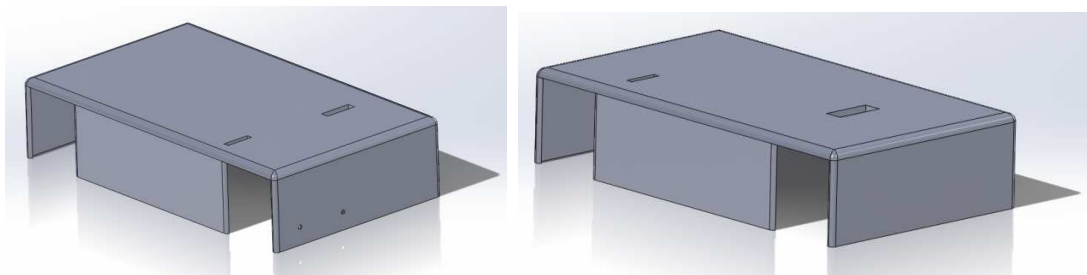
*Fig. 2. Motors, optical sensor, H-bridges and contact field modeled in Solidworks*



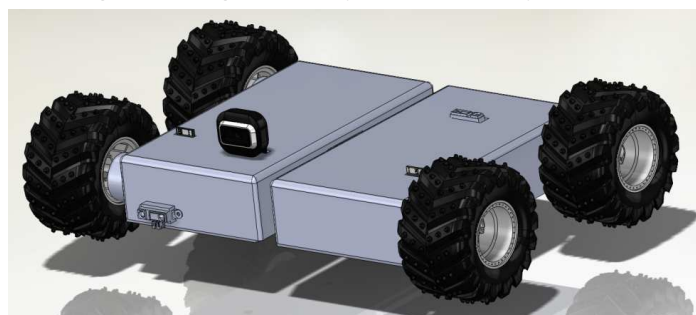
*Fig. 3. Top view of modeled robotic car*



*Fig. 4. Front view of modeled robotic car*



*Fig. 5. Design covers for the sides of the car*



*Fig. 6. Final model of the car with covers*

The centre of the car is the National Instruments MyRIO control unit (Fig. 7). It is a portable reconfigurable stand-alone unit that is primarily used to design control systems in robotics and mechatronics. The basic model NI MyRIO-1900 offers the possibility to connect several analogue inputs (AI) and outputs (AO), digital inputs and outputs (DIO), connection to audio devices, USB port and connection to the power supply. The device also includes an 802.11b, g, n wireless connection. Fig. 7 shows the MyRIO control unit with accessories [2] [3].

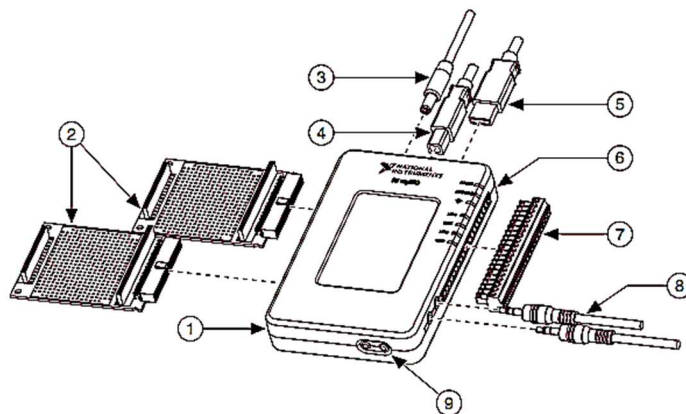


Fig. 7. NI myRIO 1900 [3]:

1 – NI myRIO-1900, 2 – myRIO Expansion Port (MXP) Breakouts, 3 – Power Input Cable, 4 – USB Device Cable, 5 – USB Host Cable, 6 – LEDs, 7 – Mini System Port (MSP) Screw-Terminal Connector, 8 – Audio In/Out Cables, 9 – Button0

The programming part deals mainly with the design and implementation of a program for driving the car forward, backward and modifying these movements such as moving forward and right, forward and left or fast turning - all wheel rotation (4WD). The main program is complemented by subprograms for the robot's optical sensors, LEDs and webcam. The software solution was designed and implemented in LabVIEW environment.

LabVIEW is a graphical programmable language that uses icons instead of structured text to simplify application programming. LabVIEW uses a programming data flow, which determines the execution of commands. LabVIEW program consists of the user interface in which the application is controlled and the block diagram in the background that manages the application. [4], [5].

**Realisation of the inspection robotic car.** The inside of the car consists of the following components: two H-bridges (Fig. 8), contact field, two optical sensors, MyRIO control unit, LED lights and more. [6], [7].

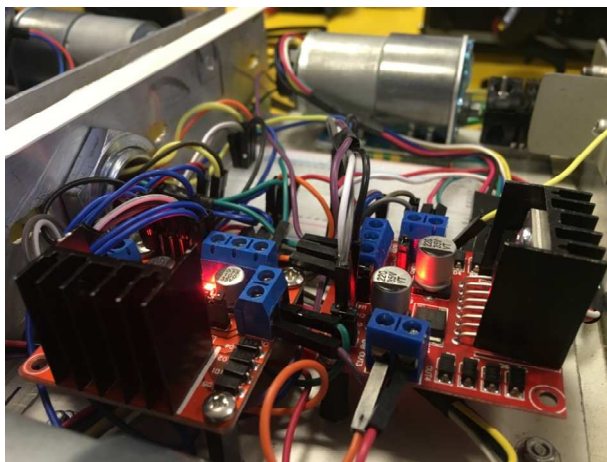


Fig. 8. H-bridge connection

After connecting H-bridges, motors [8] and encoders, we added sensors and LED lights. We used optical distance sensors from Sharp and the lights were made of USB LED lights connected to 5V.

We installed all these components together with the control unit and the webcam [9] in the car. In the last step we connected all components to the batteries. Motors require optimal 12V DC voltage. We connected four motors with battery to the H-bridge and the 5V bridge control and power is provided by the MyRio device. The wiring diagram is shown in Figure 9.

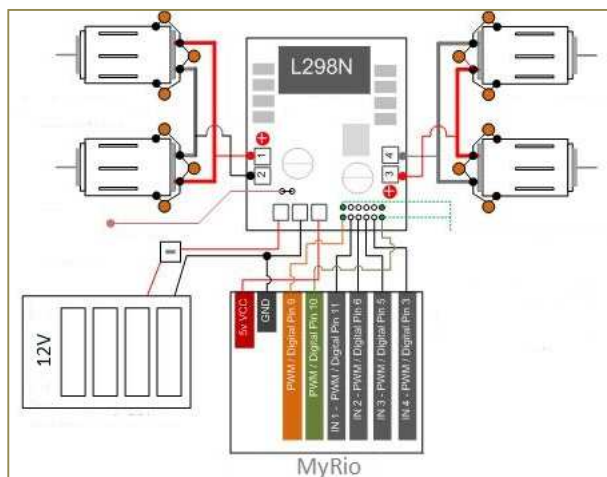


Fig. 9. H-bridge connection to four motors

The final realization of the car is shown in the following figures (Fig. 10).

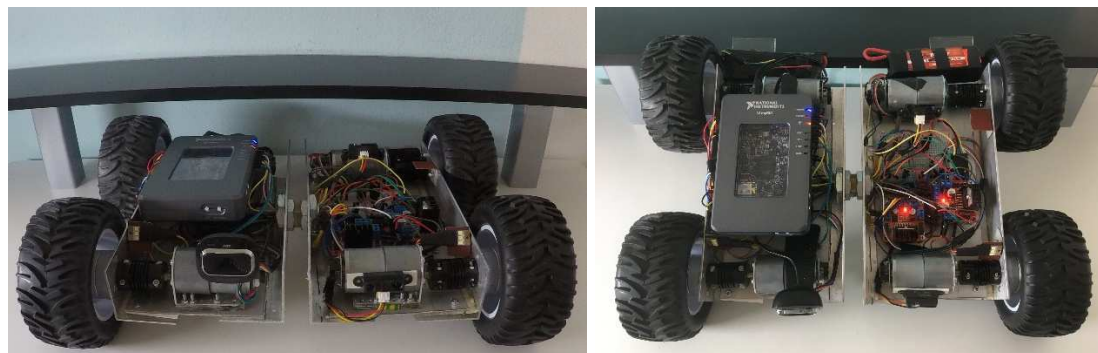


Fig. 10. Final robotic car without cover, front and top view

**Design of the robotic car control software.** The control software was created in the Lab VIEW environment, complemented by Real-Time, Vision & Acquisition module and MyRio toolkit [4], which allow us to use pallets and functions directly associated with MyRIO.

After creating the project, we started to insert functions and commands into the block diagram (Fig. 11). In the beginning, we programmed the drives, and it was necessary to deal with the motion logic using PWM signals and the H-bridge [10]. A chassis of the car has four DC motors with encoders, which are connected to two H-bridges. Each bridge thus controls two engines on one side of the car. These motors may, in certain cases, operate as a whole, but each one of these motors is individually controlled based on the input values from the respective encoder. Each motor has its own PID controller to achieve the desired behavior and in case of external influences, each wheel can autonomously regulate. Such operation has the greatest advantage when moving the car on an inclined plane (the left side will be placed higher than the right side or vice versa). The H-bridge has two inputs for motor activation. We can activate these inputs by interconnecting them to achieve permanent operation of the motors, or to supply signals from the MyRIO device and control the motors manually.

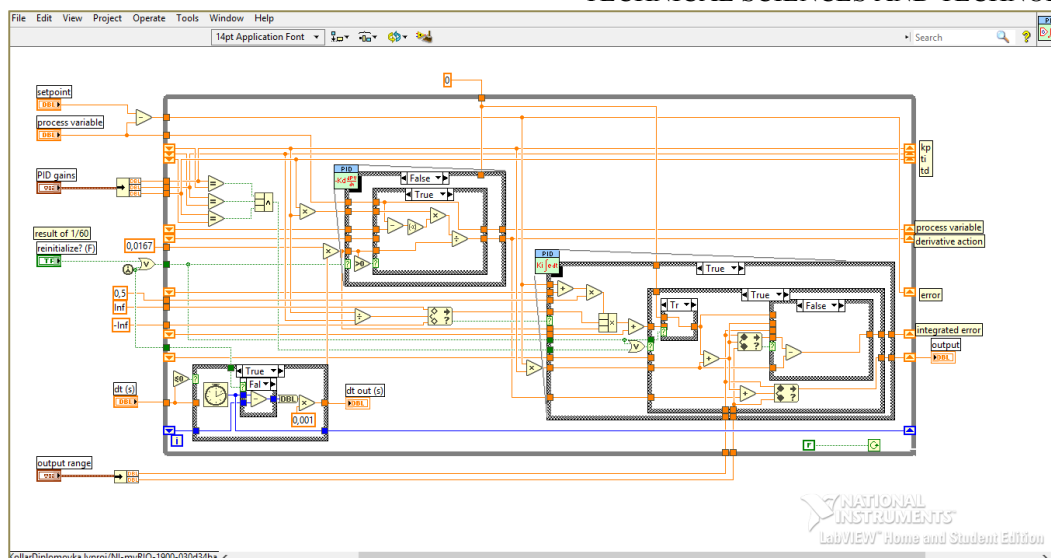


Fig. 11. Example of the block diagram

The next step in the programming was to design and customize the user interface, which will make control complex and intuitive.



Fig. 12. User interface

In Fig. 12 we can see the final user interface for controlling the robotic car on a computer. This environment includes:

- 1) four sliding panels to control the speed and wheel rotation;
- 2) six buttons: forward/reverse button, 4WD drive activation, forward/side drive activation, LED lights on/off, PID controller restart, tablet control sharing function, and stop button, which stops all ongoing operations;
- 3) transferring images from a webcam to a computer;
- 4) a graph showing the behavior of the motors after PID control;
- 5) two indicators to show the distance of objects from the car;
- 6) four engine speed indicators.

In the final step, we created a remote control environment for iOS using a tablet (iPad). This control was implemented using the Data Dashboard application [11], which allows us to manage shared values from a computer in real time in a tablet. These values are created as variables on the computer and placed in a diagram. It is then linked using a tablet library that is connected to the same network (in this case MyRio).

The resulting tablet control application is shown in Fig. 13. The aim was to create a simplified version of the control environment (Fig. 14).

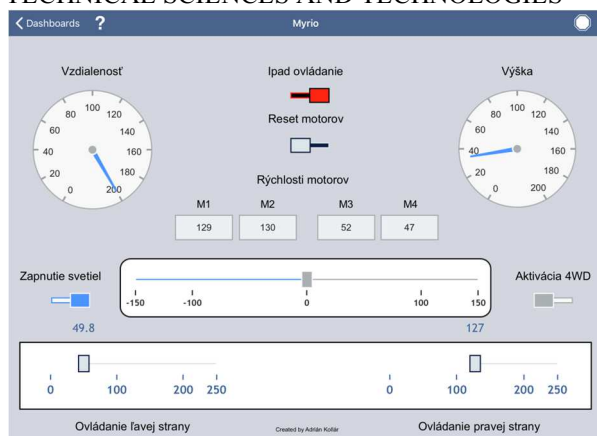


Fig. 13. Simplified user interface for tablet



Fig. 14. The completed robotic car controlled by a tablet

**Testing.** After the robotic car was completed, it was necessary to test the functionality of the whole device under various conditions. One of the tests was the inspection of the chassis on the automobile, which can be seen in Figure 15. When testing the functionality of the inspection robotic car, undesirable conditions were not detected and the full functionality of the proposed solution was confirmed.



Fig. 15. Final robotic car during chassis inspection

**Conclusions.** The aim was to create an inspection robotic car, controlled by MyRio. The car was constructed according to the design created in Solidworks. In the next step, we created a control in the LabVIEW environment, which allows us to control the car using a computer. After programming the control via the computer, some variables were set to share with other devices. This allowed the remote control of the robotic car with the tablet in the Data Dashboard app. The car was field-tested and is therefore ready for inspection of car chassis, but also for field research [12].

**Acknowledgement.** This work was supported by grant project VEGA 1/0330/19.

### References

1. Types of chassis for robotic cars (2019), Retrieved from <https://www.intorobotics.com/best-chassis-to-build-an-outdoor-robot-on-wheels/> [in English].
2. Myrio manual (2019), Retrieved from <http://www.ni.com/academic/students/learn-rio/applications/> [in English].
3. National Instrument (2019), User guide and specifications NI myRio-1900, Retrieved from <http://www.ni.com/pdf/manuals/376047c.pdf> [in English].
4. National Instrument (2019), LabVIEW manual, Retrieved from <http://www.ni.com/academic/students/learn-labview/> [in English].

5. National Instrument (2019), Getting started with compactRIO and LabVIEW, Retrieved from <http://www.ni.com/pdf/manuals/372596b.pdf> [in English].
6. Fitzgerald, Higginbotham, Grabel (1975), Basic electrical engineering, Boston, 621p. [in English].
7. Michaeli, Linus (2012), Elektronické súčiastky a obvody, Košice, 224p. [in Slovak].
8. Pololu Corporation (2019), metal gearmotors, item 2824, Retrieved from <https://www.pololu.com/product/2824> [in English].
9. Microsoft LifeCam HD-3000 (2019), product T3H-00013, Retrieved from <https://www.microsoft.com/accessories/sk-sk/products/webcams/lifecam-hd-3000/t3h-00012> [in Slovak].
10. Divis, Chmelikova, Zdrálek (2005), Logické obvody, Ostrava, 152p. [in Czech].
11. National Instruments (2019), Data Dashboard application, Retrieved from <http://www.ni.com/tutorial/13757/en/> [in English].
12. Kollar, Adrián (2019): Vytvorenie autíčka riadeného pomocou myRIO, Košice, [in Slovak].

УДК 624.01

*Патрик Шарга, Адриан Коллар*

## ПРОЕКТУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ РОБОТИЗОВАНИХ АВТОМОБІЛІВ, ЯКИМИ КЕРУЄ MYRIO

**Актуальність теми дослідження.** Безпека людини на першому місці. Тому діяльність людини в багатьох сферах замінюється машинами. У багатьох випадках ця заміна здійснюється роботизованими автомобілями, які відправляються в місія, недоступні або небезпечні для людини. Використання роботизованих автомобілів починається від найменших моделей для огляду трубопроводів, обмежених просторів, каналізації тощо, до більших і досконаліших машин, які здатні перевозити більше ваги, а отже, більше електроніки та робототехнічних деталей, для подолання складної місцевості, нерівностей, перешийки та замінити людину на роботах, небезпечних для життя. Роботизовані машини для розвідки, пошуку та знищення вибухових речовин – прекрасний приклад.

**Постановка проблеми.** Метою дослідження було створити оглядовий роботизований автомобіль, керований пристроєм MyRIO.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** Розробляючи модель та готуючи цю роботу, ми врахували як сучасні джерела - публікації та статті, що стосуються сучасного стану розвитку оглядових роботизованих машин, так і існуючі рішення щодо роботизованих автомобілів, які широко доступні на ринку.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** На цьому етапі автономне керування не розглядалося, але може бути здійснене в подальших дослідженнях.

**Постановка завдання.** Мета цієї статті – пояснити, як можна побудувати роботизований автомобіль за допомогою апаратних засобів MyRIO та програмного забезпечення LabVIEW.

**Виклад основного матеріалу.** У нашій роботі були використані компоненти від National Instruments. Зокрема, пристрій MyRIO та програмне забезпечення LabVIEW.

**Висновки відповідно до статті.** Конструкція роботизованого автомобіля була розроблена в Solidworks. Комп'ютерна система управління була запрограмована в середовищі LabVIEW, а її конкретні змінні дозволяють ділитися з іншими пристроями. Зрештою, роботизований автомобіль керувався планшетом у додатку Data Dashboard. Функціональність була перевірена на місцях і підтверджена, що оглядовий роботизований автомобіль був готовий до використання на практиці.

**Ключові слова:** роботизований автомобіль; оглядовий робот; MyRIO; LabVIEW.

Рис.: 15. Бібл.: 12.

**Patrik Šarga** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation and Human Machine Interactions, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Košice (Letna 9, 04200 Košice, Slovak Republic).

**Патрик Сарга** – доцент, доцент, кандидат технічних наук, Технічний університет Кошице (Letna 9, 04200 Košice, Slovak Republic).

**E-mail:** patrik.sarga@tuke.sk

**Scopus Author ID:** 15128102900

**Jakub Cocuľa** – student of mechanical engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Košice (Letna 9, 04200 Košice, Slovak Republic).

**Адриан Коллар** – студент, Технічний університет Кошице (Letna 9, 04200 Košice, Slovak Republic).

**E-mail:** adrian.kollar@student.tuke.sk



Jan Semjon, Rastislav Demko

## PROPOSAL OF HANDLING PROCESS ON ROBOTIZED WORKPLACE WITH DUAL ARM ROBOT

**Urgency of the research.** Deployment of two-arm robots in different plants increases production or assembly efficiency. By designing a robotized workstation for assembly we will improve students' competences in the field of robot programming. By preparing students at robotic workplaces using two-arm robots, we increase their employment in the labor market.

**Target setting.** The aim of the solution is to design an educational workplace for assembly, equipped with a two-arm robot. The object gripper uses Schunk electric grippers to adjust the range of movement and clamping force. This will allow students to create an optimal program according to individual requirements.

**Actual scientific researches and issues analysis.** The question of the use of collaborative robotics in industry is highly relevant. If two-arm industrial robots are equipped with safety sensors, we can increase the safety of working in collaborative workplaces without using a collaborative robot.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Increasing the skills of students in the programming of industrial robots, improves their possibilities of employment in practice. At the same time, it creates conditions for maintaining the growth of the national economy in the near future.

**The research objective.** The aim of the research was to design a robotic workplace so that students could use a creative approach to solve a given problem. At the same time, the use of the Faculty logo as a model for the proposed assembly preparation will increase the social awareness of the whole university.

**The statement of basic materials.** The deployment of two-arm robots and the preparation of workers for their programming, maintenance and operation will ensure the development of robotics and facilitate manual work. This also leads to an increase in the share of production and deployment of products with higher added value.

**Conclusions.** The article describes the design, production, programming and commissioning of a robotized workplace for educational purposes. The workplace is equipped with a two-arm Yaskawa robot and a pair of Schunk electric grippers. The aim of the work was to design an assembly and dismantling process that would demonstrate the possibilities of working on a two-arm robot. The robotized workstation, when completed, allows the rotary cylinder to be inserted and then removed in a closed loop. Manipulated parts are found in the proposed fixtures, whose shape is based on the university's initial fonts, which make up its logo. Students participating in the learning process will be able to modify the program based on the teacher's assignment and thus improve their robot programming skills.

**Keywords:** robot; programming; education; logo.

Fig.: 7. Table: 1. References: 11.

**Urgency of the research.** Deployment of two-arm robots in different plants increases production or assembly efficiency. By designing a robotized workstation for assembly we will improve students' competences in the field of robot programming.

**Target setting.** The aim of the solution is to design an educational workplace for assembly, equipped with a two-arm robot. The object gripper uses Schunk electric grippers to adjust the range of movement and clamping force. This will allow students to create an optimal program according to individual requirements.

**Actual scientific researches and issues analysis.** An industrial robot is part of a robotic system used to make various components. Such a robot is autonomous, programmable and capable of moving in three or more axis. The industrial robot is used for stereotypical and repetitive work in which man would not be fully utilized. Typical applications of these robots include welding, spraying, handling, assembly, etc. Industrial robots and production automation have brought many benefits to industrial production. The most important benefit of robots is their efficiency, and they can work at a higher speed than a manual working man. If the robot is properly programmed, it can work without interruption and thus massively increase production and reduce the number of failed products [1]. Although the initial investment is high, they can turn this investment into profit in a relatively short time. Thanks to their efficiency, consistency and price reduction, they are gaining popularity with parts manufacturers for various industries. The market for industrial robots is large and growing, especially in less developed countries. Technology is constantly changing, so it is difficult to keep up with the rapidly changing changes in this area [2; 3]. The largest share of the robot market is in: China, Japan, South Korea, US and Germany.

The robot we use for assembly activities is the robot of the company Motoman Yaskawa, with the designation SDA 10F. It is a two-arm robot that has 15 rotary joints - 7 rotary joints for each hand and 1 axis base rotation. It has high agility and freedom of movement on a small ground plan. Due to its dexterity and its large number of joints, it is most often used for assembly, handling and operator of machines, packaging operations or other work that is mostly performed by people [4].

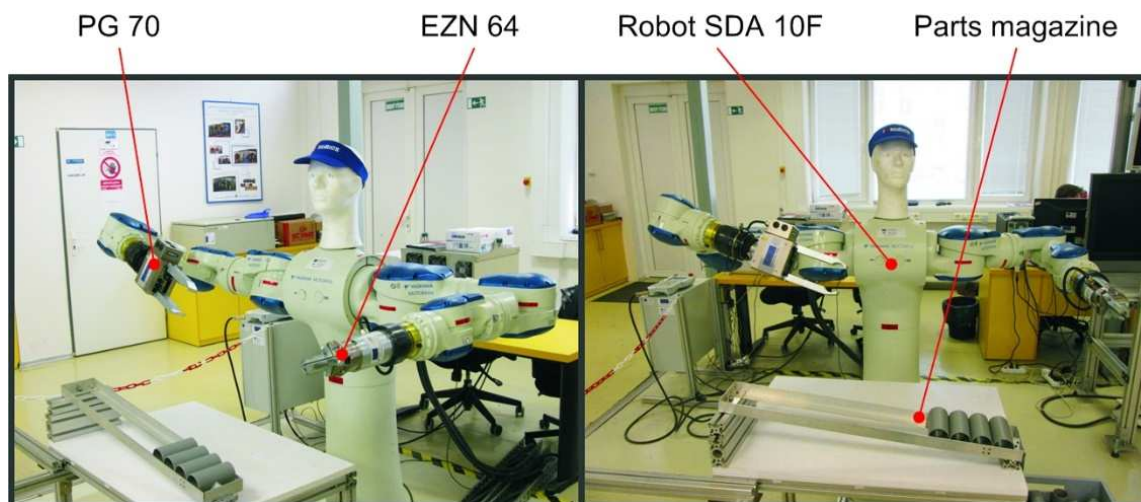
Base parameters robot SDA 10F are shown in Table 1.

Table 1

*Yaskawa robot parameters [5]*

Weight	220 kg
Payload	2x10 kg
Horizontal /Vertical Reach	720/1440 mm
Speed	130 - 400°/s
Repeatability	+/- 0.1 mm

**Current status in workplace.** At present, the SDA 10F was mainly used for demonstrations for visits and the teaching process (Fig. 1). Students learned to create a program in which it was necessary to simultaneously use two arms fitted with electric grippers in the handling process. Used grippers are from company Schunk, the first gripper is the PG 70, which is equipped with two fingers moving parallel [6]. The second gripper is labelled EZN 64 and uses three fingers that are 120° rotated relative to each other [7]. The two-finger gripper is suitable for gripping non-rotating or rotating objects beyond the outer surface. The three-finger gripper is designed to hold objects behind the inner circular hole, where the ability to centre the object of manipulation can be used. Figure 1 shows the present workstation with the SDA 10F robot, a pair of grippers and an angled stack of parts that uses gravity to position the pipes of dimension 50x100 mm [8].



*Fig. 1. Ground plan of the workplace*

Most high school students, as well as domestic and foreign visits to the Institute of Automation, Mechatronics, Robotics and Production Technology at the Technical University in Kosice (TUKE), do not know the logo of our university. That is why we used this logo as a basis for creating two mounting fixtures for storing manipulated parts. It is about integrating the TUKE logo into the working environment of the robot and at the same time getting the logo into the students' subconscious. It will also help with excursions or demonstrations to students interested in robotics.

**Proposal of robotized workplace.** Since the robot has already been programmed to perform an action where it moves the rollers on an inclined plane in an infinite loop, (Fig. 2) we will not interfere in this program. We try to keep the created program in order to keep it working if it

needs to be used to illustrate the work of the robot. For this reason, we have defined a new working area where the proposed manipulated process will be implemented. The new 400 x 700 mm work surface is located on the right side of the anchored robot. This means that if we want to implement programming and demonstration of the robot work it is necessary to move the robot to the new starting position, according to fig. 2 by rotating the robot's torso 90 ° clockwise.

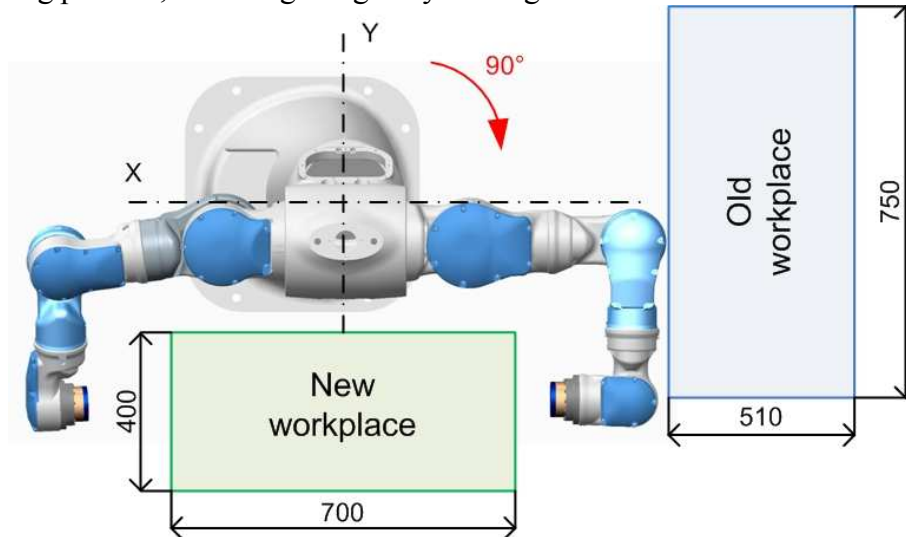


Fig. 2. Robot in new working position

For the new work area it was necessary to design and produce a workbench whose height from the ground was 560 mm and the table size was 390x690 mm. The table is made with Bosch system aluminum profiles 50x50 mm. On the top of the table there is a white 16 mm thick laminated board in which holes are made to hold the fixtures.

The preparations are made of stainless steel sheets 1.5 mm thick and 208x253 mm in size. When designing the preparations we used the university logos, which consist of two letters "TU" and the following shape (Fig. 3).



Fig. 3. Logo Technical University of Kosice/Faculty of Mechanical Engineering

Holes are provided at the edges of the plates to attach the M5 threaded rods. The first sheet has a "T" shaped hole and the second sheet a shape "U". On individual metal sheets are subsequently glued two letters, made of blue self-adhesive film which also forms the letters "TU". The blue color was chosen deliberately, as the logo of the Faculty of Mechanical Engineering of the Technical University of Kosice, where our workplace also belongs, is also blue [9].

The resulting shape of the proposed fixture consisting of two draw-off points located on the work table and it's shown in (Fig. 4). To the left side mounting fixtures (T-shaped cut out), it is possible to place a maximum of 5 cylindrical parts. Into the right side the mounting fixture (U-shaped cut out), it is possible to place until 7 cylindrical parts. In the case of teaching with the use of these fixtures, it is possible for the teacher to determine how many pieces cylindrical parts will be needed to create the program. In addition to the number of parts, the teacher can determine their location as well as the direction of collection and storage. This leads to multiple combinations, allowing each student to enter an individual assignment.

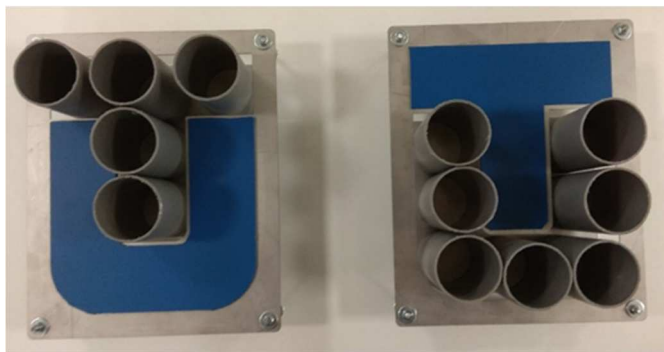


Fig. 4. The resulting face of the product being made

**Creating a sample program on the robot.** After switching on the control unit and the proper involvement of the pendant, after a while, the main menu on the pendant will start. In the menu, we are particularly interested in the "Job" section, where we can see existing programs, delete programs or create your own, new programs. When selecting "Create new job" we will open a window where we can create and name our own, new program. The display is touch-sensitive, so it's easier to move around. This is most useful especially when writing and then pressing the ENTER button. If we have created a program it is necessary to change the control of the robot arms in the "Control Group" item so that we can move both arms at the same time. In our program we have to see the designation "R1 + R2: R1". In (Fig. 5) is a sample of the program, where a red box indicates a label that indicates that we can use both robot arms in the program [10].

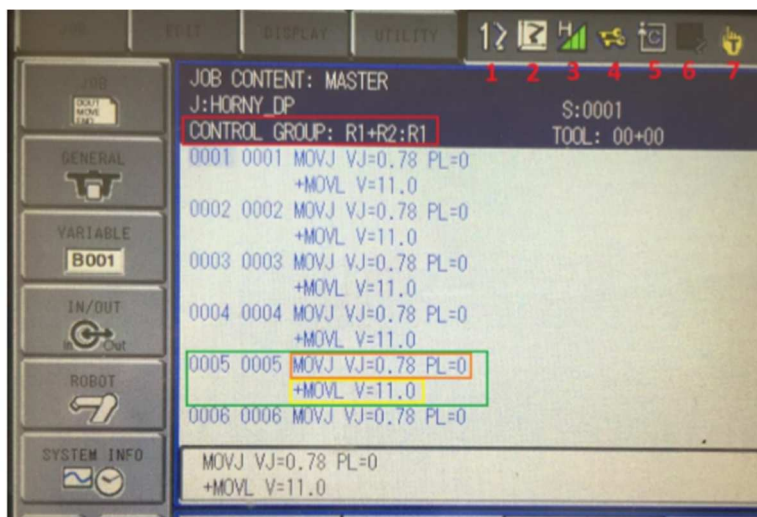


Fig. 5. Demonstration of the program on pendant by robot

The row with the numeric labels at the top represents the robot's status bar. First (1) the currently used robot arm is shown. Switching between robot arms, using the "ROBOT" button. The second (2) is the currently used coordinate system, which is the axis coordinate system. To switch between coordinate systems, press the "COORD" button. Next (3) we can see the speed of the robot, currently set to "High". Another icon (4) symbolizes the user level. Whether it is an operator, programmer or service worker. At each level we can adjust something else, we have other privileges.

The number 5 icon is the play mode: step cycle or continuous mode. We use them to see how the program works.

The penultimate icon shows what the manipulator is doing. It also shows an alarm or an emergency stop. The last icon tells us which mode we use [11]. Either it is manual or automatic. In manual mode, we can control the robot with a pendant. In automatic mode, the program works separately. One line of the program is shown in green. This line contains code for both

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

arms marked orange and yellow. “MOVJ” represents the rotational movement of the individual joints, “MOVL” is a linear motion along a line, “VJ” is a motion speed that ranges from 0-100%. Currently, the speed is set to 0.78% for one arm and 11% for the other arm. The basic position at the beginning of the program as well as the overall view of the workplace can be seen in (Fig. 6). It is the position that the robot always takes when starting the program.



*Fig. 6. The starting position of the robot*

Then the robot turns 90 degrees and begins to take the rollers out of the cut-out "U" with a 3-point grip. Subsequently, he folds the roller into the second gripper and places it in the logo with the letter "T" cut out, (Fig. 7).



*Fig. 7. Removing and inserting parts*

**Conclusions.** The design and implementation of a new part of the robotized workplace was intended to improve and optimize the learning process with the SDA 10F double-arm robot. The proposed solution created the prerequisite for assigning individual tasks to students during the semester. The role of the teacher has turned into a consultant who leads students to create a program on the robot. The result is increased student competence and self-esteem, which can be used in practice. The financial intensity of the solution was around € 50, as most of components were from by the Department of Robotics, which is also a teaching workplace. The secondary benefit is the possibility of using the proposed workplace for presentation tasks. Over the course of the academic year, over 200 students and school staff attend various field trips at the Industrial Robotics Laboratory, leading to faculty and university visibility.

**Acknowledgement.** This article was created thanks to the VEGA project support: 1/0389/18 Research and development of cinematically redundant mechanisms.

### References

1. Vagas, M., Balaz, V., Semjon, J., Putala, J. (2016). Methodological process for creation of palletizing – assembly workplace. *Technical sciences and technologies: Scientific journal*. Vol. 6, no. 4, p. 189-193, ISSN 2411-5363.
2. Semjon, J., Kostka, J., Mako, P. (2019). Návrh a optimalizácia robotizovanej výrobnjej linky. *ATP journal: priemysel'na automatizacia a informatika*. Bratislava (Slovensko): HMH Roč. 26, č. 4, s. 44-46. ISSN 1335-2237, [in Slovak].
3. Semjon, J. (2018). Design of robotised workstation for handling concrete products. *Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky*. Košice (Slovensko), Roč. 6, č. 6A, s. 90-94, ISSN 1338-9432, [in Slovak].
4. Yaskawa. Retrieved from <https://www.motoman.com/en-us/products/robots/industrial/assembly-handling/sda-series/sda10d>.
5. Yaskawa. Retrieved from <https://www.yaskawa.eu.com/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=11546&token=0ae89d4b680b5867c1e0cda552dfc6eff9ce3529>.
6. Schunk. Retrieved from [https://schunk.com/de\\_en/gripping-systems/series/ezn/](https://schunk.com/de_en/gripping-systems/series/ezn/).
7. Schunk. Retrieved from [https://schunk.com/sk\\_sk/uchopovacie-systemy/product/2493-0306095-pg-70/](https://schunk.com/sk_sk/uchopovacie-systemy/product/2493-0306095-pg-70/).
8. Vagas, M. (2017). Metodika navrhovania robotizovaného pracoviska pre paletizáciu. *Automatizácia a robotika v 21. storočí*. - Košice : TU, s. 38-43, ISBN 978-80-553-2820-1, [in Slovak].
9. TUKE. Retrieved from [http://www.tuke.sk/wps/wcm/connect/d4178da6-0e7f-43f4-8548-85c39e208fdd/dizajn\\_manual\\_tuke\\_1\\_cast.pdf?MOD=AJPERES&CVID=mC0CTeg&CVID=mC0CTeg&CVID=mC0CTeg](http://www.tuke.sk/wps/wcm/connect/d4178da6-0e7f-43f4-8548-85c39e208fdd/dizajn_manual_tuke_1_cast.pdf?MOD=AJPERES&CVID=mC0CTeg&CVID=mC0CTeg&CVID=mC0CTeg).
10. Sukop, M., et al. (2017). Robot ABB IRB 360 applications in the learning process. *Journal of Automation and Control*. Vol. 5, no. 2, p. 73-75, ISSN 2372-3033.
11. Balaz, V., Vagas, M. (2017). Programming of robots for education of teachers at secondary vocational schools in CAD systems. *Journal of Technology and Exploitation in Mechanical Engineering*. Vol. 3, no. 2, p. 12-16, ISSN 2451-148X.

УДК 621.8

Ян Семйон, Растіслав Демко

## ПРОЕКТУВАННЯ РОБОТИЗОВАНОЇ РОБОЧОЇ СТАНЦІЇ НА БАЗІ РОБОТА З ДВОМА МЕХАНІЧНИМИ РУКАМИ

**Актуальність теми дослідження.** Використання роботів з двома механізованими руками на різних заводах підвищує ефективність виробництва або складання. Розробка роботизованої робочої станції підвищує компетентність студентів у галузі програмування роботів. Проведення занять для студентів на робочих місцях, оснащених дворуками роботами, збільшує їх зайнятість на ринку праці.

**Постановка проблеми.** Необхідно розробити навчальне робоче місце для складання, обладнане роботом з двома механізованими руками. Захоплення об'єкта здійснюється електричними захватами Schunk, можливе регулювання сили затискання. Це дозволить навчитись студентам створювати оптимальну програму роботи робота відповідно до індивідуальних вимог.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання про використання робототехніки у промисловості є дуже актуальним. Оснащення промислових роботів з двома механізованими руками спеціальними датчиками, підвищує безпеку роботи на робочих місцях, де одночасно працює декілька роботів.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Підвищення кваліфікації студентів з програмування промислових роботів, покращує їх можливості працевлаштування. Водночас це створює умови для підтримки зростання національної економіки у найближчому майбутньому.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розробка робота, щоб студенти мали можливість використовувати творчий підхід для вирішення заданої проблеми. У той же час використання логотипу факультету у якості моделі для складання збільшить соціальну обізнаність усього університету.

**Виклад основного матеріалу.** Розповсюдження дворуких роботів та підготовка працівників до їх програмування, обслуговування та експлуатації забезпечать розвиток робототехніки та полегшить ручну роботу. Це також сприятиме збільшенню частки виробництва та розміщенню продукції з більш високою доданою вартістю.

**Висновки відповідно до статті.** У статті описано проектування, виробництво, програмування та введення в експлуатацію роботизованої робочої станції для освітніх цілей. Робоче місце оснащено дворуким роботом Yaskawa та парою електричних захватів Schunk. Метою роботи є розробка процесу складання та демонтажу, який би демонстрував можливості роботи дворуких роботів. Роботизована робоча станція дозволяє здійснювати програмування роботів на виконання послідовних дій, наприклад, вставити поворотний циліндр і потім виїняти його в закритому циклі. У якості робочого простору дворукого робота використовуються спеціальні шаблони, форма яких заснована на початкових шрифтах універси-

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

тету, які складають його логотип. Студенти, які беруть участь у навчальному процесі, зможуть модифікувати програму на основі завдання вчителя та таким чином вдосконалити свої навички роботи з роботизованими станціями.

**Ключові слова:** робот; програмування; освіта; логотип.

*Рис.: 7. Таблиця: 1. Бібл.: 11.*

**Semjon Ján** – Associate Professor, PhD of technical sciences, Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics (Park Komenskeho 8, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Семйон Ян** – доцент, кандидат технічних наук, доцент, Технічний університет Кошице, Механічний факультет, Кафедра робототехніки (Park Komenskeho 8, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**E-mail:** jan.semjon@tuke.sk

**SCOPUS Author ID:** 55571411200

**Demko Rastislav** – PhD student, Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics (Park Komenskeho 8, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Демко Растіслав** – аспірант, Технічний університет Кошице, Механічний факультет, Кафедра робототехніки (Park Komenskeho 8, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**E-mail:** rastislav.demko.student@tuke.sk

UDC 621.8

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-96-104

Marek Sukop, Peter Ferenčík

**DESIGN OF INTELLIGENT ROBOTIC CELL WITH CAMERA SYSTEM**

**Urgency of the research.** More complex robotic systems are characterized by a certain degree of intelligent behavior where, based on input, the system is able to adapt its behavior. The implementation of elements that support intelligent behavior in robotic systems, especially those based on the image of devices, is becoming common practice. The reason is simple, such a system is faster and more accurate.

**Target setting.** Creating machine vision, however, is a complex problem, especially when it comes to applications with non-standard requirements. For each task, the vision system needs to be adapted to the conditions and requirements of the monitored objects. Other image adjustments and algorithms need to be applied to static objects rather than moving objects. Two-dimensional image information is sufficient for some manufacturing process, while others require a third dimension to remove a given piece from a disordered pile. Creating an intelligent robotic cell with a camera system therefore requires the creation of a vision system that meets the specified requirements. This is where space is open, because there are many different procedures and principles to deal with, but not all are equally effective and reliable.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Many of the image processing methods can be combined with each other, or a new, better way to solve the problem can be developed using the approaches already known. Adding to this fact non-standard requirements profiled in practice, there is an undeniable reason why it is appropriate to deal with image processing for industrial use.

**Uninvestigated parts of general matters defining** are designing and create a robotic cell, whose activity will be controlled on the basis of image perception obtained by digital camera.

**The research objective** of this article is to design and create a robotic cell, whose activity will be controlled on the basis of image perception obtained by digital camera. The obtained image will be subjected to suitable image processing algorithms which will result in the generation of control instructions for controlling the manipulator movement.

**The statement of basic materials.** The work deals with the design of a robotic cell whose task is to manipulate sample objects placed on the conveyor belt by means of a parallel manipulation robot based on image perception. The main part of the design is the creation of control software, which in the first level ensures the proper functioning of the individual components and in the second level their mutual cooperation, which ensures the performance of the required functionality of the robotic system as a whole. Created software runs on Windows 7 operating system, where it offers a simple tool to control the movement of the arms of a parallel robot without using other control means. This means that the robot's movements can be controlled directly from the control program, allowing the robot and object to be manipulated even in manual mode. The image obtained by the camera can be adjusted by software using the implemented tools before the automatic manipulation begins, allowing the user to set the correct input parameters to ensure reliable object identification.

**Conclusions.** In order to design a robotic system whose operation is controlled on the basis of visual perception, it was necessary to acquire theoretical knowledge for the correct selection of individual components of the system as well as their correct placement within the robotic cell. Great emphasis was placed on suitable and economical selection of the sensing device and the way of illuminating the scanned objects.

In order to obtain the camera image it was also necessary to study and understand the principle of working with the image captured by the camera via SDK issued directly by the camera manufacturer. However, obtaining an image was only the first step to start the image processing process. In order to extract the necessary data from the obtained image and then to create control instructions from the data for controlling the robot, it was necessary to study and learn in detail the individual steps and procedures of image processing.

In the part of the work dealing with image processing the acquired knowledge was applied to the processing process itself, but not only known approaches were used. Owing to the reduction of CPU load and consequently shortening of the calculation process, own procedures were also introduced into the image processing process. The actual "economical" approach was applied and tested in the thresholding process where a "shortened thresholding algorithm" was created. The approach was also applied to the object-in-picture search process, creating a "network-based object-in-picture method" that uses the fact that we search and identify known objects in industrial applications as opposed to identifying objects in an unknown environment.

The combination of image acquisition, image processing and robot control with one comprehensive application is also a major benefit. Of course, to ensure this functionality, it was first necessary to create a theoretical base on which to build. The main problem was to create a control part of the robot control in C# and to link it to the basic control program created in C++.

**Keywords:** robotic cell; machine vision; camera system; intelligent system.

**Fig.:** 9. **References:** 15.

**Urgency of the research.** More complex robotic systems are characterized by a certain degree of intelligent behavior where, based on input, the system is able to adapt its behavior. The implementation of elements that support intelligent behavior in robotic systems, especially those based on the image of devices, is becoming common practice. The reason is simple, such a system is faster and more accurate.

**Target setting.** Creating machine vision, however, is a complex problem, especially when it comes to applications with non-standard requirements. For each task, the vision system needs to be adapted to the conditions and requirements of the monitored objects. Other image adjustments and algorithms need to be applied to static objects rather than moving objects. Two-dimensional image information is sufficient for some manufacturing process, while others require a third dimension to remove a given piece from a disordered pile. Creating an in-



TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

telligent robotic cell with a camera system therefore requires the creation of a vision system that meets the specified requirements. This is where space is open, because there are many different procedures and principles to deal with, but not all are equally effective and reliable.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Many of the image processing methods can be combined with each other, or a new, better way to solve the problem can be developed using the approaches already known. Adding to this fact non-standard requirements profiled in practice, there is an undeniable reason why it is appropriate to deal with image processing for industrial use.

**Design of intelligent robotic cell.** The paper deals with the design of a robotic cell whose task is to manipulate the sample objects placed on the conveyor belt by means of a parallel manipulation robot based on image perception. The main part of the design is the creation of control software, which in the first level ensures the proper functioning of the individual components and in the second level their mutual cooperation, which ensures the performance of the required functionality of the robotic system as a whole. The control program is created in the Visual Studio C ++ development environment, while the software components for developers (SDK) are used to control individual components for easier and reliable implementation of the device into the control program. Image processing is provided by a combination of OpenCV library and our algorithms. The program consists of three basic threads. The first thread provides image acquisition and processing in the parameter setting mode - the so-called FreeRun mode. The second thread provides control of the robot in manual mode by means of sliders - graphical elements for control. The third thread provides automatic mode of operation based on preset parameters.

**Used components.** The chosen camera for the application was the “Basler Scout scA1390-17gc” camera, whose specific parameters (Fig. 1) best suited the chosen purpose. However, this is a compromise in the selection, given that the selection was made from the facilities at the disposal of the TUKE Robotics Department.

Basler Scout scA1390-17gm					
Sensor	Sensor	Sony ICX267	Camera Data	Interface	GigE
	Shutter	Global		Pixel Bit Depth	12 bits
	Image Circle	1/2"		Synchro	SW/HW trigger
	Sensor Type	CCD		Exposure control	via Camera API
	Sensor Size	6,5 x 4,8mm		Digital Input	2
	Resolution	1.4Mpx (1390x1038px)		Digital Output	4
	Pixel Size	4.65 x 4.65 μm		Power Supply	12 - 24 V
	Frame Rate	17 fps		Consumption	3.5W
	Mono/Color	Monochromatic		Lens Mount	C-mount

Fig. 1. Characteristics of the Basler Scout camera

Most camera manufacturers also offer lenses for their equipment in their portfolio. This is also the case with Basler, where it is possible to select the required lens directly on their website in the lens section. After entering the parameters, two relevant results were displayed. It was a Basler C125-218-5M F1.8f12mm and Edmund Optics CFFL F1.8f12mm 2/3 ”lens that fully fit the purpose, but the purchase price was too high. € 400 for the Basler lens and € 300 for the Edmund Optics. Therefore, the cheaper variant of the Tamron 23FM12-L 2/3 fF12 F / 1.8 lens (Fig. 2), Whose purchase price was 140 €, was more than half that of the Edmun lens, defined parameters.



Fig. 2. Selected lens Tamron

ABB IRB 360 FlexiPicker is a modern device designed for fast handling and / or fast removal of products from conveyor belts and their subsequent storage or packaging. The main advantage of these devices is the high handling speed, which means that the handling cycles are very short and the high accuracy and load capacity, whose maximum value is 8 kg. The Flexi-Picker product line is available in a range of 800, 1130 and 1600mm range ranges and a range of 1.3, 6, and 8kg load capacities, making these devices ideal for wide range of applications. The basic design of the Flexipicker consists of a base where the drive units for the individual arms and three parallel arms are located. The robot is placed on the suspension structure, with the handling space being created directly below the robot. Due to different Flexipicker variants, the workspace is not the same for all variants. The ABB IRB 360-6 / 1600, located at the Department of Robotics, has the largest workspace (Fig. 3) in this product line.

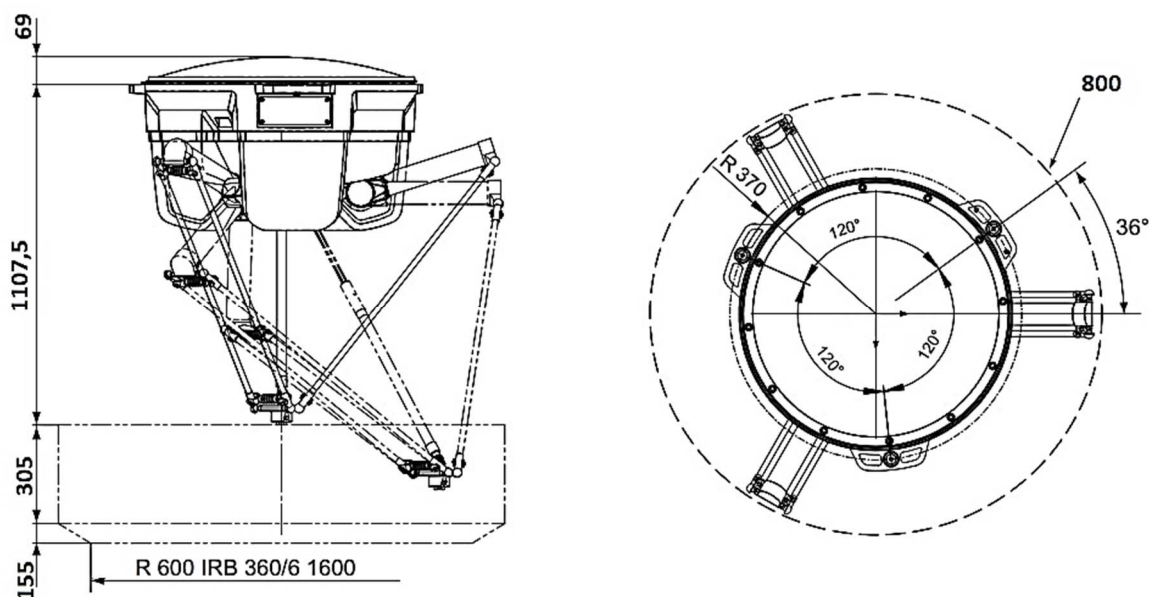


Fig. 3. Workspace of IRB 360-6 / 1600

As this project belongs to the small group, the hardware requirements for it were not extremely extreme. The image provided by the selected camera achieves a resolution of only 1.4MPx and the images will be processed sequentially with a period of 140ms, representing approximately 7 frames per second. The computing power of the control PC is ensured by the AMD FX-6300 processor, which contains 6 physical cores with a clock speed of 3.5GHz (boost up to 4.1 GHz) and a 12MB Chash pmäte. Despite its high performance, this processor is "only" the equivalent of the Intel i5 series processors, but this is enough for this project. The memory is created by two 4GB modules reaching the frequency of 2100Mhz connected in DualChanel mode for faster communication with the CPU. The set is complemented by a graphics card with nVidia GT630 chip supporting DirectX 11, whose clock frequency reaches 810MHz. For storage of data was chosen SSD size of 120GB, which allows writing and reading data at 450MB / s.

**Main program and its structure.** The control program ensures the cooperation and functioning of individual parts of the robotic cell with the camera system in order to ensure the desired result. Since the basic components of the robotic cell are the camera and the robot itself, the control program is divided into three basic parts - the part providing communication with the camera and acquiring the captured image, the part providing connection to the robot control system and its control and the part performing image processing and generation data for robot movement control.

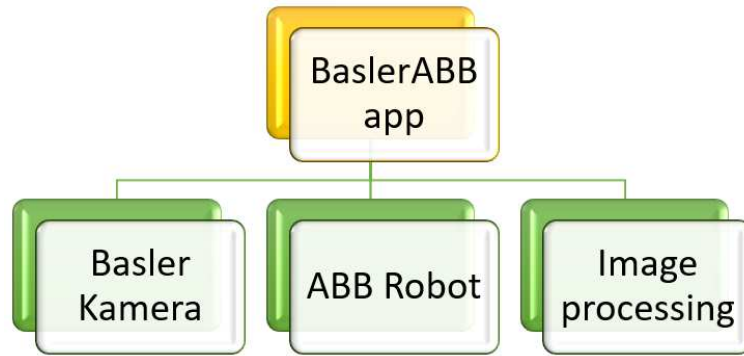


Fig. 4. Basic program blocks

The first block of the program, as already indicated, provides a communication channel between the Basler camera and the control PC. This program block provides software interconnection of the camera and the PC, thereby obtaining the acquired image into the operating memory. Physically, however, the Basler Scout sca 1390 is connected to the control PC via the GigE interface, which means it uses an Ethernet link. Since the primary task is not to create software for camera management and communication between the camera and PC, we will use the official SDK for this purpose, which reliably provides this functionality. The implementation of the Pylon 5 SDK should be performed according to the instructions published by the publisher.

By installing the Pylon SDK, we get an API (Application Programming Interface) in C++ for Basler cameras that use the IEEE1394, GigE, USB and Camera Link interfaces. Thus, the Pylon API offers a broad-spectrum programming interface that frees the programmer from the many differences that exist between individual interfaces, speeding up work and eliminating errors in establishing a communication channel. The new generation of Pylon API version 5 even reduces the hardware components of the control PC. Compared to older version 4, the memory usage is half the load and communication takes three times less time. These two significant benefits are advantageous for older systems, where the introduction of new Basler products does not need to change the hardware configuration of the control PC.

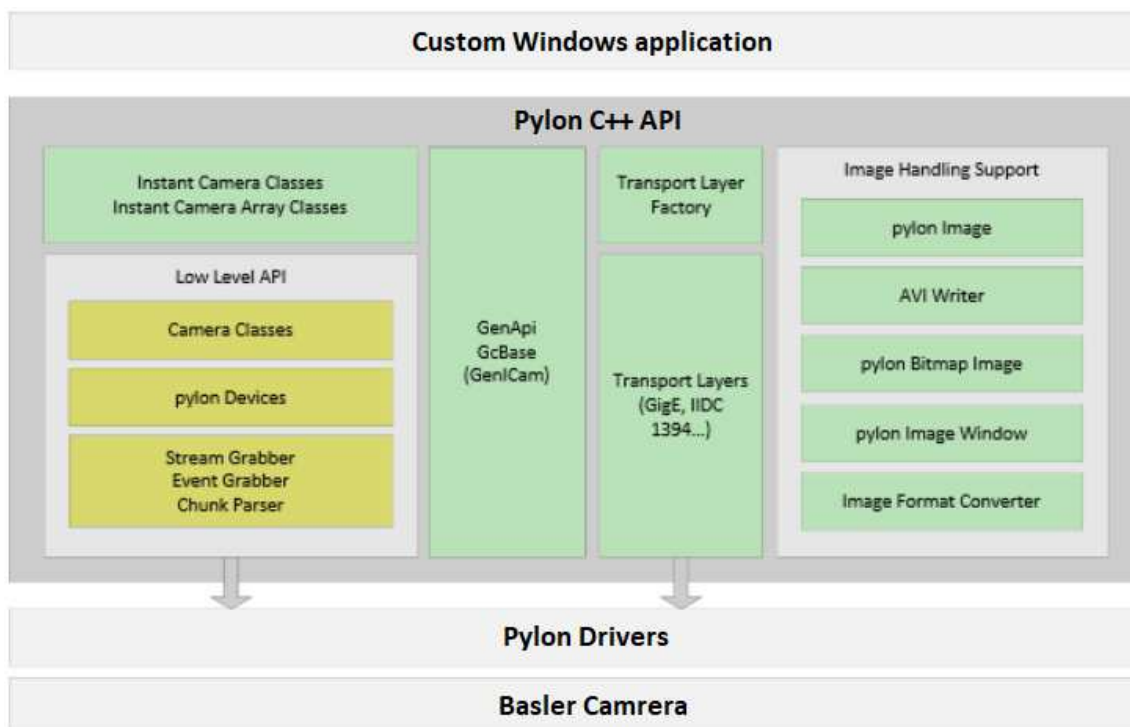


Fig. 5. Pylon 5 API structure

The code being created is almost ready to get the first image from the connected camera, but you still need to set up an image acquisition strategy. By default, the “One-By-One” acquisition strategy is set, which means that the acquired images are processed in the order they arrived. In our case, this method is exactly right, because the image acquisition will be controlled by a software trigger. However, it is possible to set up continuous loop image acquisition and process the image from any buffer found in the "Grab Engine". The maximum number of these buffers is 10, but for our One-By-One acquisition needs, we will limit the number of these buffers to 1. This means that we will still process only the image we capture at the moment.

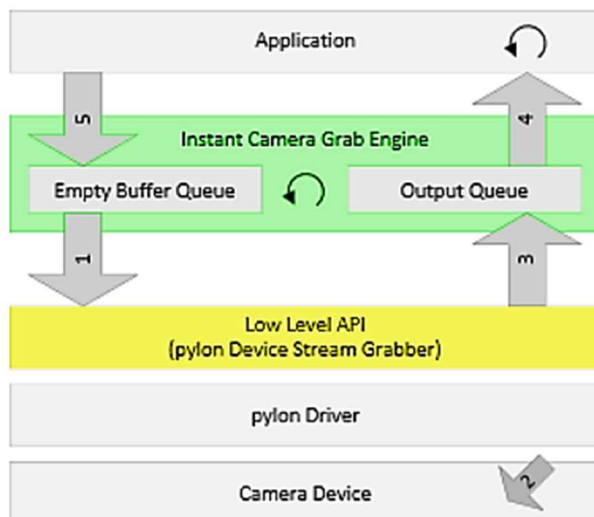


Fig. 6. Picture acquire by strategy One-By-One

The basis of communication and control of the robot is therefore a separate part of the program written in C #, whose functions are called from the main program. However, the call itself does not perform direct management actions in the main program. The call only determines what action to take and provides input parameters. Some calls may result in a return value that is important to the main program, such as querying the current position on the X axis. However, the actual processing of the request ensures part of the managed code.

However, the motion control of the robot is not controlled directly. Because the robot has its own control system on which the Windows application actually being created "parasitizes" it is not possible to control movements by direct command. For the simple but reliable control of the robot's movements it was necessary to "fool" the control system. In the robot control system, I created a simple program that contained a repeating loop whose execution was controlled based on reaching the end position.

```

MODULE MainModule
  VAR robotarget RobotTarget:=[[-0.00,0.00,-870.00],[0,1,0,0],[0,0,0,0]];
  PROC main()
    WaitDI Start, 1;
    Reset InPosition;

    IF (Linear)
    {
      MoveL RobotTarget, v1000, z50, tool0;
    }
    ELSE
    {
      MoveJ RobotTarget, v1000, z50, tool0;
    }

    WaitRob\InPos;
    Set InPosition;

  ENDPROC
ENDMODULE

```

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

The user interface of the application besides the mentioned sliders for controlling the movement of the arm also contains the possibility to change the movement speed in the range of 0 - 100%, which can be adjusted also during automatic operation. There is no such option when controlling a robot by a pendant. Manual motion control is useful, for example, to adjust the position from which the image will be obtained, since the camera can be positioned on the gripping effector. You can also set the location where objects should be uploaded. The UI also displays the name of the currently used robot, its current location and the currently set target.

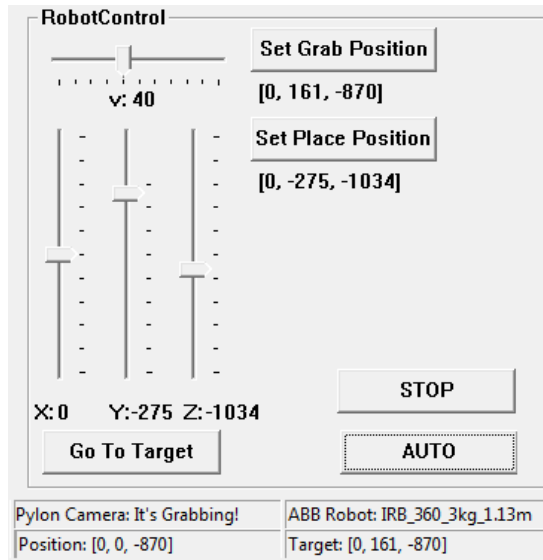


Fig. 7. User interface for robot controlling

A separate part of the application consists of a part that links a part of the code created in the C # programming language, which provides communication with the IRC5 robot control system and its actual control. This part of the program creates an essentially standalone control program that can be used to create another application to control ABB robots whose control system is an ABB IRC5.

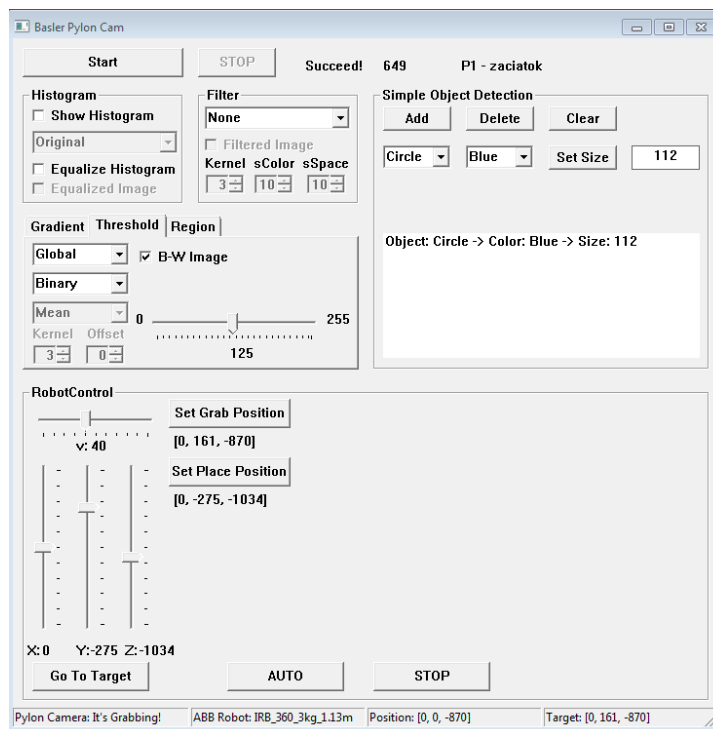


Fig. 8. The main application control and information window

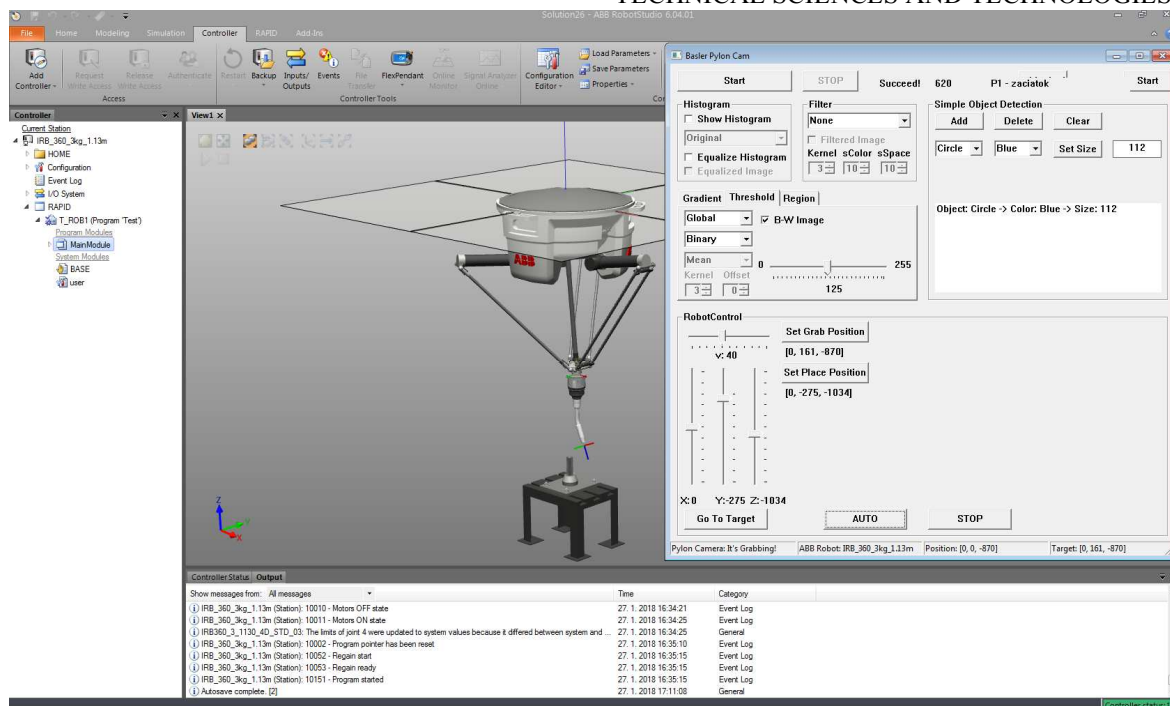


Fig. 9. Simulating robot control using ABB RobotStudio software

**Conclusions.** In order to design a robotic system whose operation is controlled on the basis of visual perception, it was necessary to acquire theoretical knowledge for the correct selection of individual components of the system as well as their correct placement within the robotic cell. Great emphasis was placed on suitable and economical selection of the sensing device and the way of illuminating the scanned objects.

In order to obtain the camera image it was also necessary to study and understand the principle of working with the image captured by the camera via SDK issued directly by the camera manufacturer. However, obtaining an image was only the first step to start the image processing process. In order to extract the necessary data from the obtained image and then to create control instructions from the data for controlling the robot, it was necessary to study and learn in detail the individual steps and procedures of image processing.

In the part of the work dealing with image processing the acquired knowledge was applied to the processing process itself, but not only known approaches were used. Owing to the reduction of CPU load and consequently shortening of the calculation process, own procedures were also introduced into the image processing process. The actual "economical" approach was applied and tested in the thresholding process where a "shortened thresholding algorithm" was created. The approach was also applied to the object-in-picture search process, creating a "network-based object-in-picture method" that uses the fact that we search and identify known objects in industrial applications as opposed to identifying objects in an unknown environment.

The combination of image acquisition, image processing and robot control with one comprehensive application is also a major benefit. Of course, to ensure this functionality, it was first necessary to create a theoretical base on which to build. The main problem was to create a control part of the robot control in C # and to link it to the basic control program created in C ++.

## References

1. Gonzalez, R.C. - Woods, R.E.: Digital image processing. Upper Sadle River: Prentice Hall, 2002. ISBN 02-01-18075-8.
2. Šonka, M. – Hlaváč, V.: Počítačové vidění. Praha: Grada, 1992. ISBN 80-85424-67-3.
3. Šonka, M. – Hlaváč, V – Boyle, R.: Image processing, analysys and machine vision. Toronto: Thomson, 2008.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

4. Svoboda, T. – Kybic, J. – Hlaváč, V: Image processing, analysys and machine vision. A matlab comparsion. Toronto: Thomson learning, 2007. ISBN 04-95295-95-7.
5. Russ, J.C.: Image processing handbook. New york: CRC press, 2002. ISBN 0-8493-1142-X.
6. Hartley, R. – Zisserman, A.: Multiple view geometry in computer vision. Cambridge: Cambridge university press, 2004. ISBN 05-21540-51-8.
7. Laganière, R.: OpenCV 2 computer vision aplication programming cookbook. Birmingham: Packt Publishing, 2011. ISBN 978-1-849513-24-1.
8. Szeliski, R.: Computer vision: algorithms and applications. London: Springer-Verlag, 2011. ISBN 978-1-84882-934-3.
9. Canny, J.: A compotational approach to edge detection. In: IEEE transaction on pattern analysis and machine intelgence, Roč. 8, č. 6 (1986), s. 679-698. ISSN 0162-8828.
10. Marr, D. – Hildreth, E.: Theory of edge detection. In: Proceedings of the royal society of London, Roč. 116, č. 796 (1980), s. 187-217. ISSN 1364-5021.
11. Smith, S.M. – Brady, M.J.: A new approach to low level image processing. In: International journal of computer vision , Roč. 23, č. 1 (1997), s. 45-78. ISSN 1573-1405.
12. Ružický, E. – Ferko, A.: Počítačová grafika a spracovanie obrazu. Bratislava: Sapientia, 1995. ISBN 80-967180-2-9.
13. Mercimek, M., Gulez, Z., Mumcu, T.V.: Real objects recognition using moment invariants. In: Sadhana, Roč. 30, č. 6 (2005), s. 765-775. ISSN 0973-7677.
14. Žára, J.: Moderní počítačová grafika. Brno: Computer press, 2004. ISBN 80-251-0454-0.
15. Bay, H. – Ess, A. – Tuytelaars, T. – Van Goo, L.: Speedd-up robust features (SUFR). In: Computer vision and image understanding, Roč. 110, č. 3 (2007), s. 346-359. ISSN 1077-3142.

УДК 621.8

*Сукоп Марек, Петер Ференчик*

## РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО РОБОТИЗОВАНОГО МОДУЛЯ З КАМЕРНОЮ СИСТЕМОЮ

**Актуальність теми дослідження.** Більш складні роботизовані системи характеризуються певним рівнем інтелектуальної поведінки, де на основі входу система здатна адаптувати свою поведінку. Реалізація елементів, що підтримують інтелектуальну поведінку в робототехнічних системах, особливо тих, що базуються на зображенні пристроїв, стає загальною практикою. Причина проста – така система швидша та більш точніша.

**Постановка проблеми.** Однак створення машинного зору є складною проблемою, особливо якщо йдеться про додатки з нестандартними вимогами. Для кожного завдання систему зору необхідно адаптувати до умов та вимог об'єктів, що контролюються. Інші налаштування зображення та алгоритми повинні застосовуватися до статичних об'єктів, а не до рухомих об'єктів. Інформація про двовимірне зображення є достатньою для певного процесу виготовлення, а для інших потрібен третій вимір для видалення заданої частини з невпорядкованого об'єднання. Створення інтелектуального роботизованого модуля із камерною системою вимагає створення системи зору, яка відповідає специфічним вимогам. Тут відкритий простір, оскільки існує багато різних процедур та принципів, з якими потрібно узгоджуватися, але не всі є однаково ефективними та надійними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Більшість методів обробки зображень можуть поєднуватися один з одним, або може бути розроблений новий, більш ефективний спосіб вирішення проблеми з використанням вже відомих підходів. Додавання до цього факту нестандартних вимог, що виникають на практиці, є беззаперечною причиною, чому доцільно займатися обробкою зображень для промислового використання.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми** є розроблення і створення роботизованого модуля, діяльність якого буде контролюватися на основі сприйняття зображення, отриманого з цифрової камери.

**Постановка завдання.** Основне завдання цієї статті полягає у розробці та створенні роботизованого модуля, діяльність якого буде контролюватися на основі сприйняття зображення, отриманого цифровою камерою. Отримане зображення буде оброблено узгодженими алгоритмами обробки зображень, що приведе до створення керівних дій для управління рухом маніпулятора.

**Виклад основного матеріалу.** У роботі розглядається конструкція роботизованого модуля, завдання якого – маніпулювати зразками предметів, розміщених на конвеєрі, за допомогою паралельного робота-маніпулятора на основі сприйняття зображення. Основна частина конструкції - це створення програмного забезпечення управління, яке на першому рівні забезпечує належне функціонування окремих компонентів, а на другому рівні їх взаємну співпрацю, що забезпечує виконання необхідної функціональності роботизованої системи загалом. Створене програмне забезпечення працює в операційній системі Windows 7, де пропонується простий інструмент для управління рухом паралельного робота без використання інших засобів управління. Це означає, що рухом робота можна керувати безпосередньо з програми управління, що дозволяє впливати на робота і об'єкт навіть в ручному режимі. Зображення, отримане камерою, може коригуватися програмним забезпеченням за допомогою реалізованих інструмен-

тів до початку автоматичної маніпуляції, що дозволяє користувачеві встановити правильні вхідні параметри для забезпечення надійної ідентифікації об'єкта.

**Висновки відповідно до статті.** Для розробки роботизованої системи, функціонування якої контролюється на основі візуального сприйняття, необхідно було придбати теоретичні знання для правильного підбору окремих компонентів системи, а також їх правильного розміщення всередині роботизованого модуля. Значну увагу приділено вибору підходящого та економного чутливого елемента пристрою та способу освітлення сканованих об'єктів.

Для отримання зображення з камери необхідно було також вивчити та зрозуміти принцип роботи із зображенням, отриманим камерою через SDK, виготовленим безпосередньо виробником камери. Однак отримання зображення було лише першим кроком для початку процесу обробки зображень. Для того, щоб витягти необхідні дані з отриманого зображення, а потім створити керуючі інструкції з даних для управління роботом, необхідно було детально вивчити окремі кроки та процедури обробки зображень.

У частині роботи, що стосується обробки зображень, отримані знання були застосовані до самого процесу обробки, але використовувалися не лише відомі підходи. Завдяки зменшенню завантаження процесора і, отже, скороченню процесу обчислення, в процес обробки зображень також були введені власні процедури. Фактичний «економний» підхід застосовувався та перевірявся в процесі порогового визначення, де був створений «скорочений алгоритм порогової оцінки». Підхід також застосовано для процесу пошуку об'єкта в зображенні, створюючи «мережевий метод об'єкта в зображенні», який використовує той факт, що шукають та ідентифікують відомі об'єкти в промислових додатках на відміну від ідентифікації об'єктів у невідомому середовищі.

Поєднання зображення, обробки зображень та управління роботом з одним комплексним використанням також є головною перевагою. Звичайно, щоб забезпечити цю функціональність, спочатку потрібно було створити теоретичну базу, на якій проводилася розробка. Основна проблема полягала в тому, щоб створити контрольну частину керування роботом в C# і пов'язати її з базовою програмою управління, створеною в C++.

**Ключові слова:** роботизований модуль; машинне бачення; камерна система; інтелектуальна система.

Fig.: 9. References: 15.

**Sukop Marek** – Associate professor, Ph.D. of Technical Sciences, Department of robotic, Mechanical faculty, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Сукоп Марек** – доцент, кандидат технічних наук, Технічний університет Кошице (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**SCOPUS Author ID:** 36615762200

**E-mail:** marek.sukop@tuke.sk

**Ferenčík Peter** – PhD student in Technical Sciences, Department of robotic, Mechanical faculty, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Петер Ференчик** – аспірант, Технічний університет Кошице (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).



Peter Tuleja

**DESIGN AND REALIZATION OF GRIPPERS WITH PERMANENT MAGNETS**

**Urgency of the research.** Modern production requires simple and inexpensive component solutions for gripping large parts. The design of gripping elements using a permanent magnet in this aspect is a promising direction.

**Target setting.** The aim of the project was to realize a gripping component from a commercially available pneumatic drive supplemented with a neodymium permanent magnet and to revive the resulting assembly with a pneumatic portal manipulation device designed for educational activities at the department.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Implementation of the project required a detailed market research focused on the tentacles of a similar concept and the study of the principles and properties of permanent magnets. By analyzing the information the project objective was optimized - design of cheap and reliable gripping element.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Available components were used for the resulting solution, with an emphasis on low acquisition costs. This was due to the fact that the output was intended for laboratory use.

**The research objective.** The aim of the research was to build a real functioning and reliably working gripping device usable as an object for educational activities in the education of our students.

**The statement of basic materials.** Design and practical implementation of the grippers with permanent magnets for gripping parts represented in the work. Activation and control of the grips is implemented by compressed air. The implementation of the output confirmed the correctness of considerations as well as the feasibility of the repeatability of this output while meeting the basic requirement for low costs. The project was based on the principles offered by leading companies, but the implementation output gives a higher gripping force at lower input costs. In addition, it provides the possibility of extension to the size range according to customer requirements.

**Conclusions.** The project was successful and its implementation also contributed to the improvement of the educational process at the department, which was one of the monitored benefits. It provides an illustrative demonstration of the possibilities of performing manipulation tasks with non-standard objects.

**Keywords:** manipulation task; automation; one-sided gripping; permanent magnet; pneumatic components.

Fig.: 9. References: 7.

**Introduction.** When designing automated workplaces that require the handling of some specific types of objects of manipulation ( $O_M$ ), such as sheet metal or flat products (large dimensions in the X and Y axes of the basic coordinate system, but small dimensions in the Z axis), classical forms of gripping these objects cannot be used.

The technical solution is the principle of one-sided gripping. Perhaps the most common way of doing this is undoubtedly the manipulation with active vacuum suction effectors [5, 6]. However, some applications do not allow the use of vacuum, so they must be replaced by more appropriate methods.

This is how our solution was created as the output of the diploma thesis [1]. It is based on commercially produced effectors using a combination of compressed air and a permanent magnet to fixing the object of manipulation.

**One-sided gripping.** For automated  $O_M$  manipulating, it is necessary to clearly define the handling task. This consists in executing a chain of operations related to changing the position of the  $O_M$  in space, or changing its orientation in space, respectively both at the same time as a sequence of operations related to its grasp in the starting point, its fixation during the manipulation period and its release at the target site.

For this purpose, devices commonly called gripping effectors are used. Depending on the nature of action the gripping elements on the  $O_M$ , there are effectors with two-sided grip (or more-sided grip), one-sided grip and a specific type of grip where there is no mechanical contact at all, Fig. 1.

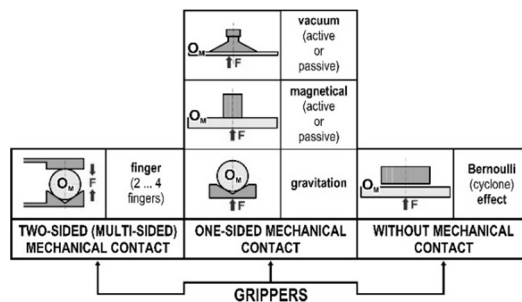


Fig. 1. Gripping effectors according to the nature of contact with  $O_M$

Unlike double-sided (multi-sided) grasping, it is specific for unilateral grasping that the grasping effector's contact with the  $O_M$  is often at only one point (unless the stability of the  $O_M$  during the handling task is thereby impaired). If the force analysis for gripping by a single element does not suit, it is necessary to use a larger number (2 or more) of gripping elements and their arrangement should be solved by a suitable frame structure, Fig. 2.

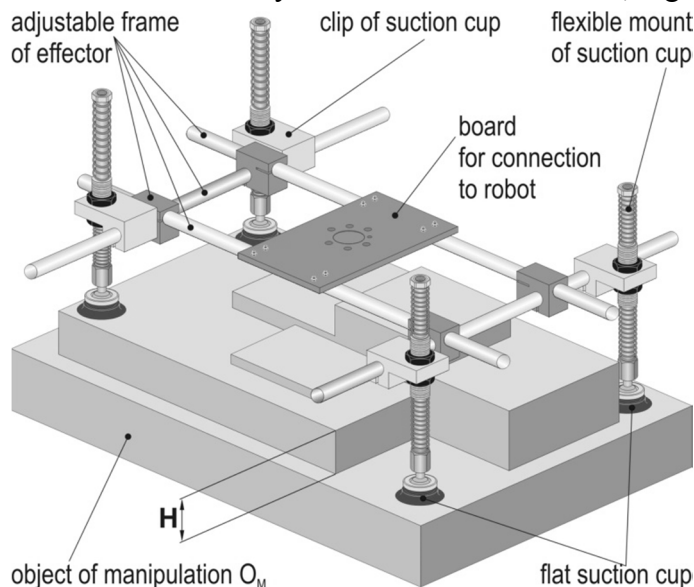


Fig. 2. Frame construction for one-sided gripping elements [6]

The physical principles used for one-sided gripping are varied [6, 7], Fig. 3.

The most commonly used are active vacuum suction cups, but also magnetic grippers with electromagnets and permanent magnets.

The decisive factor for their choice is application suitability and of course price.

The suitability of the application relates to the suitability of the selected physical principle for gripping a particular  $O_M$  (material and  $O_M$  surface quality, surface integrity, surface division, etc.).

GRIPPING FORCE PHYSICAL NATURE					
mechanical bond	vacuum	compressed air	electricity	magnetism	adhesion
needle	suction cup	cyclone cup	electro-magnet	permanent magnet	adhesive strip
GRIPPING FORCE TECHNICAL REALISATION					

Fig. 3. Physical principles used in unilateral grip

**General effector model.** To describe any effector (not just a gripper) it is possible to use the general theory (theory of systems) about the system view of functional units and machinery.

The effector, as a technical system (assembly), is made up of elements (modules, functional nodes). It can be defined and described by a generalized system model, Fig. 4. It consists of functionally separate elements and modules and links [5]:

- $IF_1$  flange connection to the robot
- $IF_2$  connection with the effector device
- $M_M$  complementary motion micromechanism
- $G$  gripping effector
- $C$  position and orientation compensator
- $T$  tool (technological effector)
- $S$  special effector (combined)

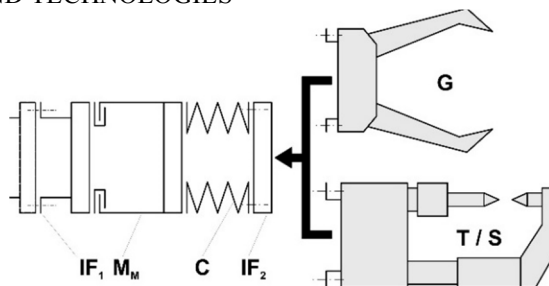


Fig. 4. System model of the effector [4], edited by the author

Constructional designs of magnetic effectors [5] may have one of the system structures

$$IF_1M_M C IF_2 - G$$

$$IF_1M_M IF_2 - G$$

$$IF_1 C IF_2 - G$$

$$IF_1 IF_2 - G$$

The function of grasp - constriction - fixation of the passive gripper is accomplished by applying permanent magnets  $M_P$  in the gripper assembly G.

In the specific arrangement of our solution it is then possible to select the arrangement from the given classification

$$IF_1M_M C IF_2 - G$$

The starting point of the solution was the gripping effectors by GOUDSMIT [2], Fig. 5.

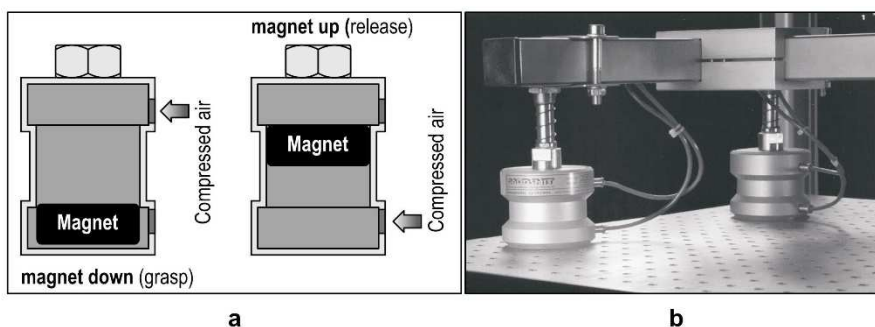


Fig. 5. Passive magnetic gripper with pneumatic control by GOUDSMIT [2]

Similar solutions in their offer have eg. SMC, SCHMALZ and others. To compare our acceptance, we present selected parameters of these effectors, tab. 1.

Table 1

Comparison of selected parameters of magnetic effectors of world producers

Manufacturer	Type	Gripping force [N]	Diameter [mm]	Pressure [MPa]	Price [EUR]
GOUDSMIT	HGR	35...3500	20...160	-0,07...0,55	151...960
SCHMALZ	SGM-HD	35...290	30...70	0,3...0,6	300...900
	SGM-HT/-HP	28...560	20...50	0,25...0,6	
SMC	MHM-X6400	30...80	30...80	0,25...0,6	150...200

Source of information: [2], [3], [4].

**Project realisation.** For the purpose of our solution, the concept of using the existing pneumatic compact drive CQ2B25-15D (SMC Corporation, Japan) [4] was used, on which a neodymium magnetic lens with a diameter of 20 mm and a height of 8 mm terminated with an M6 thread was mounted. This lens in a perpendicular direction provides a holding force of up to 140 N.

To eliminate the gripping force (release) between the  $O_M$  and the magnet at the  $O_M$  release location, the principle of detaching the lens from the  $O_M$  by the force of the pneumatic drive was used. To add the  $O_M$  in the place of its storage is used a separating body, which was produced by 3D printing. The assembly and the illustration of the effector are shown in Fig. 6.

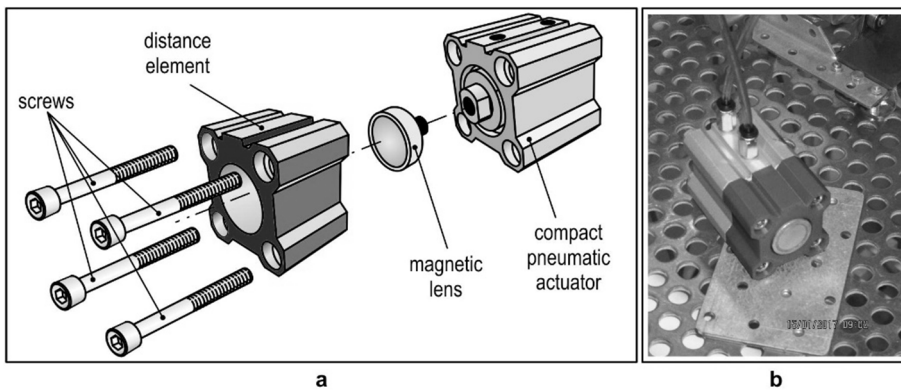


Fig. 6. Pneumatically operated magnetic gripper

The total cost of building our concept did not exceed EUR 50. The supply pressure for the pneumatic drive required to detach the magnet from the  $O_M$  was 0.5...0.6 MPa.

It should be emphasized that the effector was developed for demonstration purposes within the educational process at the department. therefore the figures given are for guidance only. A detailed analysis of effector characteristics (dynamic tests, etc.) is under preparation.

The gripping effector was used as an end effector on the laboratory pneumatic portal structure manipulation mechanism, Fig. 7.

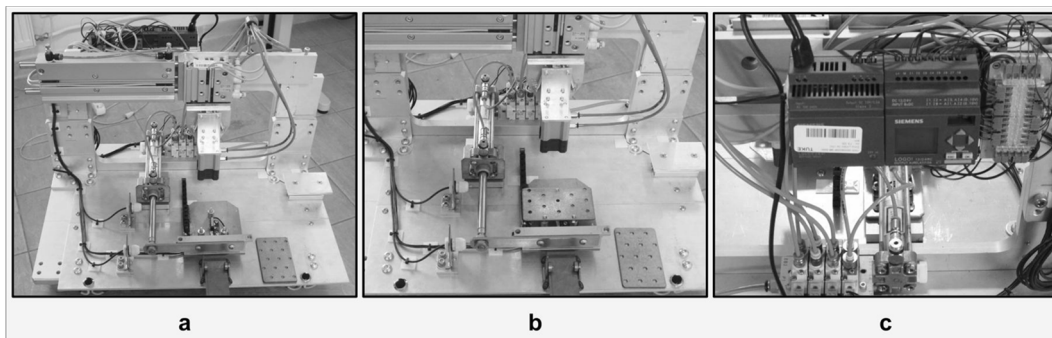


Fig. 7. Pneumatic portal mechanism (a, b) and its control unit (c)

Perforated sheet blanks with dimensions of 100x60x2 mm were determined as  $O_M$ 's intended for manipulation with the effector.

The mechanism is controlled by the logic controller SIEMENS LOGO! (0BA6 ...). FBD handling cycle program built in LOGO! Soft Comfort v. 8.0 shows Fig. 8.

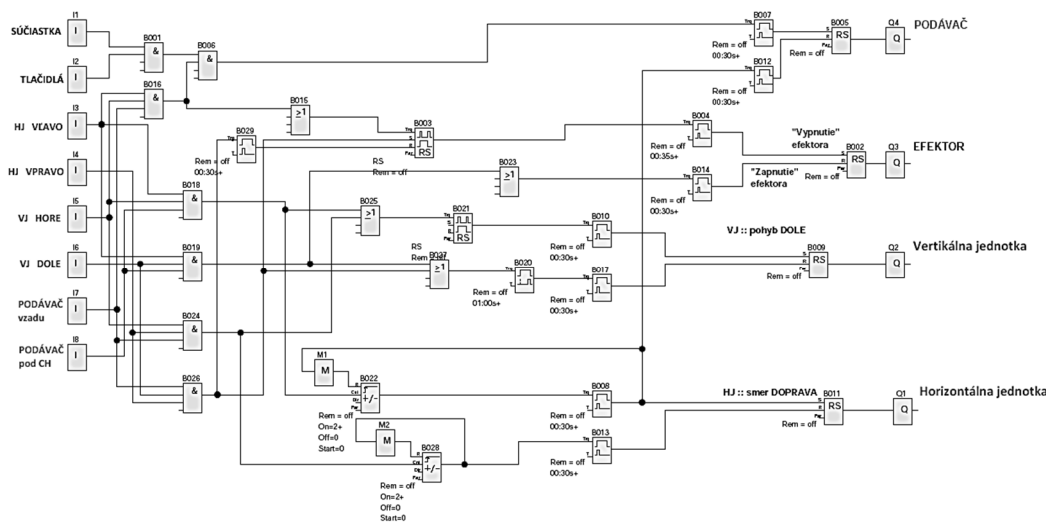


Fig. 8. Handling cycle program

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Since the withdrawal point of the handling mechanism is realized as an input with a human operator, one blank per one handling cycle is counted.

In order not to have to deal with special approach vectors of the manipulation device to establish sufficient contact of the effector with the  $O_M$ , the compensator was applied as a separate mechanical structure defining the removal height during handling (compensation in the  $Z +$  direction), Fig. 9.

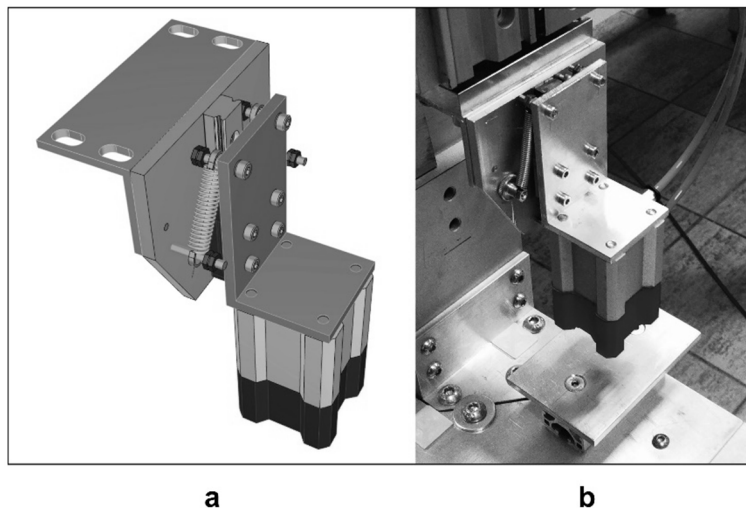


Fig. 9. 3D model of gripping effector assembly with compensator (a) and its real form (b)

**Conclusions.** The realization of the project from the assignment of the diploma thesis to the realization output in the form of an educational model (stend) took several years and went through several changes. Today, he is able to demonstrate in the process of teaching at the Department of Robotics in explaining the individual principles of gripping effectors working on the basis of one-sided gripping. There are other alternatives to unconventional one-sided gripping solutions (e.g. Bernoulli suction cup).

**Acknowledgement.** *This contribution is the result of the project implementation: Research modules for intelligent robotic systems (ITMS: 26220220141) supported by the Research & Development operational Program funded by the ERDF.*

### References

1. Baločková, Lenka, Tuleja P.: Návrh uchopovacej hlavice pre tvarovo zložité objekty. Diplomová práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2011. 61 s. (in Slovak).
2. <https://www.goudsmitmagnets.com>.
3. <https://www.schmalz.com>.
4. <https://www.smc.eu>.
5. Smrček, J., Palko, A., Tuleja, P.: ROBOTIKA - Uchopovacie efekty, skriptum, TU v Košiciach, 2007, ISBN 978-80-8073-961-4 (in Slovak).
6. Sukop M., Tuleja P., Janos R., Jurus O., Marcinko P., Semjon J., Vagas M.: Using the Vacuum in Handling Tasks in the Context of Operating Cost Savings. In: *Journal of Automation and Control*, 2017, Vol. 5, No. 2, pp. 85-88. Available online at <http://pubs.sciepub.com/automation/5/2/12>. © Science and Education Publishing DOI:10.12691/automation-5-2-12.
7. Tuleja P.: Technical Solutions of Problems in the Handling of the Object with Non-consistent Surface. In: *American Journal of Mechanical Engineering*, 2016, Vol. 4, No. 7, pp. 400-405. Available online at <http://pubs.sciepub.com/ajme/4/7/31> ©Science and Education Publishing DOI:10.12691/ajme-4-7-31.

УДК 621.5

Петер Тулея

**ПРОЕКТУВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАХВАТІВ  
З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ**

**Актуальність теми дослідження.** Сучасне виробництво вимагає простих і недорогих компонентних рішень для захоплення великих деталей. Проектування захватних елементів з використанням постійного магніту в цьому аспекті є перспективним напрямком.

**Постановка проблеми.** Метою проекту було реалізувати захоплюючий компонент з наявного у продажу пневматичного приводу, доповненого неодимовим постійним магнітом, і застосувати для приводу захватного вузла пневматичний пристрій для маніпуляції порталом, призначений для навчальної діяльності на кафедрі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Реалізація проекту вимагала детального дослідження ринку, орієнтованого на захвати аналогічної концепції та вивчення принципів та властивостей постійних магнітів. В результаті аналізу інформації була оптимізована мета проекту – проектування дешевого та надійного захватного елемента.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Для одержуваного рішення були використані доступні компоненти, з акцентом на низькі витрати на їх придбання. Це було пов'язано з тим, що проект був призначений для лабораторного використання.

**Постановка завдання.** Метою дослідження було створення реально функціонуючого та надійно працюючого захватного пристрою, додатного як об'єкт для навчальної діяльності у навчанні наших студентів.

**Вклад основного матеріалу.** У роботі представлено проектування і практична реалізація захватів з постійними магнітами для захватування деталей. Активізація і управління захватами реалізується стисненим повітрям. Реалізація результатів підтвердила правильність міркувань, а також повторюваність результатів при додержанні основної вимоги щодо низьких витрат.

Проект ґрунтувався на принципах, запропонованих провідними компаніями, але результати впровадження демонструють більш високу силу захоплення при менших витратах. Крім того, забезпечується можливість розширення діапазону розмірів відповідно до вимог замовника.

**Висновки відповідно до статті.** Проект був успішним, його реалізація також сприяла вдосконаленню навчального процесу на кафедрі, що було однією із зазначених переваг. Він забезпечує наочну демонстрацію можливостей виконання завдань маніпулювання нестандартними об'єктами.

**Ключові слова:** завдання маніпуляції; автоматизація; однобічне затискання; постійний магніт; пневматичні компоненти.

Рис.: 9. Бібл.: 7.

**Tuleja Peter** – Eng., PhD, assistant professor, Technical university in Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automatization, Mechatronics and Robotics, Department of Robotics (Komenskeho Park 8, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Петер Тулея** – помічник професора, кандидат технічних наук, Технічний університет Кошице (Komenskeho Park 8, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**E-mail:** peter.tuleja@tuke.sk

**Scopus Author ID:** 55570858300

Marek Vagaš, Dušan Šimšik

## AUTOMATION OF ASSEMBLY OPERATION BASED ON DUAL-ARM ROBOT

**Urgency of the research.** Automation as a whole, together with increasing of demands from customer push companies at all levels to the implementation of new and innovative solutions of robotic devices. This reason we consider as sufficient for realization of special customized solution for deployment at assembly operations.

**Target setting.** Purpose of article is to give an example how to increase a level of automation based on specific requirements that consists from assembly area.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Actual research is nowadays focused at such problematics, because return of investments based on robotic devices seems to be reliable and people at workplace can realize and focus to another type of tasks.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Specific automated solution based on dual arm robot implementation into the assembly process brings us a new possibility for assembly flow realization together with required assembly sequence for whole operation.

**The research objective.** The aim of article is to provide an idea how to automate such manual assembly tasks with focus to robotic devices implementation.

**The statement of basic materials.** For realization of automated solutions is good to have a suitable material how to solve assembly sequence and assembly process.

**Conclusions.** Published article presents an innovative idea for dual arm robot implementation into the assembly process. Proposed assembly sequence based on human – robot cooperation at this specific workplace gives an example and view how automation of assembly processes can be solved.

**Keywords:** automation; assembly operation; dual arm robot.

**Fig.:** 4. **References:** 8.

**Introduction.** The emerging needs for automation in the increasingly wider range of applications in conjunction with planning in term of both: short and medium future points out to the investing and developing of dual arm collaborative robot technology as a means for top level of robotic technology. Dual arm collaborative robots are implemented into operation mainly due to increasing requirements for process automation, services or ergonomically unsuitable workplace conditions [1]. In workspace of an ergonomically improper workplace, there is a high risk of damage at assembled parts of the finished component as a whole by operators themselves. So, collaborative robots appear to be suitable innovative equipment, which has met with great acclaim especially in automotive companies. In order to ensure safe operation of this robotic equipment, it is not necessary to enclose a complete collaborative arm into a work cage. It can work safely right next to a human without causing any injury [2]. This is one of the first solutions presented regarding to the concept “Industry 4.0”.

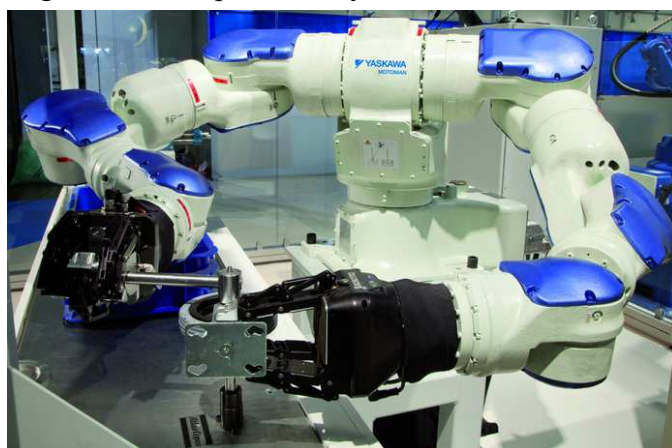


Fig. 1. Assembly operation using dual arm robot

Kinematics structure of this type of robot is ideally suited for assembly, setting or inspection operations depending on customer needs. They have an almost unlimited working space and thanks to their construction they occupy a small, space-saving area. Integration of drives and sensing technology directly into the interior of robotic arm prevents the risk of collision,

capturing of objects and humans. Reasons for deploying two-arm collaborative robots are summarized in the following points:

- Decreasing company operating costs thanks to the benefit in form of advanced robotic automation without usual additional costs associated with standard programming and adjusting work zones.
- Average payback period is within one year (typically about 195 days).
- Replacement of human operators in environments not suitable for them or dangerous (explosive, contaminated, etc.)
- Removing of monotonous operations and reducing accidents, this on exertion and repetitive movement threatens to the operator.
- Increasing of production capacity, quality, accuracy and production speed. Using of a robotic arm in a new assembly process automates every small-lot production operation with sufficient flexibility.
- Collaborative robotic arm is space-saving and can be quickly reprogrammed for cooperation with various machines. Extension of robots with additional peripherals can be individually adapted to installation requirements.

The assembly activities often require a collaborative robotic arm to accurately locate and grip of individual parts. Often is necessary to handle small parts of different shapes and sizes. In case that these devices taking on repetitive simple and monotonous repetitive tasks, they release operator for more creation of demanding and creative tasks.

**Automated assembly of selected equipment.** As a suitable example for realization of two-handed automation by a collaborative robot we choose a specific gearbox that is assembled into motorcycles, which is sold in several types. Gearbox is produced in series by company LIFAN, Fig. 2. Automation of such assembly activity requires determination of a stable components position and design of a suitable worktable for the both robotic arms [3].



*Fig. 2. LIFAN 110CC gearbox*

Systematic approach for achieving of optimum assembly activity range starting from initial planning of collaborative assembly as a whole, through determination of individual sequential handling operations, selection of peripheral devices, spatial layout, process decomposition into programmable sections, installation of collaborative workplace equipment for operation up to maintenance is presented in Table 1.

Table 1

*Methodology for proposing of assembly sequence*

1.	Determination of goals to be achieved with aim of collaborative robots.
2.	Strategic decisions about transformations in assembly - handling process.
3.	Analysis of assembly process and conditions for assembly - transport procedures.
4.	Selection of equipment into the collaborative workplace with regard to compatibility with working environment.
5.	Design of structure and spatial layout for individual parts of assembled object.
6.	Determination of input requirements for assembly process.
7.	Ensuring of links with working environment.



TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

The responsible selection of optimal weighted decision matrix is based on design of assembly structure for assembly object, including known knowledge and methodologies for designing of such assembly activities or systematic approaches, as well as design and operation knowledge of similar collaborative applications [4]. Method should be used as a strong decision-making tool in cases where solution requires emphasis on each of considered criteria, usually of unequal weighted significance. Principle of method consists of evaluating weight (importance) for each criterion to be scored on a scale from 1 up to 10, so that grade 1 is assigned as lowest weight and grade 10 as largest. Same scale is used also as evaluation the fact that three variants of proposed solution by us meet selected criteria (mentioned above), i.e. level "1" - does not meet up to "10" - suits ideally. Table 2 shows resulting decision matrix for choosing optimal assembly process for assembled object.

Table 2

*Weight decision matrix for choose of optimal assembly process for assembled object*

Criteria	Weight	Evaluation of individual variant		
		Variant 1	Variant 2	Variant 3
Number of changes in position and orientation of assembled object	8	9	7.5	6
Assembly time	9	9	8	8.5
Number of tools and implements	6	7	6.5	7
Complexity of assembly process	4	9.5	5.5	8
Weighted sum		233	193	198.5
Rank		1	3	2

Individual variants of assembly process for assembled object were assessed on the basis of results of decision matrix, which shows that variant A is considered as best, it has highest score. The following criteria were considered:

- Number of changes in position and orientation of assembled object.
- Assembly time.
- Number of tools and implements.
- Complexity of assembly process.

In initial phase of creation and selection of suitable criteria to assess, it was necessary to develop a philosophy that optimizes conditions of this assembly process with respect to changes in position and orientation of individual parts for assembled object during time of process. Next phase involved selection of criteria for assessing the assembly process feasibility as proof that realisation exists. Suitable criteria that support this idea are e.g. experimental tests, measurement of assembly time and more [5]. The last stage during selection of assessed criteria was possibilities and ways for using simulation of automated projection systems in the form of CAD / CAM technology, enabling creation of an assembly scenario, so as to approximate as closely as possible to the structure of assembly workplace, Fig. 3.

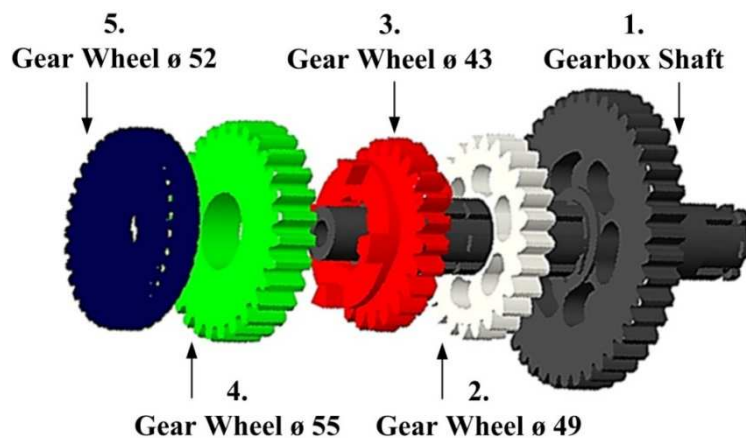


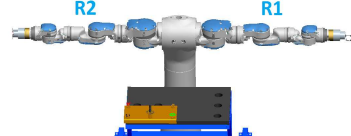

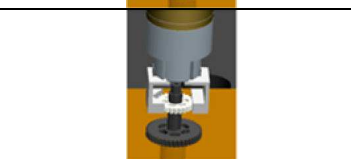

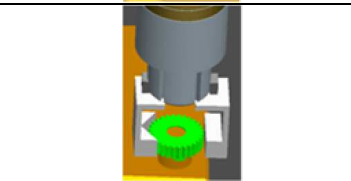
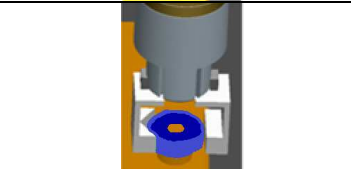


Fig. 3. Optimal composition of LIFAN 110 CC assembling

**Assembly sequence for dual arm robot.** It should be considered that creation of assembly scenario is a complex and important process of a wider problem - planning of collaborative assembly as a whole, which is mostly solved by partial tasks methods. Therefore, creation of assembly scenario is often carried out by IT software packages capable of generating, simulating and analysing of individual sequences for proposed assembly scenario according to the predefined conditions (assembly time, product quality, etc.). Assembly scenario of selected object is divided into 6 successive elementary steps, see Table 3.

Table 3

*Assembly sequence for chosen equipment*

Step	 Human activity	 Robot activity	Position
1.	Operator gives a command for starting of assembly sequence.	Robot is going to the initialising position for configuration before gripping of objects.	
2.	Operator prepares white gear wheel 2.	Robotic arm R2 takes a shaft 1. and inserts them into specific position at working table for next assembly process. Robotic arm R1 moves for white gear wheel 2.	
3.	Operator prepares red gear wheel 3.	Robotic arm R1 inserting white gear wheel 2.0 into position. Robotic arm R2 moves to position for taking of red gear wheel 3.	
4.	Operator prepares green gear wheel 4.	Robotic arm R1 inserts red gear wheel 3. Robotic arm R2 moves to position for green gear wheel 4.	
5.	Operator prepares blue gear wheel 5.	Robotic arm R1 inserting green gear wheel 4. Robotic arm R2 moves to position for blue gear wheel 5.	
6.	Operator completing of assembly process.	Robotic arm R1 inserts blue gear wheel 5. Robotic arm R2 moves to initial position.	

Sequence of assembly for collaborative application is divided between human and robot. Operator activities are focused on implementation of preparatory activities, resp. on inserting of individual parts selected assembled object, i.e. gearbox LIFAN 110 CC. Activity of dual-arm robot is directed mainly towards to the main activities, thus facilitating work for operator and accelerating overall assembly cycle time. For safety reasons, robot stops during operator storing of individual parts gearbox near robot's workspace as well as waiting for operator confirmation commands to continue mounting via control panel [6].

**Used equipment for automated assembly.** Assembly automation should be a substitute for single-purpose applications where greater flexibility is required. Wide possibilities for automation of assembly processes assume mastering of design solution based on modular principle, which enables realization of several variant dispositions, where basis of this entire concept is advanced intelligent control system [7].

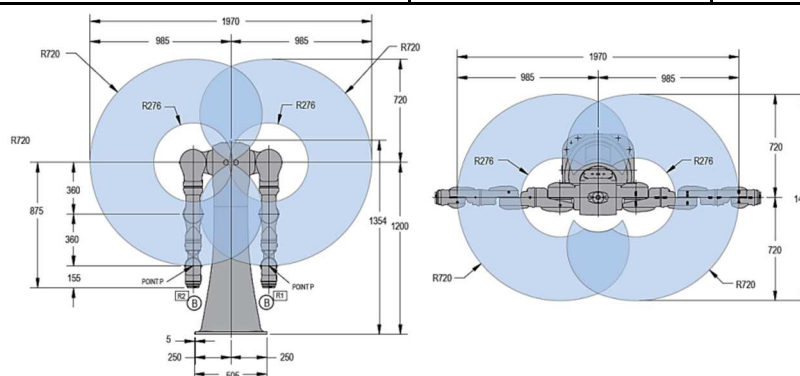
*Dual-arm robot*

Main element for automation that is involved into the assembly process is dual-arm robot from company MOTOMAN SDA10F. Its main application area is assembly processes, packaging and handling [8]. The characteristic of its properties can be seen in Table 4. Robot workplace and dimensions see at Fig. 4.

Table 4

*Main properties of dual arm robot*

<b>Number of robot axes</b>	<b>15 (7 per arm and 1 for base rotation)</b>	
<b>Payload</b>	10 kg (per arm)	
<b>Max. reachability</b>	Horizontal direction: 720 mm Vertical direction: 1400 mm	
<b>Repeatability</b>	± 0.1 mm	
<b>Maximal range of movements</b>	rotation of waist	± 170°
	stroke	± 180°
	forearm	± 110°
	elbow	± 170°
	upper arm	± 135°
	rotation upper arm	± 180°
	stroke of forearm	± 110°
<b>Maximal speed</b>	rotation of waist	130 °/s
	stroke	170 °/s
	forearm	170 °/s
	elbow	170 °/s
	upper arm	170 °/s
	rotation upper arm	200 °/s
	stroke of forearm	200 °/s
<b>weight</b>	220 kg	
<b>Max. permissible inertial moments</b>	rotation of forearm	1 kg. m <sup>2</sup>
	stroke of forearm	1 kg. m <sup>2</sup>
	rotation of elbow	0.4 kg. m <sup>2</sup>



*Fig. 4. Working envelope and dimensions of dual arm robot*

**Conclusions.** Deployment of a dual-arm robot in order to automate assembly process and its suitable application into suitable solutions requires perfect preparation in design and also in the field of software equipment. His postulate for cooperative and synchronized movement among the arms and torso with full support of open control architecture will increase level of automation as a whole. In our case, task for dual-arm robot is primarily storing and positioning operations, thus they facilitating work of operator and thus is possible acceleration of overall assembly cycle time.

**Acknowledgement.** This work has been supported by the Slovak Grant VEGA 1/0330/19 - Research and design of algorithms and systems for the fusion of heterogeneous data in multi-sensor architectures.

## References

1. Consiglio, S., G. Seliger, N. Weinert. (2007). Development of Hybrid Assembly Workplaces. In: *CIRP Annals*, Volume 56, Issue 1, 2007, Pages 37-40, ISSN 0007-8506.
2. Marek Vagaš, Dušan Šimšík, Daniela Onofrejová. (2019). Factors for successfully implementation of automated solutions based on industry 4.0. In: *ARTEP 2019, Automatizácia a riadenie v teórii a praxi*. 13. ročník konferencie odborníkov z univerzít, vysokých škôl a praxe. Košice: Technická univerzita v Košiciach, s. 1-8. ISBN 978-80-553-3250-5.
3. J. Krüger, T.K. Lien, A. Verl. (2009). Cooperation of human and machines in assembly lines. In: *CIRP Annals*, Volume 58, Issue 2, Pages 628-646, ISSN 0007-8506.
4. Senderská K. (2002). Inovačné metódy a techniky a ich uplatnenie v procese projektovania montážnych systémov. In: *Transfer inovácií 5/2002*. Košice: TU, SjF, č.5/2002, s. 124-126. ISBN 8070999527.
5. Ján Semjon et. al. (2018). Comparison of the delta robot ABB IRB 360 properties after collisions. In: *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*. Roč. 20, č. 1, 2018, s. 42-46. ISSN 1335-4205.
6. Marek Vagaš, Ján Semjon, Mikuláš Hajduk. (2016). Realisation of experimental cooperative workplace for assembly tasks. In: *Advances in Robot Design and Intelligent Control*. Zurich: Springer, P. 361-369. ISBN 978-3-319-49057-1.
7. Tůma, J., Wagnerová, R., Farana, R., Landryová, L. (2007). Základy automatizace. In.: *Ostrava: VŠB, Technická univerzita Ostrava*, 288 s. ISBN 978-80-248-1523-7.
8. Vagaš, M. (2014). Variants for the solution of multi robotic systems. In: *Robotics and Manufacturing Systems*. Lublin University of Technology, P. 39-46. ISBN 978-83-7947-104-1.

УДК 621.8

Мареk Вагаш, Душан Шимшик

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ЗБІРНИХ РОБІТ НА ОСНОВІ ДВОРУКОГО РОБОТА

**Актуальність теми дослідження.** Автоматизації взагалі, а також підвищення вимог компаній-замовників на всіх рівнях сприяє впровадженню нових та інноваційних рішень роботизованих пристроїв. Ця причина є достатньою для застосування на виробництві спеціального індивідуального рішення на операціях складання.

**Постановка проблеми.** Мета – навести приклад того, як підвищити рівень автоматизації на основі конкретних вимог, що висуваються на складальних операціях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні фактичні дослідження орієнтовані на проблему автоматизації процесу складання. У результаті впровадження роботизованих пристроїв працівники можуть зосередитись на інших видах роботи.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Конкретне автоматизоване рішення, засноване на впровадженні дворукого робота в процес складання, дає можливість реалізації процесу складання в необхідній послідовності для всіх операцій.

**Мета роботи.** Мета статті – дати уявлення про те, як автоматизувати ручне складання з впровадженням роботизованих пристроїв.

**Виклад основного матеріалу.** Для реалізації автоматизованих рішень потрібно мати інформацію про послідовність та сам процес складання.

**Висновки відповідно до статті.** Опублікована стаття представляє інноваційну ідею багатозадачності робота в процесі складання. Запропонована послідовність складання, що базується на співпраці людини та робота на конкретному робочому місці, наведено приклад, як можна здійснити автоматизацію процесу складання.

**Ключові слова:** автоматизація; операція складання; дворукий робот.

Рис.: 4. Бібл.: 8.

**Vagas Marek** - associate professor, PhD in Technical Sciences, Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Department of automation and human machine interactions (9 Letna Str., 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Мареk Вагаш** – доцент, кандидат технічних наук, Технічний університет Кошице (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**E-mail:** marek.vagas@tuke.sk

**Scopus Author ID:** 55014596100

**Dusan Simsik** – professor, PhD in Technical Sciences, Head of Department Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, Department of automation and human machine interactions (9 Letna Str., 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Душан Шимшик** – професор, кандидат технічних наук, Технічний університет Кошице (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**E-mail:** dusan.simsik@tuke.sk

**Scopus Author ID:** 6602121842

Martin Varga, Filip Filakovský, Ivan Virgala

**SIMULATION AND ANALYZES OF INVERSE-KINEMATIC MODEL OF HUMANOID ROBOT HAND**

**Urgency of the research.** Nowadays robotics and mechatronics come to be mainstream. With development in these areas also grow computing fastidiousness. Since there is significant focus on numerical modeling and algorithmization in kinematic and dynamic modeling.

**Target setting.** Suitable approach for numerical modeling is important from the view of time consumption as well as stability of computing.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Designing and modeling of humanoid robots have high interest in the field of robotics. The hardware and mechanical design of robots is on significantly higher level in comparison with software of robots. So, modeling and control of robots is in the interest of researchers.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Comparison of methods for numerical modeling of inverse kinematics.

**The research objective.** Comparing four methods from the view of performance and stability.

**The statement of basic materials.** This paper investigates the area of kinematic modeling of humanoid robot hand and simulation in MATLAB.

**Conclusions.** The paper investigated inverse kinematic model approaches. There were analyzed pseudoinverse method, transpose of Jacobian method, damped least squares method as an optimization method. The results of the simulations show the advantages of optimization method. During the simulations it never fail in comparison with other tested methods.

**Keywords:** humanoid robot hand; inverse kinematics; Jacobian; simulation.

Fig.: 4. Table: 2. References: 15.

**Introduction.** Nowadays, people are in the contact with the robotic systems almost on daily base. The development in this area significantly arises. Service robots have their utilization in industrial companies, health services, military or like household robots [1]. They can be also used in medicine as prosthesis for people who lose their limbs.

This study focuses on kinematic modeling of robot hand. One of the first works in this research are [2] and [3]. Several researches are focused on modeling of human robot locomotion [4] and [5], some of them deal with modeling of robot hand [1][6][7]. This paper studies inverse kinematic models, simulate them and compare from the view of simulation speed and stability.

The paper is divided as follows. The second chapter deals with biomechanics of human hand describing the joints and bones. Based on biological human hand, the concept of robot hand is designed with corresponding DOF. Next chapter presents iteration methods for inverse kinematic modeling. The inverse kinematic model of robot hand is established and simulated in MATLAB. In the conclusion the methods are compared and the results are discussed.

**Biomechanics.** This section discusses about human hand. Fig. 1 shows particular bones and joints of a human finger. As can be seen in the Fig. 1, human hand consists of 14 phalanges, 5 splint bones as well as 8 wrist bones, see also Fig. 2.

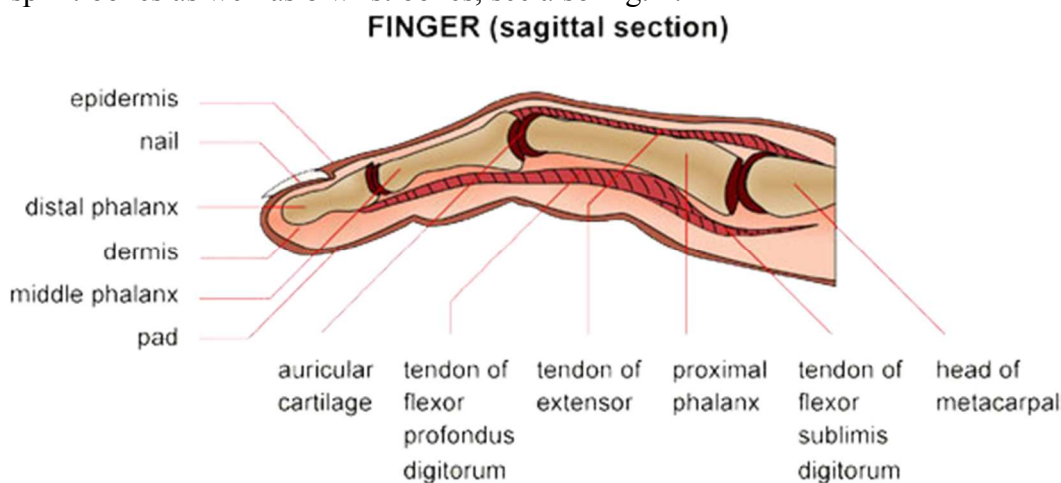


Fig. 1. Finger of human hand

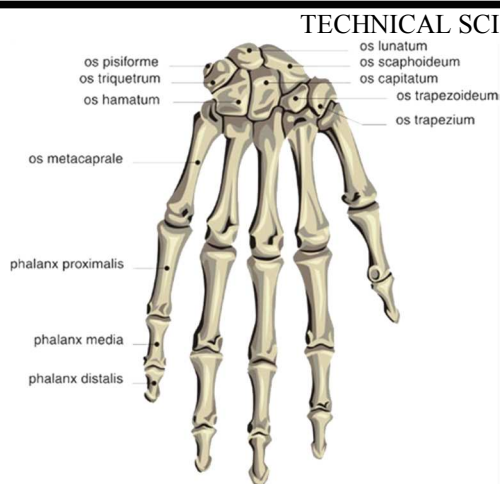


Fig. 2. Bones and joints of human hand

Hand is connected to forearm through carpal bones. For the purposes of kinematic model design it can be neglected. Metacarpal bones form a palm of hand by their arcuate shape and their motion is limited. Carpometacarpal, proximal interphalangeal and distal interphalangeal joints can be considered as revolute joints and metacarpophalangeal joint as ball-joint. A thumb is different from other fingers because it does not have second phalangeal bone and its metacarpophalangeal joint gives it significant opportunity of motion [14]. When the carpal bones are neglected the human hand has 24 + 6 DOF, 24 for hand and 6 for placement in 3D space.

The range of motion of particular joints in the Tab. 1 are shown.

Table 1

*Human hand joints description*

Joint position	Kind of joint	Motion	Range
Wrist	Elliptical	Flexion, Duction	120°, 20°
Carpal – thumb	Cylindrical	Flexion	90°
Metacarpal – thumb	Saddle	Duction, Opposition	50°, 60°
Metacarpal – fingers	Spherical	Flexion, Duction	90°, 30°
Middle – thumb	Cylindrical	Flexion	20°
Middle – fingers	Cylindrical	Flexion	100°
Terminal – thumb	Cylindrical	Flexion	90°
Terminal – fingers	Cylindrical	Flexion	80°

**Mathematical model of humanoid robot hand.** The aim of inverse kinematic model is to find generalized variables  $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \in \mathbb{R}^n$ , where  $n$  is number of DOF. The end-effector coordinates is  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m$ , where  $m$  represents number of task. Considering inverse kinematic model, finding the solution is significantly more difficult task in comparison with direct kinematic model. Numerical solution arises from basic term

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{q}_k)$$

By iteration of following term can be solved inverse kinematic model

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k + \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_k)$$

Where  $\mathbf{x}_p$  is vector of desired position and  $\mathbf{x}_k$  is vector of actual position. Considering  $n$  number of DOF is higher than number of performed task  $m$  we can speak about kinematically redundant mechanism. In this case we can you for example pseudoinverse arising from

$$\Delta \mathbf{q} = \mathbf{J}_p \Delta \mathbf{x}$$

Since Jacobian is no symmetric matrix we can use following equation

$$\mathbf{J}_p = \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{J}^T)^{-1}$$

Considering the case when  $n < m$ , Jacobian is expressed as

$$\mathbf{J}_p = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T$$

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Next frequently used method for inverse kinematic is method based on transposed of Jacobian. This method was firstly used in the works [12] and [13]. The method is based on idea of replacing Jacobian inversion by transpose of Jacobian. It can be expressed as

$$\Delta \mathbf{q} = \delta \mathbf{J}^T \Delta \mathbf{x}$$

where  $\delta$  is scalar value defined by user.

Next considered method is damped least squares (DLS). DLS assume with finding such  $\Delta \mathbf{q}$  that minimizes following equation

$$\|\mathbf{J}\Delta \mathbf{q} - \Delta \mathbf{x}\|^2 + \lambda \|\Delta \mathbf{q}\|^2$$

where  $\lambda$  is damping constant. By mathematical operations can be last mentioned term adjust as

$$\Delta \mathbf{q} = \mathbf{J}^T (\mathbf{J}\mathbf{J}^T + \lambda^2 \mathbf{I})^{-1} \Delta \mathbf{x}$$

where  $\mathbf{I}$  is unit matrix.

With three mentioned methods will be also considered method which lies in optimization process. For optimization method the function *fmincon* is used in software MATLAB. This function tries to find minimum of scalar function of variables. For simulation has to be set the set of initial guess of variables.

$$\min f(x) \text{ for } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ ceq(x) = 0 \\ Ax \leq b \\ Aeqx = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases}$$

where  $x$  is vector of independent variables,  $lb$  is vector of lower boundary values,  $ub$  is vector upper boundary values,  $c(x)$  and  $ceq(x)$  are functions of  $x$  for conditions of equality and inequality,  $A$  and  $Aeq$  are matrices of parameters for conditions of linear equality and inequality,  $b$  and  $beq$  are vectors of parameters of right sides of conditions of linear equality and inequality,  $f(x)$  is objective function of independent variables  $x$ , from which the extreme is searched [15]. Function *fmincon* is gradient-based method.

**Numerical simulations.** All mentioned methods in the previous chapter will be now simulated in order to find the best approach. The simulations in the software MATLAB are done. The parameters for simulations arise from biomechanics of human hand. So particular part of the simulated finger has following length:  $l_1=79,16$  mm;  $l_2=67,5$  mm;  $l_3=30,43$  mm;  $l_4 = 15,81$  mm. Tolerance of inverse kinematic solution is set to be 0,01 mm. The simulation are evaluated from the two aspects. The first is the time of simulation and the second is number of iteration necessary for finding of solution.

Table 2

Results of the simulations

Method	Point [mm]	Solution	Time [s]	Number of iterations
1	2	3	4	5
Damped least squares	[80 150 45]	found	1,858877	543
	[40 220 20]	not found	>10	–
	[80 140 80]	found	1,795458	538
	[50 90 80]	found	1,735288	509
	[30 200 -5]	not found	>10	–
Method	Point [mm]	Solution	Time [s]	Number of iterations
Pseudoinversion of Jacobian	[80 150 45]	found	1,816513	542
	[40 220 20]	not found	>10	–
	[80 140 80]	found	1,763199	538
	[50 90 80]	found	1,665617	509
	[30 200 -5]	not found	>10	–

1	2	3	4	5
Method	Point [mm]	Solution	Time [s]	Number of iterations
Transpose of Jacobian	[80 150 45]	found	1,058998	295
	[40 220 20]	not found	>10	–
	[80 140 80]	found	1,20205	361
	[50 90 80]	found	0,24794	75
	[30 200 -5]	not found	>10	–
Method	Point [mm]	Solution	Time [s]	Number of iterations
Optimization method	[80 150 45]	found	0,138819	77
	[40 220 20]	found	0,186186	111
	[80 140 80]	found	0,131314	93
	[50 90 80]	found	0,191943	133
	[30 200 -5]	found	0,17053	89

As can be seen from the Tab. 2, there are some cases when the simulations fail. However, using optimization method the solution were found always. The advantage of this method is in non Jacobian based approach. In the following figures are some examples of optimization method for particular humanoid robot hand tasks.

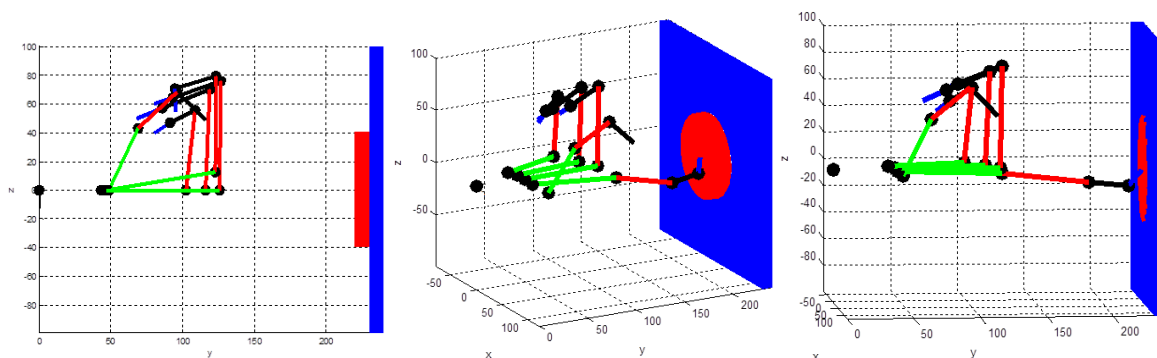


Fig. 3. Pushing of the button by finger

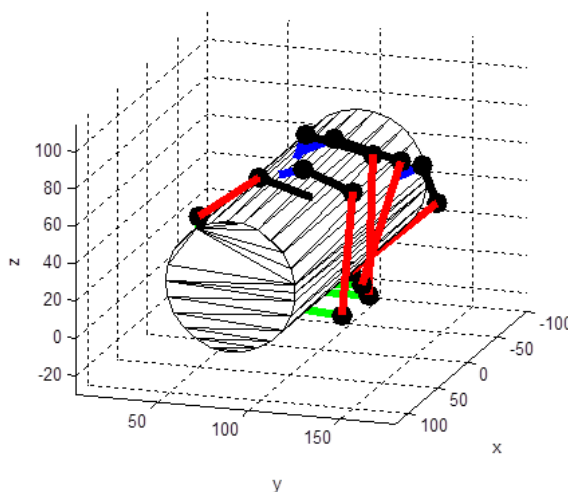


Fig. 4. Grasping task

**Conclusions.** The paper investigated inverse kinematic model approaches. There were analyzed pseudoinverse method, transpose of Jacobian method, damped least squares method as well as optimization method. The results of the simulations show the advantages of optimization method. During the simulations it never fail in comparison with other tested methods.

**Acknowledgement.** The authors would like to thank to Slovak Grant Agency – project VEGA 1/0389/18 and VEGA 1/0872/16.



**References**

1. J. Hirt, K. Berns, K. Mianowski, Designing Arms and Hands for the Humanoid Robot ROMAN, in: Advanced Materials Research (2012), pp. 1233–1237.
2. I. A. Kapandji. The Physiology of the Joints (1970), Vol. 1. E&S Livingstone, Edinburgh and London, 2 editions.
3. K.S. Salisbury, B.Roth, Kinematics and force analysis of articulated mechanical hands, Journal of Mechanisms, Transmissions and Actuation in Design, 105, 1983, pp. 35–41.
4. S. Kagami, M. Mochimaru, Y. Ehara, N. Miyata, K. Nishiwaki, T. Kanade, and H. Inoue, Measurement and comparison of human and humanoid walking, in Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Vol. 2, 2003, pp. 918–922.
5. T. Ishida, Y. Kuroki, and J. Yamaguchi, Mechanical system of a small biped entertainment robot, in Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent and Robotic Systems (Humanoids), Los Angeles, California, USA, November 10 – 12, 2004, pp. 235–252.
6. A. Schmitz, M. Maggiali, L. Natale, G. Metta, Touch Sensor for Humanoid Hands, IEEE Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2010, pp. 691–697.
7. N. Fukaya, S. Toyama, T. Asfour, R. Dillmann, Design of the TUAT/Karlsruhe Humanoid Hand, International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2000, pp. 1754–1759.
8. C. L. Taylor, R. J. Schwarz, The Anatomy and Mechanics of the Human Hand, Artificial Limbs (1955), Vol. 2, No. 2, pp. 22–35.
9. J. de Lope, T. Zarranonandia, R. González-Careaga, D. Maravall, Solving the Inverse Kinematics in Humanoid Robots: A Neural Approach, Lecture Notes in Computer Science (2003), Vol. 2687, pp. 177–184.
10. S. R. Buss, J.S. Kim, Selectively Damped Least Squares for Inverse Kinematics, Journal of Graphics Tools (2005), Vol. 10, Issue 3, pp. 37–49.
11. S. R. Buss, Introduction to Inverse Kinematics with Jacobian Transpose, Pseudoinverse and Damped Least Squares methods, IEEE Journal of Robotics and Automation (2004), pp. 681–685.
12. Wolovich, W. A., Elliott, H., A Computational Technique for Inverse Kinematics, IEEE Conference on Decisions and Control (1984), pp. 1359–1363.
13. Balestrino, A., De Maria, G., Sciavicco, L., Robust Control of Robotic Manipulators, IFAC World Congress (1984), pp. 2435–2440.
14. Virgala, I., Kelemen, M., Varga, M., Kurylo, P. Analyzing, Modeling and Simulation of Humanoid Robot Hand Motion, Procedia Engineering (2014), Elsevier.
15. Virgala, I., Gmitterko, A., Kelemen, M., Varga, M. Inverse Kinematic Model of Humanoid Robot Hand, Applied mechanics and Materials (2014), pp. 75–82.

УДК 621.22

*Martin Varga, Filip Filakovský, Ivan Virgala*

**SIMULATION AND ANALYZES OF INVERSE-KINEMATIC MODEL OF HUMANOID ROBOT HAND**

*Актуальність теми дослідження.* Насьогодні робототехніка та мехатроніка стали основними напрямками. З розвитком цих галузей також зростають обчислювальні можливості. Тому в кінематичному та динамічному моделюванні приділяється значна увага чисельному моделюванню та алгоритмізації.

*Постановка проблеми.* Відповідний підхід для чисельного моделювання важливий з огляду на витрату часу, а також стабільність обчислень.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Проектування та моделювання людино-подібних роботів представляє значний інтерес у галузі робототехніки. Апаратна та механічна частина конструкції роботів знаходиться на значно вищому рівні порівняно з програмним забезпеченням роботів. Отже, моделювання та управління роботами лежить у полі інтересів дослідників.

*Виділення недосліджених частин загальної проблеми.* Порівняння методів чисельного моделювання зворотної кінематики.

*Постановка завдання.* Порівняння чотирьох методів з точки зору продуктивності та стабільності.

*Виклад основного матеріалу.* У цій роботі досліджено область кінематичного моделювання руки людиноподібного робота та моделювання в MATLAB.

*Висновки відповідно до статті.* У роботі досліджено зворотні кінематичні підходи до моделі. Були проаналізовані псевдоінверсний метод, транспонування методом Якобі, метод найменших квадратів в якості методу оп-

тимізації. Результати моделювання показують переваги методу оптимізації. Під час моделювання цей метод ніколи не відмовляє порівняно з іншими перевіреними методами.

**Ключові слова:** рука людиноподібних роботів, зворотна кінематика, якобіан, моделювання

*Рис.: 4. Табл.: 2. Бібл.: 15.*

**Martin Varga** – PhD student, Technical University of Košice, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automation, Mechatronics and Robotics, Department of Mechatronics (Park Komenského 8, 04200 Košice, Slovak Republic).

**Мартин Варга** – аспірант, Технічний університет Кошице (Park Komenského 8, 04200 Košice, Slovak Republic).

**E-mail:** martin.varga.2@tuke.sk

**Filip Filakovský** – PhD student, Technical University of Košice, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automation, Mechatronics and Robotics, Department of Mechatronics (Park Komenského 8, 04200 Košice, Slovak Republic).

**Філіп Філаковський** – аспірант, Технічний університет Кошице (Park Komenského 8, 04200 Košice, Slovak Republic).

**E-mail:** filip.filakovsky@tuke.sk

**Ivan Virgala** – assoc. professor, Ph.D. of Technical Sciences, Technical University of Košice, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Automation, Mechatronics and Robotics, Department of Mechatronics (Park Komenského 8, 04200 Košice, Slovak Republic).

**Іван Виргала** – доцент, кандидат технічних наук, Технічний університет Кошице (Park Komenského 8, 04200 Košice, Slovak Republic).

**E-mail:** ivan.virgala@tuke.sk

## РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 311+512

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-123-130

*Олександр Дубягін, Володимир Гур'єв, Ірина Фірсова*

### МІЖРІВНЕВИЙ БАЛАНС: ПОКАЗНИКИ СТРУКТУРИ, ІНТЕНСИВНОСТІ ТА КООРДИНАЦІЇ РУХУ ОДИНИЦЬ ОБ'ЄКТА – АГРЕГАТНА ФОРМА

*Актуальність теми дослідження.* Показники структури, інтенсивності та координації міжрівневого руху одиниць об'єкта, як одна з видових категорій показників міжрівневого балансу, забезпечують всебічну кількісну оцінку структурних зрушень керованого об'єкта, а також наслідків керуючого впливу на об'єкт щодо ознаки, вимірюваної в його одиниць у шкалі відношень.

*Постановка проблеми.* Відповідні показники міжрівневого балансу, представлені до цього через його незважені (неагреговані) складові, не уможливають подібну оцінку.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Обчислення неагрегованих показників структури, інтенсивності та координації міжрівневого руху відбувається через значення чисельності рухомих і нерухомих одиниць об'єкта.

*Виділення недосліджених частин загальної проблеми.* Оцінка наслідків керуючого впливу на структурований об'єкт, виконувана у значеннях вимірюваної ознаки й пояснювана міжрівневим пересуванням одиниць цього об'єкта.

*Постановка завдання.* Сформулювати показники структури, інтенсивності та координації міжрівневого руху в системі показників міжрівневого балансу шляхом формулювання правил їх обчислення в агрегатній формі.

*Виклад основного матеріалу.* Представлення складових моделі міжрівневого балансу в агрегованому вигляді дає можливість оцінювати наслідки керуючого впливу на об'єкт на різних рівнях їх систематизації в моделі. Щодо всебічної характеристики результатів такого впливу та відповідних структурних зрушень об'єкта, в системі агрегованих показників балансу вагоме місце посідають показники структури, інтенсивності та координації міжрівневого руху одиниць об'єкта. Вони сформульовані як абсолютні, відносні та середні величини через сукупні значення ознаки, вимірюваної на тому чи іншому рівні в рухомих і нерухомих одиниць об'єкта.

*Висновки відповідно до статті.* Запропоновані показники міжрівневого балансу мають важливе значення для оцінки наслідків та ефективності керуючого впливу на структурований об'єкт.

*Ключові слова:* агреговані показники; інтенсивність; керований об'єкт; координація; міжрівневий рух; структура.

*Табл.: 1. Бібл.: 10.*

*Актуальність теми дослідження.* Формулювання в системі показників міжрівневого балансу показників структури, інтенсивності та координації, якими в шкалі відношень оцінюється міжрівневий рух одиниць структурованого об'єкта, є актуальною науковою задачею комплексної оцінки наслідків керуючого впливу на такий об'єкт й ефективності цього впливу. Якщо таким об'єктом є структуроване середовище, використовуване для зберігання, обробки та передачі даних, то зазначені показники можуть бути корисними для вимірювання ефективності інформаційних систем, особливо якщо йдеться про такі їхні характеристики, як швидкодія, ресурсні витрати (енергії, труда, фінансів тощо), продуктивність тощо.

*Постановка проблеми.* Показники структури, інтенсивності та координації руху одиниць об'єкта, представлені до цього через незважені (неагреговані) складові міжрівневого балансу, не уможливають подібну оцінку. Вирішення цієї проблеми можливо завдяки моделі міжрівневого балансу, яка синтезована в агрегатній формі. Складові балансу в такій моделі представлені зваженими, так, що роль ваги рівневих значень ознаки відіграє чисельність міжрівневих пересувань одиниць об'єкта.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Показники структури, інтенсивності та координації руху, представлені в системі показників міжрівневого балансу за критерієм «призначення», до цього були сформульовані лише в неагрегованому вигляді – через складові простої моделі міжрівневого балансу. В агрегатній формі балансова модель розглядається в роботі [10], а складові такої моделі підходять на роль порівнюваних між собою величин у конструкції цих показників. Аналогом моделі міжрівневого балансу є модель міжгалузевого балансу, запропонована В. В. Леонтьєвим [1, с. 8-18]. Щодо характеристики структурних зрушень об'єкта спостереження, у статистиці традиційно

застосовуються абсолютні, відносні та середні величини, а серед відносних величин поширеними є показники структури, інтенсивності та координації [2-9].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Це – оцінка наслідків керуючого впливу на структурований об'єкт, виконувана у значеннях вимірюваної ознаки й пояснювана міжрівневим пересуванням одиниць цього об'єкта.

**Постановка завдання (мета статті).** Сформулювати показники структури, інтенсивності та координації руху одиниць об'єкта в системі показників міжрівневого балансу шляхом формулювання правил їх обчислення в агрегатній формі.

**Виклад основного матеріалу.** Нагадаємо, що відповідно до класифікації показників міжрівневого балансу досліджувані у статті показники поділяються на такі видові категорії: за способом обчислення – на абсолютні, відносні та середні; за межами руху одиниць об'єкта – на рівневі, групові та загальні; за ступенем агрегування – на парні, часткові та частинні; за ознаками руху одиниць об'єкта – на показники міжрівневого пересування, вибуття («В») і прибуття («П»), у тому числі прогресивного («Вв.» і «Пп.») та регресивного («Вн.» і «Пв.»), і рівневої нерухомості, не переходу з рівня («Н») та залишення на рівні («З»), що представляє структурований об'єкт в одному з двох станів, до («0») і після («1») керуючого впливу. В їх обчисленні беруть участь або визначають їх безпосередньо (у другому випадку у виді абсолютних агрегованих величин структури руху) прості (неагреговані) та зважені (агреговані) складові балансу. Перші з них: вихідні дані про чисельність міжрівневих пересувань одиниць об'єкта з рівня  $i$  на рівень  $j$  –  $n_{ij}$ ; рівнева чисельність одиниць об'єкта –  $N_{i0}$ ,  $N_{j1}$ ; рівнева чисельність рухомих одиниць об'єкта –  $N_{Vi}$ ,  $N_{Viv.}$ ,  $N_{Vin.}$  і  $N_{Pi}$ ,  $N_{Pij}$ ,  $N_{Pvj}$ ; рівнева чисельність нерухомих одиниць об'єкта –  $N_{Hi}$  і  $N_{3j}$ ; загальна чисельність рухомих одиниць об'єкта –  $N_V$ ,  $N_{Vv.}$ ,  $N_{Vn.}$  і  $N_P$ ,  $N_{Pn.}$ ,  $N_{Pv.}$ ; загальна чисельність нерухомих одиниць об'єкта –  $N_H$  і  $N_3$ ; загальна чисельність одиниць об'єкта –  $N$ , - представляють рівневу структуру об'єкта ( $N_{i0}$ ,  $N_{j1}$ ) та структуру міжрівневого руху його одиниць (решта показників, крім  $N$ ) в простій формі балансової моделі. Другі – це відповідні сукупні значення ознаки, вимірюваної в одиниць об'єкта: в рухомих і в нерухомих разом (рівневі –  $L_{i0}$ ,  $L_{(j)0}$  і  $L_{j1}$ ,  $L_{(i)1}$ ; загальні –  $L_0$  і  $L_1$ ), у рухомих (рівневі (парні –  $L_{Bij}$  і  $L_{Pij}$ ; частинні –  $L_{Vi}$ ,  $L_{V<j>}$  і  $L_{Pi}$ ,  $L_{P<j>}$ ; часткові –  $L_{Viv.}$ ,  $L_{Vv.<j>}$ ,  $L_{Vin.}$ ,  $L_{Vn.<j>}$  і  $L_{Pn.j}$ ,  $L_{P<j>n.}$ ,  $L_{Pv.j}$ ,  $L_{P<j>v.}$ ) і групові (частинні –  $L_V$  і  $L_P$ ; часткові –  $L_{Vv.}$ ,  $L_{Vn.}$  і  $L_{Pn.}$ ,  $L_{Pv.}$ ) і в нерухомих (рівневі –  $L_{Hi}$ ,  $L_{Hj}$  і  $L_{3j}$ ,  $L_{3i}$ ; групові –  $L_H$  і  $L_3$ ), що представляє агрегатну форму балансової моделі [10]. Якщо ознака вимірюється поза опорним рівнем ( $i$  або  $j$ ), тобто на будь-якому іншому рівні, в позначенні показника цей опорний рівень взятий у кутові дужки.

Щодо аналізу наслідків керуючого впливу на об'єкт, їх визначають агреговані показники, а тому далі розглядаються докладно саме вони.

Через агрегати  $L_{Bij} = n_{ij}l_i$  і  $L_{Pij} = n_{ij}l_j$  можна виразити будь-яку складову балансу (якщо  $i = j$ , ці складові набувають зміст складових рівневої нерухомості  $L_{Hi} = L_{Hj}$  і  $L_{3j} = L_{3i}$ ):

- на рівні  $i$  у стані «до» (рівняння (1(1)) та на будь-якому іншому рівні ніж рівень  $i$ , у стані «після» (рівняння (2(2)) в  $N_{Vi}$  одиниць, а також на рівні  $j$  у стані «після» (рівняння (2(1)) та на будь-якому іншому рівні ніж рівень  $j$ , у стані «до» (рівняння (1(2)) в  $N_{Pi}$  одиниць:

$$\begin{cases} L_{Vi} = N_{Vi}l_i|_{i=\overline{1,k}} = \sum_{j=1}^{i-1} n_{ij}l_i|_{i=\overline{2,k}} + \sum_{j=i+1}^k n_{ij}l_i|_{i=\overline{1,k-1}}, & (1) \\ L_{V(j)} = \sum_{i=1}^{j-1} n_{ij}l_i|_{j=\overline{2,k}} + \sum_{i=j+1}^k n_{ij}l_i|_{j=\overline{1,k-1}}; & (2) \\ L_{Pi} = N_{Pi}l_j|_{j=\overline{1,k}} = \sum_{i=1}^{j-1} n_{ij}l_j|_{j=\overline{2,k}} + \sum_{i=j+1}^k n_{ij}l_j|_{j=\overline{1,k-1}}, & (1) \\ L_{P(i)} = \sum_{j=1}^{i-1} n_{ij}l_j|_{i=\overline{2,k}} + \sum_{j=i+1}^k n_{ij}l_j|_{i=\overline{1,k-1}}, & (2) \end{cases}$$

з них відповідно:

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

- на рівні  $i$  у стані «до» (рівняння (3(1))) та на будь-якому вищому рівні ніж рівень  $i$ , у стані «після» (рівняння (4(2))) в  $N_{Biv}$  одиниць, а також на рівні  $j$  у стані «після» (рівняння (4(1))) та на будь-якому нижчому рівні ніж рівень  $j$ , у стані «до» (рівняння (3(2))) в  $N_{Пн,j}$  одиниць:

$$\begin{cases} L_{Biv} = N_{Biv} l_i = \sum_{j=i+1}^k n_{ij} l_i, & i = 1, 2, \dots, k-1, & (1) \\ L_{Bv\langle j \rangle} = \sum_{i=1}^{j-1} n_{ij} l_i, & j = 2, 3, \dots, k; & (2) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} L_{Пн,j} = N_{Пн,j} l_j = \sum_{i=1}^{j-1} n_{ij} l_j, & j = 2, 3, \dots, k, & (1) \\ L_{П\langle i \rangleн} = \sum_{j=i+1}^k n_{ij} l_j, & i = 1, 2, \dots, k-1; & (2) \end{cases} \quad (4)$$

- на рівні  $i$  у стані «до» (рівняння (5(1))) та на будь-якому нижчому рівні ніж рівень  $i$ , у стані «після» (рівняння (6(2))) в  $N_{Bin}$  одиниць, а також на рівні  $j$  у стані «після» (рівняння (6(1))) та на будь-якому вищому рівні ніж рівень  $j$ , у стані «до» (рівняння (5(2))) в  $N_{Пв,j}$  одиниць:

$$\begin{cases} L_{Bin} = N_{Bin} l_i = \sum_{j=1}^{i-1} n_{ij} l_i, & i = 2, 3, \dots, k, & (1) \\ L_{Bн\langle j \rangle} = \sum_{i=j+1}^k n_{ij} l_i, & j = 1, 2, \dots, k-1; & (2) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} L_{Пв,j} = N_{Пв,j} l_j = \sum_{i=j+1}^k n_{ij} l_j, & j = 1, 2, \dots, k-1, & (1) \\ L_{П\langle i \rangleв} = \sum_{j=1}^{i-1} n_{ij} l_j, & i = 2, 3, \dots, k; & (2) \end{cases} \quad (6)$$

- на рівні  $i$  у стані «до» (рівняння (7(1))) та ньому ж у стані «після» (рівняння (8(2))) в  $N_{Hi}$  і в  $N_{3i}$  одиниць відповідно, а також на рівні  $j$  у стані «після» (рівняння (8(1))) та на ньому ж у стані «до» (рівняння (7(2))) в  $N_{3j}$  і в  $N_{Hj}$  одиниць відповідно:

$$\begin{cases} L_{Hi} = N_{Hi} l_i = n_{ij} l_i |_{j=i}, & i = 1, 2, \dots, k, & (1) \\ L_{Hj} = n_{ij} l_j |_{i=j}, & j = 1, 2, \dots, k, & (2) \\ L_{Hi} = L_{Hj}, & i = j; & (3) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} L_{3j} = N_{3j} l_j = n_{ij} l_j |_{i=j}, & j = 1, 2, \dots, k, & (1) \\ L_{3i} = n_{ij} l_i |_{j=i}, & i = 1, 2, \dots, k, & (2) \\ L_{3j} = L_{3i}, & j = i; & (3) \end{cases} \quad (8)$$

- у станах «до» (рівняння (9(1))) і «після» (рівняння (10(2))) в  $N_B$  одиниць, а також у станах «після» (рівняння (10(1))) і «до» (рівняння (9(2))) в  $N_{П}$  одиниць:

$$L_B = \begin{cases} \sum_{i=1}^k L_{Bi} = \sum_{i=1}^k N_{Bi} l_i = \sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} n_{ij} l_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k n_{ij} l_i, & (1) \\ \sum_{j=1}^k L_{B\langle j \rangle} = \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} n_{ij} l_i + \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{i=j+1}^k n_{ij} l_i, & (2) \end{cases} \quad (9)$$

$$L_{П} = \begin{cases} \sum_{j=1}^k L_{Пj} = \sum_{j=1}^k N_{Пj} l_j = \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} n_{ij} l_j + \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{i=j+1}^k n_{ij} l_j, & (1) \\ \sum_{i=1}^k L_{П\langle i \rangle} = \sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} n_{ij} l_j + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k n_{ij} l_j, & (2) \end{cases} \quad (10)$$

з них:

- у станах «до» (рівняння (11(1))) та «після» (рівняння (12(2))) в  $N_{Bv}$  одиниць, а також у станах «після» (рівняння (12(1))) і «до» (рівняння (11(2))) в  $N_{Пн}$  одиниць:

$$L_{Bv} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{k-1} L_{Biv} = \sum_{i=1}^{k-1} N_{Biv} l_i = \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k n_{ij} l_i, & (1) \\ \sum_{j=2}^k L_{Bv\langle j \rangle} = \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} n_{ij} l_i; & (2) \end{cases} \quad (11)$$

$$L_{Пн} = \begin{cases} \sum_{j=2}^k L_{Пн,j} = \sum_{j=2}^k N_{Пн,j} l_j = \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} n_{ij} l_j, & (1) \\ \sum_{i=1}^{k-1} L_{П\langle i \rangleн} = \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k n_{ij} l_j; & (2) \end{cases} \quad (12)$$

- у станах «до» (рівняння (13(1))) та «після» (рівняння (14(2))) в  $N_{Bн}$  одиниць, а також у станах «після» (рівняння (14(1))) і «до» (рівняння (13(2))) в  $N_{Пв}$  одиниць:

$$L_{\text{Вн.}} = \begin{cases} \sum_{i=2}^k L_{\text{Вн.}} = \sum_{i=2}^k N_{\text{Вн.}} l_i = \sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} n_{ij} l_i, & (1) \\ \sum_{j=1}^{k-1} L_{\text{Вн.}(j)} = \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{i=j+1}^k n_{ij} l_i; & (2) \end{cases} \quad (13)$$

$$L_{\text{Пв.}} = \begin{cases} \sum_{j=1}^{k-1} L_{\text{Пв.}j} = \sum_{j=1}^{k-1} N_{\text{Пв.}j} l_j = \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{i=j+1}^k n_{ij} l_j, & (1) \\ \sum_{i=2}^k L_{\text{П}(i)\text{в.}} = \sum_{i=2}^k \sum_{j=1}^{i-1} n_{ij} l_j; & (2) \end{cases} \quad (14)$$

- у стані «до» (рівняння (15(1)) або у стані «після» (рівняння (16(2))) в  $N_{\text{Н}}$  одиниць, а також у стані «після» (рівняння (16(1)) або у стані «до» (рівняння (15(2))) в  $N_3$  одиниць:

$$L_{\text{Н}} = \begin{cases} \sum_{i=1}^k L_{\text{Н}i} = \sum_{i=1}^k N_{\text{Н}i} l_i = \sum_{i=1}^k n_{ii} l_i, & (1) \\ \sum_{j=1}^k L_{\text{Н}j} = \sum_{j=1}^k n_{jj} l_j, & (2) \\ L_{\text{Н}} = L_3. & (3) \end{cases} \quad (15)$$

$$L_3 = \begin{cases} \sum_{j=1}^k L_{3j} = \sum_{j=1}^k N_{3j} l_j = \sum_{j=1}^k n_{jj} l_j, & (1) \\ \sum_{i=1}^k L_{3i} = \sum_{i=1}^k n_{ii} l_i & (2) \\ L_3 = L_{\text{Н}}. & (3) \end{cases} \quad (16)$$

Порівняння даних складових балансу, виконуване так, як це запропоновано нижче в таблиці, дає такі видові категорії показників міжрівневого руху (балансу): відносні – коефіцієнти структури (КС), інтенсивності (КІ) і координації (КК); середні величини структури (СВС) (гр. 2).

Усі показники сформовані в окремих видових категоріях руху, пересування (І) та нерухомості (ІІ), а деякі з них представляють обидві ці категорії разом (ІІІ). У кожній із них показники згруповані за критеріями «ступінь агрегування» (гр. 1), «межі руху» (гр. 3), а також за критерієм «ознаки руху» відповідно до того, в якому стані об'єкта вимірюється ознака: у лівому стовпці гр. 3 – у стані «до»; у правому стовпці гр. 3 – у стані «після».

Кожен коефіцієнт структури або інтенсивності характеризує питому вагу порівнюваної складової балансу (чисельник коефіцієнта) в розмірі складової балансу-базис порівняння (знаменник коефіцієнта), в який входить величина чисельника разом з іншими однотипними складовими. На відміну від коефіцієнтів структури, чисельник і знаменник якого належать до однієї категорії пересування (нерухомості), знаменник коефіцієнта інтенсивності поєднує у своєму складі величини, що належать до альтернативних складових руху, вимірюваних у стані об'єкта «до» або «після». Коефіцієнти координації характеризують співвідношення або однойменних різнорівневих складових балансу з тої чи іншої категорії руху, або складових, зокрема вимірюваних на тому ж самому рівні ознаки, представлених альтернативними складовими руху у стані об'єкта «до» або «після». Коефіцієнти структури й інтенсивності є завжди більшими ніж 0 і не перевищують 1. Сума всіх значень того чи іншого коефіцієнта структури пересування (нерухомості) відповідно до умови нормування завжди дорівнює 1. Щодо коефіцієнтів координації, вони набувають будь-яких невід'ємних значень, які не перевищують 1, якщо значення порівнюваної складової балансу не перевищує значення складової балансу-базис порівняння, й є не меншими ніж 1 в іншому випадку.

Середні арифметичні показники структури руху характеризують його як розмір ознаки, який рівною мірою припадає на кожен відповідну рухому (нерухому) одиницю об'єкта, яка є носієм цієї ознаки, вимірюваної в цих одиниць або у стані об'єкта «до» (показники, розміщені в лівому стовпці гр. 3), або у його стані «після» (показники, розміщені в правому стовпці гр. 3). Для рівневих середніх показників руху, які визначаються через значення ознаки, вимірюваної в одиниць об'єкта на опорному рівні, властива їх рівність відповідному рівневому значенню ознаки, чого не можна сказати про випадок їх визначення через позарівневі значення ознаки (поза опорного рівня) в категорії руху «пересування», і тоді шукана середня величина може визначатися в межах від мінімального

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

до максимального рівневого значення ознаки, вимірюваної у відповідних рухомих одиницях об'єкта. Остання особливість властива і для всіх загальних середніх показників.

Таблиця

Агреговані показники міжрівневого руху одиниць об'єкта

Вид	Показник	Категорія руху, яка представляє порівнювану складову балансу	
1	2	3	
I.	<i>Пересування (i = 1, 2, ..., k; j = 1, 2, ..., k; i ≠ j)</i>		
Парний	x	вибуття $n_{ij}$ од. з рівня $i$ на рівень $j$	прибуття $n_{ij}$ од. на рівень $j$ з рівня $i$
	<i>Рівневий: у рівневих і в &lt;позарівневих&gt; значеннях ознаки</i>		
	КІ	$\Omega_{1Bij} = L_{Bij} : L_{i0} = n_{ij} : N_{i0}$ $\Omega_{1Bi(j)} = L_{Bij} : L_{(j)0}$	$\Omega_{1Пij} = L_{Пij} : L_{j1} = n_{ij} : N_{j1}$ $\Omega_{1П(i)} = L_{Пij} : L_{(i)1}$
	КС	$\Omega_{2Bij} = L_{Bij} : L_{Bi} = n_{ij} : N_{Bi}$ $\Omega_{2Bi(j)} = L_{Bij} : L_{B(j)}$	$\Omega_{2Пij} = L_{Пij} : L_{Пj} = n_{ij} : N_{Пj}$ $\Omega_{2П(i)} = L_{Пij} : L_{П(i)}$
		за напрямом (прогресивного і регресивного)	
		$\Omega_{3Bij} = \begin{cases} L_{Bij} : L_{Biv.} = \{n_{ij} : N_{Biv.}\} \\ L_{Bij} : L_{Bin.} = \{n_{ij} : N_{Bin.}\} \end{cases}$ $\Omega_{3Bi(j)} = \begin{cases} L_{Bij} : L_{Bv.(j)} \\ L_{Bij} : L_{Bn.(j)} \end{cases}$	$\Omega_{3Пij} = \begin{cases} L_{Пij} : L_{Пн.j} = \{n_{ij} : N_{Пн.j}\} \\ L_{Пij} : L_{Пв.j} = \{n_{ij} : N_{Пв.j}\} \end{cases}$ $\Omega_{3П(i)} = \begin{cases} L_{Пij} : L_{П(i)н.} \\ L_{Пij} : L_{П(i)в.} \end{cases}$
	КК	$\hat{C}_{Bij}^{pm} = L_{Bpm} : L_{Bij}  _{i \neq p; j \neq m}$	$\hat{C}_{Пij}^{pm} = L_{Пpm} : L_{Пij}  _{i \neq p; j \neq m}$
	<i>Груповий</i>		
	КС	$\Omega_{4Bij} \equiv \Omega_{4Bi(j)} = L_{Bij} : L_B$	$\Omega_{4Пij} \equiv \Omega_{4П(i)} = L_{Пij} : L_P$
		за напрямом (прогресивного і регресивного)	
	$\Omega_{5Bij} \equiv \Omega_{5Bi(j)} = \begin{cases} L_{Bij} : L_{Bv.} \\ L_{Bij} : L_{Bn.} \end{cases}$	$\Omega_{5Пij} \equiv \Omega_{5П(i)} = \begin{cases} L_{Пij} : L_{Пн.} \\ L_{Пij} : L_{Пв.} \end{cases}$	
<i>Загальний</i>			
КІ	$\Omega_{6Bij} \equiv \Omega_{6Bi(j)} = L_{Bij} : L_0$	$\Omega_{6Пij} \equiv \Omega_{6П(i)} = L_{Пij} : L_1$	
Частинний	x	вибуття $N_{Bi}$ од. з рівня $i$ на будь-який інший рівень або $N_{Пj}$ од. на рівень $j$ з будь-якого іншого рівня	прибуття $N_{Пj}$ од. на рівень $j$ з будь-якого іншого рівня або $N_{Bi}$ од. з рівня $i$ на будь-який інший рівень
	<i>Рівневий: у рівневих і в &lt;позарівневих&gt; значеннях ознаки</i>		
	КІ	$\Omega_{1Bi} = L_{Bi} : L_{i0} = N_{Bi} : N_{i0}$ $\Omega_{1B(j)} = L_{B(j)} : L_{(j)0}$	$\Omega_{1Пj} = L_{Пj} : L_{j1} = N_{Пj} : N_{j1}$ $\Omega_{1П(i)} = L_{П(i)} : L_{(i)1}$
	КК	$\hat{C}_{Bi}^p = L_{Bp} : L_{Bi}  _{i \neq p}$ $\hat{C}_{B(j)}^p = L_{B(p)} : L_{B(j)}  _{j \neq p}$	$\hat{C}_{Пj}^p = L_{Пp} : L_{Пj}  _{j \neq p}$ $\hat{C}_{П(i)}^p = L_{П(p)} : L_{П(i)}  _{i \neq p}$
	СВС	$\bar{L}_{Bi} = L_{Bi} : N_{Bi} = l_i$ $\bar{L}_{B(j)} = L_{B(j)} : N_{B(j)} = L_{B(j)} : N_{Пj}$	$\bar{L}_{Пj} = L_{Пj} : N_{Пj} = l_j$ $\bar{L}_{П(i)} = L_{П(i)} : N_{П(i)} = L_{П(i)} : N_{Bi}$
	<i>Груповий</i>		
	КС	$\Omega_{2Bi} = L_{Bi} : L_B; \Omega_{2B(j)} = L_{B(j)} : L_B$	$\Omega_{2Пj} = L_{Пj} : L_P; \Omega_{2П(i)} = L_{П(i)} : L_P$
	<i>Загальний</i>		
	КІ	$\Omega_{3Bi} = L_{Bi} : L_0; \Omega_{3B(j)} = L_{B(j)} : L_0$	$\Omega_{3Пj} = L_{Пj} : L_1; \Omega_{3П(i)} = L_{П(i)} : L_1$
	x	вибуття $N_B$ од. з будь-якого рівня	прибуття $N_P$ од. на будь-який рівень
КІ	$\Omega_B = L_B : L_0$	$\Omega_P = L_P : L_1$	
СВС	$\bar{L}_B = L_B : N_B = L_B : N_P$	$\bar{L}_P = L_P : N_P = L_P : N_B$	
x	прогресивного (регресивного) вибуття $N_{Biv.}$ ( $N_{Bin.}$ ) од. з рівня $i$ на будь-який вищий (нижчий) рівень або $N_{Пн.}$ ( $N_{Пв.}$ ) од. на рівень $j$ з будь-якого нижчого (вищого) рівня	прогресивного (регресивного) прибуття $N_{Пн.j}$ ( $N_{Пв.j}$ ) од. на рівень $j$ з будь-якого нижчого (вищого) рівня або $N_{Biv.}$ ( $N_{Bin.}$ ) од. з рівня $i$ на будь-який вищий (нижчий) рівень	

1	2	3	
<i>Рівневий: у рівневих і в &lt;позарівневих&gt; значеннях ознаки</i>			
КІ	$\begin{cases} \Omega_{1Bib.} = L_{Bib.} : L_{i0} = N_{Bib.} : N_{i0} \\ \Omega_{1BiH.} = L_{BiH.} : L_{i0} = N_{BiH.} : N_{i0} \\ \Omega_{1Bb.(j)} = L_{Bb.(j)} : L_{(j)0} \\ \Omega_{1Bh.(j)} = L_{Bh.(j)} : L_{(j)0} \end{cases}$	$\begin{cases} \Omega_{1Пн. j} = L_{Пн. j} : L_{j1} = N_{Пн. j} : N_{j1} \\ \Omega_{1Пв. j} = L_{Пв. j} : L_{j1} = N_{Пв. j} : N_{j1} \\ \Omega_{1П(i)н.} = L_{П(i)н.} : L_{(i)1} \\ \Omega_{1П(i)в.} = L_{П(i)в.} : L_{(i)1} \end{cases}$	
КС	$\begin{cases} \Omega_{2Bib.} = L_{Bib.} : L_{Bi} = N_{Bib.} : N_{Bi} \\ \Omega_{2BiH.} = L_{BiH.} : L_{Bi} = N_{BiH.} : N_{Bi} \\ \Omega_{2Bb.(j)} = L_{Bb.(j)} : L_{B(j)} \\ \Omega_{2Bh.(j)} = L_{Bh.(j)} : L_{B(j)} \end{cases}$	$\begin{cases} \Omega_{2Пн. j} = L_{Пн. j} : L_{Пj} = N_{Пн. j} : N_{Пj} \\ \Omega_{2Пв. j} = L_{Пв. j} : L_{Пj} = N_{Пв. j} : N_{Пj} \\ \Omega_{2П(i)н.} = L_{П(i)н.} : L_{П(i)} \\ \Omega_{2П(i)в.} = L_{П(i)в.} : L_{П(i)} \end{cases}$	
КК	$\begin{cases} \hat{C}_{B_{i\neq p}^{B.}} = L_{B_{i\neq p}^{B.}} : L_{Bib.}  _{i \neq p} \\ \hat{C}_{B_{i\neq p}^{H.}} = L_{B_{i\neq p}^{H.}} : L_{BiH.}  _{i \neq p} \\ \hat{C}_{B_{i\neq p}^{B.}} = L_{B_{i\neq p}^{B.}} : L_{B_{i\neq p}^{H.}} \\ \hat{C}_{B_{i\neq p}^{H.}} = L_{B_{i\neq p}^{H.}} : L_{B_{i\neq p}^{B.}} \\ \hat{C}_{B_{i\neq p}^{(p)}} = L_{B_{i\neq p}^{(p)}} : L_{B_{i\neq p}^{(p)}}  _{i \neq p} \\ \hat{C}_{B_{i\neq p}^{(p)}} = L_{B_{i\neq p}^{(p)}} : L_{B_{i\neq p}^{(p)}}  _{i \neq p} \\ \hat{C}_{B_{i\neq p}^{(p)}} = L_{B_{i\neq p}^{(p)}} : L_{B_{i\neq p}^{(p)}} \\ \hat{C}_{B_{i\neq p}^{(p)}} = L_{B_{i\neq p}^{(p)}} : L_{B_{i\neq p}^{(p)}} \end{cases}$	$\begin{cases} \hat{C}_{Пн. j} = L_{Пн. j} : L_{Пн. j}  _{j \neq p} \\ \hat{C}_{Пв. j} = L_{Пв. j} : L_{Пв. j}  _{j \neq p} \\ \hat{C}_{Пн. p} = L_{Пн. p} : L_{Пв. p} ; \hat{C}_{Пв. p} = L_{Пв. p} : L_{Пн. p} \\ \hat{C}_{П(i)н.} = L_{П(i)н.} : L_{П(i)н.}  _{i \neq p} \\ \hat{C}_{П(i)в.} = L_{П(i)в.} : L_{П(i)в.}  _{i \neq p} \\ \hat{C}_{П(p)н.} = L_{П(p)н.} : L_{П(p)в.} ; \\ \hat{C}_{П(p)в.} = L_{П(p)в.} : L_{П(p)н.} \end{cases}$	
СВС	$\begin{cases} \bar{L}_{Bib.}  _{i=1, k-1} = L_{Bib.} : N_{Bib.} = l_i \\ \bar{L}_{BiH.}  _{i=2, k} = L_{BiH.} : N_{BiH.} = l_i \\ \bar{L}_{Bb.(j)}  _{j=2, k} = L_{Bb.(j)} : N_{Bb.(j)} \equiv L_{Bb.(j)} : N_{Пн. j} \\ \bar{L}_{Bh.(j)}  _{j=1, k-1} = L_{Bh.(j)} : N_{Bh.(j)} \equiv L_{Bh.(j)} : N_{Пв. j} \end{cases}$	$\begin{cases} \bar{L}_{Пн. j}  _{j=2, k} = L_{Пн. j} : N_{Пн. j} = l_j \\ \bar{L}_{Пв. j}  _{j=1, k-1} = L_{Пв. j} : N_{Пв. j} = l_j \\ \bar{L}_{П(i)н.}  _{i=1, k-1} = L_{П(i)н.} : N_{П(i)н.} \equiv L_{П(i)н.} : N_{Bib.} \\ \bar{L}_{П(i)в.}  _{i=2, k} = L_{П(i)в.} : N_{П(i)в.} \equiv L_{П(i)в.} : N_{BiH.} \end{cases}$	
<i>Груповий</i>			
КІ	$\begin{cases} \Omega_{3Bib.} = L_{Bib.} : L_B \\ \Omega_{3BiH.} = L_{BiH.} : L_B \\ \Omega_{3Bb.(j)} = L_{Bb.(j)} : L_B \\ \Omega_{3Bh.(j)} = L_{Bh.(j)} : L_B \end{cases}$	$\begin{cases} \Omega_{3Пн. j} = L_{Пн. j} : L_{Пj} \\ \Omega_{3Пв. j} = L_{Пв. j} : L_{Пj} \\ \Omega_{3П(i)н.} = L_{П(i)н.} : L_{Пj} \\ \Omega_{3П(i)в.} = L_{П(i)в.} : L_{Пj} \end{cases}$	
КС	$\begin{cases} \Omega_{4Bib.} = L_{Bib.} : L_{Bb.} \\ \Omega_{4BiH.} = L_{BiH.} : L_{Bh.} \\ \Omega_{4Bb.(j)} = L_{Bb.(j)} : L_{Bb.} \\ \Omega_{4Bh.(j)} = L_{Bh.(j)} : L_{Bh.} \end{cases}$	$\begin{cases} \Omega_{4Пн. j} = L_{Пн. j} : L_{Пн.} \\ \Omega_{4Пв. j} = L_{Пв. j} : L_{Пв.} \\ \Omega_{4П(i)н.} = L_{П(i)н.} : L_{Пн.} \\ \Omega_{4П(i)в.} = L_{П(i)в.} : L_{Пв.} \end{cases}$	
<i>Загальний</i>			
КІ	$\begin{cases} \Omega_{5Bib.} = L_{Bib.} : L_0 \\ \Omega_{5BiH.} = L_{BiH.} : L_0 \\ \Omega_{5Bb.(j)} = L_{Bb.(j)} : L_0 \\ \Omega_{5Bh.(j)} = L_{Bh.(j)} : L_0 \end{cases}$	$\begin{cases} \Omega_{5Пн. j} = L_{Пн. j} : L_1 \\ \Omega_{5Пв. j} = L_{Пв. j} : L_1 \\ \Omega_{5П(i)н.} = L_{П(i)н.} : L_1 \\ \Omega_{5П(i)в.} = L_{П(i)в.} : L_1 \end{cases}$	
x	прогресивного (регресивного) вибуття $N_{Bb.}$ ( $N_{Bh.}$ ) од. з будь-якого рівня	прогресивного (регресивного) прибуття $N_{Пн.}$ ( $N_{Пв.}$ ) од. на будь-який рівень	
<i>Груповий</i>			
КС	$\Omega_{1Bb.} = L_{Bb.} : L_B ; \Omega_{1Bh.} = L_{Bh.} : L_B$	$\Omega_{1Пн.} = L_{Пн.} : L_{Пj} ; \Omega_{1Пв.} = L_{Пв.} : L_{Пj}$	
КК	$\hat{C}_{B_{i\neq p}^{B.}} = L_{Bb.} : L_{Bh.} ; \hat{C}_{B_{i\neq p}^{H.}} = L_{Bh.} : L_{Bb.}$	$\hat{C}_{Пн. p} = L_{Пн.} : L_{Пв.} ; \hat{C}_{Пв. p} = L_{Пв.} : L_{Пн.}$	
<i>Загальний</i>			
КІ	$\Omega_{2Bb.} = L_{Bb.} : L_0 ; \Omega_{2Bh.} = L_{Bh.} : L_0$	$\Omega_{2Пн.} = L_{Пн.} : L_1 ; \Omega_{2Пв.} = L_{Пв.} : L_1$	
СВС	$\begin{cases} \bar{L}_{Bb.} = L_{Bb.} : N_{Bb.} \equiv L_{Bb.} : N_{Пн.} \\ \bar{L}_{Bh.} = L_{Bh.} : N_{Bh.} \equiv L_{Bh.} : N_{Пв.} \end{cases}$	$\begin{cases} \bar{L}_{Пн.} = L_{Пн.} : N_{Пн.} \equiv L_{Пн.} : N_{Bb.} \\ \bar{L}_{Пв.} = L_{Пв.} : N_{Пв.} \equiv L_{Пв.} : N_{Bh.} \end{cases}$	
II.	<i>Нерухомості (i = 1, 2, ..., k; j = 1, 2, ..., k; i = j)</i>		
Парний	x	не переходу $n_{ij}$ ( $N_{Hi}$ або $N_{3j}$ ) од. з рівня (i або j)	залишення $n_{ij}$ ( $N_{3j}$ або $N_{Hi}$ ) од. на рівні (j або i)
	<i>Рівневий: у рівневих і в &lt;позарівневих&gt; значеннях ознаки</i>		
	КІ	$\begin{cases} \Omega_{1Hi} = L_{Hi} : L_{i0} = N_{Hi} : N_{i0} \\ \Omega_{1Hj} = L_{Hj} : L_{(j)0} \end{cases}$	$\begin{cases} \Omega_{13j} = L_{3j} : L_{j1} = N_{3j} : N_{j1} \\ \Omega_{13(i)} = L_{3i} : L_{(i)1} \end{cases}$
	КК	$\hat{C}_{H_{i\neq p}} = L_{H_{i\neq p}} : L_{Hi}  _{i \neq p}$	$\hat{C}_{3j} = L_{3p} : L_{3j}  _{j \neq p}$
СВС	$\begin{cases} \bar{L}_{Hi} = L_{Hi} : N_{Hi} = l_i ; \\ \bar{L}_{Hj} = L_{Hj} : N_{Hj} \equiv L_{Hj} : N_{3j} = l_j \end{cases}$	$\begin{cases} \bar{L}_{3j} = L_{3j} : N_{3j} = l_j ; \\ \bar{L}_{3i} = L_{3i} : N_{3i} \equiv L_{3i} : N_{Hi} = l_i \end{cases}$	



1	2	3	
	<i>Груповий</i>		
	КС	$\Omega_{2Hi} = L_{Hi} : L_H \equiv \Omega_{2H(j)} = L_{Hj} : L_H \equiv \Omega_{23j} = L_{3j} : L_3 \equiv \Omega_{23(i)} = L_{3i} : L_3$	
	<i>Загальний</i>		
	КІ	$\Omega_{3Hi} = L_{Hi} : L_0 \equiv \Omega_{3H(j)} = L_{Hj} : L_0$	$\Omega_{33j} = L_{3j} : L_1 \equiv \Omega_{33(i)} = L_{3i} : L_1$
Частинний	х	не переходу $N_H$ од. з будь-якого рівня	залишення $N_3$ од. на будь-якому рівні
	<i>Загальний</i>		
	КІ	$\Omega_H = L_H : L_0$	$\Omega_3 = L_3 : L_1$
	СВС	$\bar{L}_H = L_H : N_H \equiv L_H : N_3$	$\bar{L}_3 = L_3 : N_3 \equiv L_3 : N_H$
III.	<i>Пересування і нерухомості (міжрівневого руху)</i>		
Частковий	х	вибуття $N_{Bp}$ од. та не переходу $N_{Hp}$ од. з рівня $p$	прибуття $N_{Pp}$ од. на рівень та залишення $N_{3p}$ од. на рівні $p$
	<i>Рівневий: у рівневих і в &lt;позарівневих&gt; значеннях ознаки</i>		
	КК	$\hat{C}_{B_{Hp}} = L_{Bp} : L_{Hp}; \hat{C}_{H_{Bp}} = L_{Hp} : L_{Bp}$ $\hat{C}_{B_{H(p)}} = L_{B(p)} : L_{H(p)}; \hat{C}_{H_{B(p)}} = L_{H(p)} : L_{B(p)}$	$\hat{C}_{P_{3p}} = L_{Pp} : L_{3p}; \hat{C}_{3_{Pp}} = L_{3p} : L_{Pp}$ $\hat{C}_{P_{3(p)}} = L_{P(p)} : L_{3(p)}; \hat{C}_{3_{P(p)}} = L_{3(p)} : L_{P(p)}$
Частинний	х	вибуття $N_B$ од. та не переходу $N_H$ од. з будь-якого рівня	прибуття $N_{\Pi}$ од. на будь-який рівень та залишення $N_3$ од. на будь-якому рівні
	<i>Груповий</i>		
	КК	$\hat{C}_{B_H} = L_B : L_H; \hat{C}_{H_B} = L_H : L_B$	$\hat{C}_{\Pi_3} = L_{\Pi} : L_3; \hat{C}_{3_{\Pi}} = L_3 : L_{\Pi}$

**Висновки відповідно до статті.** Завдяки моделі міжрівневого балансу, яка була синтезована раніше в агрегатній формі, вдалося сформулювати категорію агрегованих показників структури, інтенсивності та координації міжрівневого руху одиниць керованого структурованого об'єкта. Вони, разом з показниками рівневої структури об'єкта, її зміни та координації, а також балансними показниками пересування, які є предметом подальшого розв'язання даної проблеми, забезпечують всебічну оцінку наслідків і ефективності керуючого впливу на структурований об'єкт. В інформаційних системах оцінювання ефективності організації процесів з даними, здійснюване з використанням розглянутих показників, передбачає вимірювання величин ресурсних витрат щодо зберігання, обробки та передачі інформації з подальшим визначенням відповідних коефіцієнтів ефективності.

**Список використаних джерел**

1. Терехов Л. Л. Экономико-математические методы. Москва: Статистика, 1968. 360 с.
2. Статистика: підручник / С. С. Герасименко та ін.; за наук. ред. д-ра екон. наук С. С. Герасименка. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: КНЕУ, 2000. 467 с.
3. Вашків П. Г., Пастер П. І., Сторожук В. П., Ткач Є. І. Теорія статистики: навчальний посібник. Київ: Либідь, 2001. 320 с.
4. Глинский В. В., Ионин В. Г. Статистический анализ. Москва: Инфра-М, 2002. 241 с.
5. Орлов А. И. Прикладная статистика: учебник. Москва: Экзамен, 2006. 671 с.
6. Статистика: учебник / под ред. И. И. Елисейевой. Москва: Высшее образование, 2007. 566 с.
7. Теория статистики: учебник / под ред. Г. Л. Громыко. Москва: Инфра-М, 2010. 414 с.
8. Ковалевский Г. В. Статистика: учебник. Харьков: ХНАГХ, 2012. 445 с.
9. Гладун И. В. Статистика. Москва: КноРус, 2016. 232 с.
10. Дубягін О. Б. Модель міжрівневого балансу: агрегатна форма. *Технічні науки та технології*: науковий журнал. 2018. № 3 (13). С. 96-104.

**References**

1. Terekhov, L. L. (1968). *Ekonomiko-matematicheskie metody [Economic and mathematical methods]*. Moscow: Statistika [in Russian].
2. Herasyenko, S. S. (Ed.). (2000). *Statystyka [Statistics]*. Kyiv: KNEU [in Ukrainian].
3. Vashkiv, P. H., Paster, P. I., Storozhuk, V. P., Tkach Ye. I. (2001). *Teoriia statystyky [Statistics Theory]*. Kyiv: Lybid [in Ukrainian].

4. Glinskii, V. V., Ionin, V. G. (2002). *Statisticheskii analiz [Statistical analysis]*. Moscow: Infra-M [in Russian].
5. Orlov, A. Y. (2006). *Prikladnaia statistika [Applied statistics]*. Moscow: Ekzamen [in Russian].
6. Eliseeva, I. I. (Ed.). (2007). *Statistika [Statistics]*. Moscow: Vysshee obrazovanie [in Russian].
7. Gromyko, G. L. (Ed.). (2010). *Teoriia statistiki [Theory of Statistics]*. Moscow: Infra-M [in Russian].
8. Kovalevskii, G. V. (2012). *Statistika [Statistics]*. Kharkov: KhNAGKh [in Ukrainian].
9. Gladun, I. V. (2016). *Statistika [Statistics]*. Moscow: KnoRus [in Russian].
10. Dubiahin, O. B. (2018). *Model mizhrivnevoho balansu: ahrehatna forma [Inter-level balance model: aggregate form]*. Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].

UDC 311+512

*Alexander Dubyagin, Volodymyr Guryev, Irina Firsova*

### INTER-LEVEL BALANCE: INDICATORS OF STRUCTURE, INTENSITY AND COORDINATION OF OBJECT UNITS MOVEMENT – AGGREGATE FORM

**Urgency of the research.** *The indicators of the structure, intensity and coordination of the inter-level movement of object units, as one of the species categories of inter-level balance indicators, provide a comprehensive quantitative assessment of the structural shifts of a controlled object, as well as the effects of a controlling influence on an object according to a feature measured by its units in the relationship scale.*

**Target setting.** *The existing indicators of inter-level balance presented before this through its unweighted (non-aggregated) components do not allow such an assessment.*

**Actual scientific researches and issues analysis.** *The calculation of non-aggregated indicators of the structure, intensity and coordination of inter-level movement is carried out through the values of the number of movable and immovable units of the object.*

**Uninvestigated parts of general matters defining.** *Evaluation of the effects of a control action on a structured object, performed in the values of the measured attribute and explained by the inter-level movement of the units of this object.*

**The research objective.** *Formulate indicators of the structure, intensity and coordination of inter-level movement in the system of indicators of inter-level balance by formulating the rules for calculating them in aggregate form.*

**The statement of basic materials.** *The representation of the components of the inter-level balance model in an aggregated form makes it possible to evaluate the consequences of the controlling influence on an object at different levels of their systematization in the model. As for the comprehensive description of the results of such an impact and the corresponding structural shifts of the object, in the system of aggregated balance indicators a significant place is occupied by the indicators of structure, intensity and coordination of the inter-level movement of the object units. They are formulated as absolute, relative and average values in terms of aggregate values of a feature, measured at a particular level in movable and immovable units of an object.*

**Conclusions.** *The proposed indicators of inter-level balance are important for assessing the effectiveness of the control effect on a structured object.*

**Keywords:** *aggregates; intensity; managed object; coordination; inter-level movement; structure.*

**Table:** 1. **References:** 10.

**Дубягін Олександр Борисович** – кандидат технічних наук, доцент, м. Чернігів, Україна.

**Dubyagin Alexander** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv, Ukraine.

**E-mail:** [aleksandr.dubagin@gmail.com](mailto:aleksandr.dubagin@gmail.com)

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-9512-242X>

**ResearcherID:** G-9774-2014

**Гур'єв Володимир Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри кібербезпеки та математичного моделювання, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Guryev Volodymyr** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Cybersecurity and Mathematical Modeling Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** [guryev54@ukr.net](mailto:guryev54@ukr.net)

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-9507-5408>

**ResearcherID:** G-9807-2016

**Фірсова Ірина Валеріївна** – старший викладач кафедри інформаційних та комп'ютерних систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Firsova Irina** – Senior Lecturer of Information and Computer Systems Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** [I.firsova@ukr.net](mailto:I.firsova@ukr.net)

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-1126-1516>

**ResearcherID:** R-4243-2016

*Ігор Повхан*

## ПИТАННЯ ГНУЧКОСТІ ЛОГІЧНИХ ДЕРЕВ КЛАСИФІКАЦІЇ В ЗАДАЧАХ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ

**Актуальність теми дослідження.** Сучасні тенденції розвитку теорії штучного інтелекту вимагають ефективних підходів та методів у задачах розпізнавання (класифікації) образів, але принциповою проблемою побудови логічних дерев класифікації є відсутність алгоритмів та методів, які б дозволили одноманітно описувати різні алгоритми розпізнавання у вигляді дерев класифікації. Робота присвячена проблемі логічних дерев класифікації. Запропоновано ефективний механізм донавчання та усунення помилок класифікації у структурі логічного дерева.

**Постановка проблеми.** Нині відомі різні методи та алгоритми побудови логічних дерев класифікації, проте всі вони здебільшого зводяться до побудови одного дерева класифікації за даними початкової навчальної вибірки, а в літературі дуже мало алгоритмів побудови логічних дерев для вибірок великого об'єму. Зрозуміло, що це має під собою об'єктивні фактори, які пов'язані з особливостями генерації таких складних структур, методиками роботи з ними та зберігання. Ця робота має намір хоча б частково подолати ці обмеження та присвячена розробці ефективного механізму донавчання та усунення помилок класифікації у структурі логічного дерева.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, які присвячені проблемі методів та алгоритмів логічних дерев класифікації в задачах розпізнавання образів.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Можливість ефективної та економічної роботи запропонованого методу зміни структури логічного дерева з масивами навчальних вибірок великого об'єму.

**Постановка завдання.** Розробка простого та якісного методу роботи з великими масивами початкових вибірок шляхом синтезу мінімальних форм дерев класифікації та розпізнавання, які забезпечують ефективну апроксимацію навчальної інформації.

**Вигляд основного матеріалу.** Виявлення механізму, за допомогою якого можна було б будувати логічне дерево класифікації за неповною початковою інформацією (і за кількістю об'єктів, і за кількістю ознак). Таке логічне дерево буде безпомилково розпізнавати частину навчальної вибірки, за якою побудоване дерево, а на інших наборах давати помилки (уникнення такої ситуації пропонується за рахунок застосування схеми алгоритму усунення помилок у структурі дерева).

**Висновки відповідно до статті.** Запропонований метод донавчання та усунення помилок у структурі логічного дерева класифікації дає змогу працювати з навчальними вибірками великого об'єму та забезпечує високу швидкість та економію апаратних ресурсів у процесі генерації кінцевої схеми класифікації.

**Ключові слова:** задачі розпізнавання; логічні дерева класифікації; усунення помилок класифікації; схема розпізнавання; дискретний об'єкт.

Табл.: 1. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** Важливою проблемою, яка часто постає перед інженером, є задача автоматичної побудови систем обробки великих масивів інформації та систем прийняття рішень. Ефективний розв'язок цих задач дасть змогу перекласти важку роботу з проектування складної системи розпізнавання на комп'ютер та звільнити творчий потенціал інженера для розв'язання інших більш важливих задач. Крім того, автоматизації алгоритмічного та програмного конструювання конкретних систем розпізнавання є запорукою їх високої ефективності для кожної реальної задачі, а отже, забезпечить швидкий розвиток різних галузей науки й техніки [1].

Основні наявні методи обробки навчаючих вибірок при побудові функції розпізнавання не дозволяють досягнути потрібного рівня точності системи розпізнавання та регулювати їхню складність у процесі конструювання цих систем. Цей недолік відсутній у методах побудови систем розпізнавання, які ґрунтуються на методах логічних дерев класифікації (ЛДК) [2]. При цьому особливістю методу логічного дерева є можливість комплексного використання для розв'язання кожної конкретної задачі побудови схеми розпізнавання багатьох відомих алгоритмів (методів) розпізнавання. В основі лежить єдина методологія – оптимальна апроксимація навчаючої вибірки набором узагальнених ознак (автономних алгоритмів), які входять у деяку схему (оператор), побудовану у процесі навчання [3].

Можливість представлення функції розпізнавання (правила класифікації) у вигляді логічного дерева має великі переваги в порівнянні з іншим представленням схем класифікації [4]. Зауважимо що запропонований алгоритм генерації дерев класифікації за даними НВ доповнює методологію підходу ЛДК та дозволяє будувати прості та ефективні правила класифікації дискретних об'єктів [5]. У цьому дослідженні зупинимось

саме на описі та особливостях алгоритму побудови, корекції ЛДК для масиву початкових даних навчальної вибірки (НВ).

**Постановка проблеми.** Нині відомі різні алгоритми побудови ЛДК [6]. Проте всі вони здебільшого зводяться до побудови одного дерева класифікації за даними НВ. Зазначимо також, що в літературі дуже мало алгоритмів побудови ЛДК для НВ великого об'єму. Зрозуміло, що це має під собою об'єктивні фактори, пов'язані з особливостями генерації таких складних структур, методиками роботи з ними та зберігання [7]. Однак основним недоліком у питанні побудови ЛДК є відсутність алгоритмів та методів, які б дозволили одноманітно описувати різні алгоритми у вигляді ЛДК.

Нехай на першому кроці побудови логічного дерева розпізнавання використовується довільний алгоритм розпізнавання, у результаті застосування якого отримуємо деяку формулу (узагальнену ознаку). Ця формула реалізує визначений рівень розпізнавання. Функція приймає декілька значень залежно від значень ознак. Ці значення характеризують собою шляхи (класи), причому є шляхи, по яких формула «працює добре», а є і такі, по яких – «погано» і покращення рівня розпізнавання далі немає. Зрозуміло, що саме на цих значеннях ознак (шляхах) необхідно взяти інший алгоритм, який створить іншу формулу (узагальнену ознаку) і т. ін. Таким чином, у методах та алгоритмах розпізнавання на основі логічних дерев необхідно повторювати такий вибір алгоритмів доти, доки ми не отримуємо необхідний рівень якості розпізнавання [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження продовжує цикл робіт, які присвячені проблемі деревоподібних схем розпізнавання (класифікації) дискретних об'єктів [2–7]. У них порушуються питання побудови, використання та оптимізації логічних дерев. Так, з [8] відомо, що результуюче правило класифікації (схема), яке побудоване довільним методом або алгоритмом розгалуженого вибору ознак, має деревоподібну логічну структуру. Логічне дерево складається з вершин (ознак), які групуються по ярусах і які отримані на певному кроці (етапі) побудови дерева розпізнавання [6]. Важливою задачею, яка виникає з [5], є задача синтезу дерев розпізнавання, які будуть представлятися фактично деревом (графом) алгоритмів. На відміну від наявних методів, головною особливістю деревоподібних систем розпізнавання є те, що важливість окремих ознак (групи ознак чи алгоритмів) визначається відносно функції, яка задає розбиття об'єктів на класи [9].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Можливість ефективною та економною роботи запропонованого методу зміни структури логічного дерева з масивами навчальних вибірок великого об'єму.

**Мета роботи.** Метою цієї роботи є вивчення особливостей генерації правил розпізнавання в задачах розпізнавання на основі логічних дерев (ЛДК), розробка загальної схеми донавчання та виправлення помилок у структурі ЛДК навчальних вибірок великого об'єму. Результатом роботи є простий метод усунення помилок класифікації в ЛДК.

**Виклад основного матеріалу.** Нехай  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$  система класів (образів) яка задана на множині  $G$ , що складається з об'єктів  $x_i, (i = 1, \dots, m)$ . Характер розбиття множини  $G$  на відповідні класи задається за допомогою НВ такого вигляду:

$$\left( (x_1, f_R(x_1)), (x_2, f_R(x_2)), \dots, (x_m, f_R(x_m)) \right), \quad (1)$$

де  $x_h \in G, f_R(x) \in \{0, 1, \dots, k-1\}, (h = 1, 2, \dots, m), k$  – кількість класів НВ,  $m$  – загальна кількість об'єктів НВ, а  $f_R(x)$  – деяка скінчено значна функція, що задає розбиття множини  $G$  на відповідні образи. Співвідношення  $f_R(x_h) = l, (l = 0, 1, \dots, k-1)$  означає що  $x_h \in H_l$ .

Отже, ЛДК – це зв'язний граф без циклів, у некінцевих вершинах якого знаходяться ознаки (тут ознаки – відповідні компоненти об'єктів  $x_1, \dots, x_m$ ), тобто:

$$x_1 = (x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1), \dots, x_m = (x_1^m, x_2^m, \dots, x_n^m);$$

$$P_i(x) = x_i^j, (i = 1, \dots, n), (j = 1, \dots, m).$$

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Зауважимо, що тут  $n$  – кількість ознак об’єктів НВ вигляду (1), а ребра нумеруються значеннями цих ознак. У кінцевих вершинах ЛДК знаходяться значення функції  $f_R(x_h)$ . Причому на довільному шляху ЛДК та ж сама ознака трапляється тільки один раз.

Зауважимо, що кожному НВ вигляду (1) можна поставити у відповідальність (за допомогою деякого алгоритму або методу представлення) цілком визначене ЛДК, яке об’єктам  $x_h, (h = 1, \dots, m)$  НВ (1) ставить у відповідність значення функції  $f_R(x_h)$ , що задає розбиття  $R$  на множині  $G$  [5].

Нехай маємо ЛДК, побудоване за даними НВ (1) та набори такого вигляду:

$$\left( (x_{m+1}, f_R(x_{m+1})), (x_{m+2}, f_R(x_{m+2})), \dots, (x_{m+\delta}, f_R(x_{m+\delta})) \right). \quad (2)$$

У формулі (2) набір об’єктів тестової вибірки, на яких знайдені помилки розпізнавання, де  $2 \leq m \leq K_1 * K_2 * \dots * K_n, \delta$  – кількість об’єктів ТВ, на яких знайдені помилки розпізнавання,  $K_i$  – кількість значень ознаки  $P_i(x), (i = 1, \dots, n), n$  – кількість ознак об’єктів НВ.

Нехай маємо ситуацію, коли  $x_h \in H_l, 0 \leq l \leq k - 1$  у процесі розпізнавання з різним  $l$ , то будемо говорити, що відбулася помилка розпізнавання  $x_h \in H_l$ . Якщо об’єкт зустрічається у ТВ декілька раз, то будемо вважати, що це та сама помилка (помилка першого роду).

Загальна схема алгоритму усунення помилок розпізнавання. Побудуємо таке ЛДК, щоб воно безпомилково розпізнавало об’єкти з НВ (1) та об’єкти з (2), тобто опишемо наступний алгоритм усунення помилок розпізнавання (УПР). У парі  $(x_{m+1}, f_R(x_{m+1}))$  об’єкту  $x_{m+1} = (x_1^{m+1}, \dots, x_n^{m+1})$  відповідає свій шлях  $a_1, a_2, \dots, a_r; (r \in \{1, \dots, n\})$ , який закінчується значенням  $f_R(x_{m+1})$ .

$$P_{i_1} = q(a_1), a_2 = (a_1)_{x_{i_1}^h}, P_{i_2} = q(a_2), a_3 = (a_2)_{x_{i_2}^h}, \dots, P_{i_{r-1}} = q(a_{r-1}), a_r = (a_{r-1})_{x_{i_{r-1}}^h},$$

де  $f_R(x_h) = q(a_r), (h = 1, 2, \dots, m), 1 \leq r \leq n$ , відповідно  $i_1, i_2, \dots, i_{r-1}$  номери ознак, що знаходяться у вершинах  $a_1, a_2, \dots, a_{r-1}$  та  $f_R(x_{m+1}) = q(a_r)$  (такий запис означає, що значення функції  $f_R(x_{m+1})$  не збігається зі значенням  $f_R(x_h)$ , що знаходиться в некінцевій вершині  $a_r$  тобто виникла помилка розпізнавання). Запам’ятовуємо, що  $f_R(x_h) = q(a_r)$  та після цього здійснюємо таку процедуру:  $P_{i_r} = q(a_r), a_{r+1} = (a_r)_{x_{i_r}^{m+1}}$  (це означає, що з вершини  $a_r$  виходить стрілка  $x_{i_r}^{m+1}$ , відповідна значенню ознаки  $P_{i_r}$  (об’єкту  $x_{m+1}$ ) та входить у наступну за нею вершину  $a_{r+1}$ ).

Далі отримаємо:

$$P_{i_{r+1}} = q(a_{r+1}), a_{r+2} = (a_{r+1})_{x_{i_{r+1}}^{m+1}}, \dots, P_{i_t} = q(a_t), a_{t+1} = (a_t)_{x_{i_t}^{m+1}},$$

$$P_{i_{t+1}} = q(a_{t+1}), a_{t+2} = (a_{t+1})_{x_{i_{t+1}}^{m+1}}, \dots, P_{i_n} = q(a_n), a_{n+1} = (a_n)_{x_{i_n}^{m+1}}.$$

де  $f_R(x) = q(a_{n+1}), i_1, i_{r+1}, \dots, i_t, i_{t+1}, \dots, i_n$  – номери ознак, що знаходяться у вершинах ЛДК  $a_r, a_{r+1}, \dots, a_t, a_{t+1}, \dots, a_n, r \leq t \leq n - 1$ .

На наступному етапі будемо вважати, що:

$$a_{r+1}^{k_r} = (a_r)_{k_r} \text{ та } f_R(x_h) = q(a_{r+1}^{k_r}), \forall k_r,$$

$$a_{r+2}^{k_{r+1}} = (a_{r+1})_{k_{r+1}} \text{ та } f_R(x_h) = q(a_{r+2}^{k_{r+1}}), \forall k_{r+1},$$

.....

$$a_t^{k_{t-1}} = (a_{t-1})_{k_{t-1}} \text{ та } f_R(x_h) = q(a_t^{k_{t-1}}), \forall k_{t-1},$$

$$a_{t+1}^{k_t} = (a_t)_{k_t} \text{ та } f_R(x_h) = q(a_{t+1}^{k_t}), \forall k_t,$$

.....

$$a_n^{k_{n-1}} = (a_{n-1})_{k_{n-1}} \text{ та } f_R(x_h) = q(a_n^{k_{n-1}}), \forall k_{n-1},$$

$$a_{n+1}^{k_n} = (a_n)_{k_n} \text{ та } f_R(x_h) = q(a_{n+1}^{k_n}), \forall k_n,$$

де  $r \leq t \leq n - 1$ ,  $k_1, k_{r+1}, \dots, k_t, k_{t+1}, \dots, k_{n-1}, k_n$  – множина значень ознак  $P_{i_r}, P_{i_{r+1}}, \dots, P_{i_t}, P_{i_{t+1}}, \dots, P_{i_{n-1}}, P_{i_n}$  відповідно.

Усі інші знайдені помилки розпізнавання у вибірці  $((x_{m+2}, f_R(x_{m+2})), \dots, (x_{m+\delta}, f_R(x_{m+\delta})))$  усуваються аналогічно.

ЛДК\*, побудоване за допомогою алгоритму УПР, буде безпомилково розпізнавати не тільки об'єкти основної НВ (1), але й об'єкти з (2). Це впливає із вищеописаної загальної процедури побудови алгоритму УПР.

Якщо описану вище схему УПР включити в довільний алгоритм розпізнавання, який пов'язаний із концепцією ЛДК, наприклад [10], то це забезпечить велику гнучкість даних алгоритмів.

Отже, алгоритм УПР усуває знайдені помилки розпізнавання а ЛДК, використовуючи при цьому тільки правило класифікації, побудоване за даними НВ та об'єкти з ТВ, для яких відбулася помилка розпізнавання. При цьому правило класифікації змінюється таким чином, що правильно розпізнає як об'єкти НВ, так і об'єкти ТВ, на яких раніше виникали помилки розпізнавання. Нижче приведемо ще кілька прикладів практичних застосувань алгоритму УПР.

Для цього спочатку визначимо кількість можливих помилок розпізнавання на кожному шляху в ЛДК. При розпізнаванні дискретних наборів за допомогою ЛДК інколи доцільно знайти на дереві шляхи, на яких найбільш можливе виникнення помилок розпізнавання. Залежно від ситуації можна поступити по-різному – відмовитися розпізнавати об'єкти, розпізнавати об'єкти тощо. Нехай НВ приведена до допустимого вигляду (виконується гіпотеза адекватності та несуперечливості). Відомо, що ЛДК об'єкти з початкової НВ розпізнає безпомилково. Загальна кількість всіх можливих об'єктів, що містять  $n$  ознак, не перевищує  $K_1 * K_2 * \dots * K_n$ , де  $K_i$  – множина значень ознаки  $P_i(x)$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

Звідси випливає, що ЛДК у процесі розпізнавання може допустити не більше ніж  $K_1 * K_2 * \dots * K_n - m$  помилок, де  $m$  – кількість об'єктів НВ.

Нехай  $M_{\eta_{i_1} \dots \eta_{i_\xi}}^j$  – кількість пар  $(x_1, f_R(x_1))$ , ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), що входять до НВ, які задовольняють таким умовам:

$$x_i \in G_{\eta_{i_1} \dots \eta_{i_\xi}}, (1 \leq \xi \leq n) \text{ та } f_R(x) = j, (j = 0, 1, \dots, k - 1),$$

$$\text{де } G_{\eta_{i_1} \dots \eta_{i_\xi}} = \{x \in G / P_{i_1}(x) = \eta_{i_1}, \dots, P_{i_\xi}(x) = \eta_{i_\xi}\}.$$

**Твердження 1.** Якщо  $\max_{0 \leq j \leq k-1} M_{\eta_{i_1} \dots \eta_{i_\xi}}^j = S$ , ( $1 \leq \xi \leq n$ ) то на шляху  $\eta_{i_1} \dots \eta_{i_\xi}$  ЛДК у процесі розпізнавання можливе не більше ніж  $K_{n-\xi} - S$  помилок, де  $K_{n-\xi} = K_1 * K_2 * \dots * K_n / K_{i_1} * \dots * K_{i_\xi}$ .

**Доведення.** Розглянемо регулярне ЛДК (тобто дерево, у якого в вершинах  $\xi$ -го ярусу знаходяться тільки ознаки  $P_{i_\xi}(x)$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) називається регулярним). Кількість вершин на  $\xi$ -му ярусі регулярного ЛДК дорівнює  $K_{i_1} * \dots * K_{i_\xi}$ . А кількість кінцевих вершин регулярного ЛДК дорівнює  $K_1 * K_2 * \dots * K_n$ , де  $K_{i_\xi}$  – кількість значень ознаки  $P_{i_\xi}(x)$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $n$  – кількість ознак НВ. Звідси, якщо кожну вершину  $\xi$  – ярусу регулярного ЛДК вважати початковою, то таке регулярне ЛДК розіб'ється на  $K_{i_1} * \dots * K_{i_\xi}$  регулярних ЛДК, кожне з яких буде мати по  $K_{n-\xi} = K_1 * K_2 * \dots * K_n / K_{i_1} * \dots * K_{i_\xi}$  кінцевих вершин. Таким чином, якщо кінцева вершина деякого ЛДК виявляється на  $\xi$ -му ярусі, то вона являє собою  $K_{n-\xi}$  кінцевих вершин регулярного ЛДК. Якщо задано шлях  $\eta_{i_1} \dots \eta_{i_\xi}$ , ( $1 \leq \xi \leq n$ ), який приводить в кінцеву вершину, то ця вершина являє

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

собою  $K_{n-\xi}$  об'єктів. Але якщо в цю вершину вже попадає  $S$  об'єктів з НВ то кількість помилок, які можуть виникнути на даному шляху не перевищує  $K_{n-\xi} - S$ .

Із цього твердження випливає, що якщо  $\max_{0 \leq j \leq k-1} M_{\eta_{i_1} \dots \eta_{i_\xi}}^j = K_{i_1} * \dots * K_{i_\xi}$ , то на шляху  $\eta_{i_1} \dots \eta_{i_\xi}$  в ЛДК всі об'єкти будуть розпізнаватися правильно. Якщо  $K_1 = K_2 = \dots = K_n = 2$ , то твердження буде звучати таким чином: якщо  $\max_{0 \leq j \leq k-1} M_{\eta_{i_1} \dots \eta_{i_\xi}}^j = S$  на шляху  $\eta_{i_1} \dots \eta_{i_\xi}$  в ЛДК в процесі розпізнавання можливе не більше ніж  $2^{n-\xi} - S$  помилок.

Задача побудови ЛДК за неповною НВ. Інколи доцільно мати алгоритми, за допомогою яких можна було би побудувати ЛДК за неповною НВ, за  $m$  ознаками ( $m < n$ ),  $n$  – кількість ознак об'єктів у НВ або по  $l_1$  об'єктам з  $l$ , заданих об'єктів НВ ( $l_1 < l$ ). В другому випадку, коли ЛДК будується за  $l_1$  об'єктами з НВ, можна скористатися одним з відомих алгоритмів [7]. Побудоване таким чином ЛДК буде безпомилково розпізнавати об'єкти  $l_1$  з НВ, а на інших об'єктах НВ можливі помилки розпізнавання. В цьому випадку використовуємо алгоритм УПР, описаний вище. Побудоване таким способом ЛДК буде безпомилково розпізнавати об'єкти НВ. У ряді випадків описаний вище метод істотно прискорює процес побудови ЛДК за даними НВ, що дуже важливо для задач РО.

Для побудови ЛДК за  $m$  ознаками з  $n$ , якими задаються об'єкти НВ впорядкуємо ознаки по важливості (мірі інформативності або ціні). Для цієї задачі можна використовувати методи та підходи описані в роботі [9]. Після цього береться  $m$  впорядкованих по важливості ознак та будується ЛДК за допомогою якого відомого алгоритму дерева та алгоритму УПР. Це суттєво прискорює процес побудови ЛДК, що дуже важливо для практичного застосування.

Задача відновлення значень ознак за допомогою ЛДК та алгоритм УПР. Спочатку побудуємо ЛДК для об'єктів НВ, для яких всі значення ознак визначені. Після цього за допомогою побудованого дерева розпізнаємо об'єкти НВ, для яких значення ознак визначені не повністю.

Крок 1. На першому кроці зафіксуємо один з таких об'єктів тестової вибірки.

Крок 2. Додатково визначаємо невідомі значення ознак,  $P_{i_1}, \dots, P_{i_\xi}$ , ( $1 \leq \xi \leq n$ ) всякими значеннями. Проведемо розпізнавання цих об'єктів за побудованим ЛДК. Нехай об'єкт, для якого значення ознак  $P_{i_1}, \dots, P_{i_\xi}$  не визначені на НВ, належить класу  $H_l$ , ( $1 \leq l \leq k - 1$ ),  $k$  – кількість класів НВ. Якщо ЛДК віднесе цей об'єкт до класу  $H_l$ , то вважають, що ознаки  $P_{i_1}, \dots, P_{i_\xi}$ , визначені значеннями  $x_{i_1}, \dots, x_{i_\xi}$ , можуть приймати ці значення, а в протилежному випадку – ні.

Крок 3. На наступному кроці беремо (фіксуємо) наступний з об'єктів тестової вибірки та переходимо до кроку 1. Якщо таких об'єктів більше нема, то процес відновлення значень ознак закінчуємо.

Визначення 1. Інформація, що вказує тільки на порядок розміщення ознак в логічному дереві, будемо називати схемою ЛДК, а кількість ознак, що входять у цю схему назовемо її порядком (потужністю).

Теорема 1. Кількість схем ЛДК визначається рекурсивним відношенням:  $N_{n+1} = N_n^2 * (n + 1)$ , де  $N_2 = 2$ ,  $n$  – кількість ознак (ознак об'єкта у НВ) задачі розпізнавання.

Доведення. Для  $n = 2$  теорема очевидна. Для довільного  $n$  задача розбивається на прості випадки, при  $n = 3$  маємо дві схеми порядку 2. Оскільки ці схеми незалежні, то маємо  $N_3 = N_2^2 * 3$ , при  $n = 4$  схема ЛДК розбивається на дві незалежні схеми порядку 3, тому  $N_4 = N_3^2 * 4$  і так далі.

*Задача побудови мінімального ЛДК відносно кількості вершин.* Запропонуємо алгоритм знаходження мінімальних тестів та використання їх для побудови ЛДК. Введемо деякі позначення, які необхідні для роботи.

$$G_{r_1 \dots r_n} = \left\{ x \in \frac{G}{P_1(x)} = r_1, \dots, P_n(x) = r_n \right\}, \quad (3)$$

де  $P_1(x), \dots, P_n(x)$  – деяка система ознак,  $r_i \in \{0, 1, \dots, k-1\}$ , ( $i = 1, \dots, n$ ),  $M_{r_1 \dots r_n}$  – кількість тих пар НВ  $(x_1, f_R(x_i))$ , ( $1 \leq i \leq m$ ), які задовольняють умову:  $x_i \in G_{r_1 \dots r_n}$ .

$M_{r_1 \dots r_n}^j$  – кількість з (4) таких наборів, які задовольняють таким умовам:

$$x_i \in G_{r_1 \dots r_n} \text{ та } f_R(x) = j \quad (4)$$

$$t_{r_1 \dots r_n}^j = M_{r_1 \dots r_n}^j / M_{r_1 \dots r_n} \quad (5)$$

$a_{r_1 \dots r_n} = \max_{1 \leq j \leq k-1} t_{r_1 \dots r_n}^j$ , де  $r_1 \dots r_n \in \{0, \dots, k-1\}$ , ( $j = 0, 1, \dots, k-1$ ), ( $i = 1, \dots, n$ ) тоді:

*Теорема 1.3* Набір ознак із номерами  $i_1, \dots, i_\xi$ , ( $\xi \in 1, \dots, n$ ) є тестом тоді і тільки тоді, коли для них виконується:

$$\sum_{r_{i_1} \dots r_{i_\xi}} \left( \frac{M_{r_{i_1} \dots r_{i_\xi}}}{m} \right) * a_{r_{i_1} \dots r_{i_\xi}} = 1. \quad (6)$$

Формула (6) дає можливість знаходити тести заданої довжини (під довжиною тесту будемо розуміти кількість ознак, що входять у нього). При  $\xi = 1$  формула (6) дає можливість знаходити тести довжиною «1», при  $\xi = 2$  – тести довжини «2», а при  $\xi = \eta$  – тести довжиною “ $\eta$ ” ( $1 \leq \eta \leq n$ ). Формула (6) дає можливість знаходити тести у випадку коли в НВ присутня довільна кількість класів  $f_R(x) \in \{0, 1, \dots, k-1\}$  а ознаки  $P_i(x)$  приймають довільні значення  $P_i(x) \in \{0, 1, \dots, k-1\}$ .

*Зауваження.* Якщо хоча би один член виразу (6) не дорівнює одиниці, то набір ознак з номерами  $r_{i_1} \dots r_{i_\xi}$  не є тестом.

Це зауваження дозволяє ефективно знаходити тести за допомогою формули (6). Мінімальні тести за формулою (6) знаходяться, зважаючи на визначення поняття мінімального тесту.

Виникає питання, як побудувати ЛДК за мінімальним тестом та чи буде таке побудоване дерево мінімальним (ЛДК побудоване за даними НВ, називається мінімальним, якщо немає іншого ЛДК\*, побудованого за цією ж НВ, у якої кількість вершин менша за початкове дерево). Відповідь на першу частину питання досить тривіальна. Якщо група (набір) ознак із номерами  $r_{i_1} \dots r_{i_\xi}$  є мінімальним тестом, то побудова ЛДК за цими ознаками не є важкою. Це можна зробити за допомогою алгоритмів побудови ЛДК, описаних, наприклад, у [7].

Відповідь на другу частину питання не є простою. Виявляється, що ЛДК, побудоване за мінімальним тестом, не завжди є мінімально можливим. Це можна побачити з таблиці 1.

Таблиця 1

*Залежність складності дерева від кількості ознак*

$KL \setminus D$	1	2	3	4	5	6	7	8	...	$n$
Max	3	7	15	31	63	127	255	511	...	$2^{n+1} - 1$
Min	3	5	7	9	11	13	15	17	...	$2n + 1$

Зауважимо, що тут  $D$  – довжина тупикового тесту,  $KL$  – кількість можливих вершин, Max – вказує на максимальну кількість вершин ЛДК (складність), при заданій довжині тупикового тесту, Min – вказує на мінімальну кількість вершин ЛДК, можливу при заданій довжині тупикового тесту.



TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

З таблиці бачимо, що можливий випадок, коли ЛДК, побудоване за мінімальним тестом, може мати більше вершин, ніж ЛДК, побудоване за тупиковим тестом більшої довжини. Наприклад, ЛДК, побудоване за мінімальним тестом завдовжки 4, може мати 31 вершину, а ЛДК, побудоване за тупиковим тестом завдовжки 14, може мати 29 вершин, ЛДК, побудоване за мінімальним тестом завдовжки 10, може мати 2047 вершин, а ЛДК, побудоване за тупиковим тестом завдовжки 100, може мати 201 вершину (за тупиковим тестом завдовжки 1000 – 2001 вершину).

Зі сказаного вище випливає дуже важливе питання: як за заданою НВ побудувати ЛДК, яке мало б мінімальну кількість вершин. Особливу важливість це питання набуває в тих випадках, коли треба побудувати деяку технічну схему, модель, систему, яка б правильно класифікувала фіксовану кількість наборів. Вирішення такого питання дозволить у цих випадках будувати найпростішу процедуру (схему, систему) розпізнавання.

Складність ЛДК залежить від кількості кінцевих вершин у дереві.

Якщо кількість кінцевих вершин у ЛДК позначити через  $K$ , то загальна кількість вершин  $N$  в ЛДК можна розрахувати за формулою:

$$N = 2K - 1. \tag{7}$$

Це справедливо для випадку, коли  $(P_i(x) \in \{0,1\})$ ,  $2 \leq K \leq 2^n$ , де  $n$  – кількість ознак об'єктів НВ.

Кількість кінцевих вершин ЛДК залежить від того, скільки наборів НВ відповідають одній кінцевій вершині. Виявляється, що можна знайти за заданою НВ таке  $K$ , яке відповідає мінімальній кількості вершин деякого можливого ЛДК. Зрозуміло, що таке ЛДК буде мінімальним за складністю (кількістю вершин). Це випливає з формули (7).

Нехай вже є набір тупикових тестів, які знайдені за формулою (6). Зафіксуємо деякий тупиковий тест  $P_{i_1} \vee P_{i_2} \vee \dots \vee P_{i_\xi}$ . Для кожної ознаки, що входить у даний тупиковий тест, знайдемо:  $\max_{1 \leq j \leq k-1} M_{r_{i_\varepsilon}}^j$ , де  $(\varepsilon = 0, 1, \dots, \xi)$ ,  $(\xi = 1, \dots, n)$ , для кожної ознаки.

Розглянемо два можливі випадки:

1. Існує таке значення ознаки  $P_{i_\varepsilon}$ , що для неї буде  $\max_{1 \leq j \leq k-1} M_{r_{i_\varepsilon}}^j < M_{r_{i_\varepsilon}}$ .
2. Немає такого значення ознаки  $P_{i_\varepsilon}$ , що для нього  $\max_{1 \leq j \leq k-1} M_{r_{i_\varepsilon}}^j < M_{r_{i_\varepsilon}}$ .

У першому випадку будемо говорити, що для цього значення ознаки  $P_{i_\varepsilon}$  є деякий шлях у ЛДК (ЛДК побудоване за таким тупиковим тестом) довжиною один крок і цей шлях приводить у кінцеву вершину.

У другому випадку в ЛДК немає шляху довжиною в один крок для цього значення ознаки  $P_{i_\varepsilon}$  такого, який би приводив у кінцеву вершину дерева.

У першому випадку – це кількість наборів НВ, на яких ознака  $P_{i_\varepsilon}(x)$  набуває фіксоване значення з множини  $\{0, \dots, k - 1\}$ , а функція  $f_R(x)$  набуває на всіх цих наборах фіксоване значення із множини  $\{0, \dots, k - 1\}$ . Усі ці набори входять в одну кінцеву вершину ЛДК. Якщо у вершинах ЛДК стоїть ознака  $P_{i_\varepsilon}$ , то далі знаходимо всі  $\max_{1 \leq j \leq k-1} M_{r_{i_1} r_{i_2}}^j$  для цього тупикового тесту і так далі доти, поки рівність  $\max_{1 \leq j \leq k-1} M_{r_{i_1} \dots r_{i_\xi}}^j = M_{r_{i_1} \dots r_{i_\xi}}$  не виконається для всіх наборів  $r_{i_1} \dots r_{i_\xi}$  з НВ. Після цього підраховуємо кількість ситуацій, коли рівність  $\max_{1 \leq j \leq k-1} M_{r_{i_1} \dots r_{i_\varepsilon}}^j = M_{r_{i_1} \dots r_{i_\varepsilon}}$ ,  $(\varepsilon = 1, \dots, \xi)$  виконувалась для деяких наборів  $r_{i_1} \dots r_{i_\xi}$  з НВ. Позначимо це число через  $\eta$ ,  $\eta$  – це кількість можливих кінцевих вершин ЛДК, яке може бути побудовано за цим тупиковим тестом.

Виконаємо таку ж саму процедуру для кожного тупикового тесту, знайденого за формулою (6) та порівняємо знайдене  $\eta$  для кожного тупикового тесту. Тест, для якого  $\eta$  буде мінімальним, і дозволяє побудувати мінімальне ЛДК.

**Висновки відповідно до статті.** Отже, зважаючи на все вищезазначене, у роботі можна зафіксувати такі положення:

1. Навіть у ситуації виникнення помилок у ЛДК на етапі роботи з тестовою вибіркою є можливість виправлення помилок (алгоритм УПР) шляхом корекції структури дерева, таким чином правильно класифікується як НВ, так і ТВ.

2. У довільному ЛДК побудованому за даними початкової НВ на деякому фіксованому шляху  $\eta_{i_1} \dots \eta_{i_\xi}$  (шляху в ЛДК) у процесі розпізнавання можливе не більше ніж  $K_{n-\xi} - S$  помилок.

3. Інколи доцільно мати алгоритм, за допомогою якого можна було б побудувати ЛДК за неповною НВ (і за кількістю об'єктів, і за кількістю ознак). Побудоване таким способом ЛДК буде безпомилково розпізнавати частину НВ, за якою побудоване дерево, а на інших наборах – давати помилки (уникнути цього можна, застосувавши алгоритм УПР).

4. Довільне ЛДК, побудоване за даними НВ за мінімальним тестом, не завжди є мінімально можливим.

5. Загальну кількість вершин у ЛДК, яке побудоване за даними НВ, можна розрахувати за формулою  $N = 2K - 1$ .

#### Список використаних джерел

1. Srikant R., Agrawal R. Mining generalized association rules. *Future Generation Computer Systems*. 1997. Vol. 13, № 2. P. 161–180.
2. Василенко Ю. А., Василенко Е. Ю., Повхан І. Ф., Вашук Ф. Г. Концептуальна основа систем розпізнавання образів на основі метода розгалуженого вибору ознак. *Науково технічний журнал «Східно-Європейський журнал передових технологій»*. 2004. Т. 1., № 7. С. 13–15.
3. Василенко Ю. А., Повхан І. Ф., Вашук Ф. Г. Проблема оцінки складності логічних дерев розпізнавання та загальний метод їх оптимізації. *Науково технічний журнал «Східно-Європейський журнал передових технологій»*. 2011. Т. 6, № 4(54). С. 24–28.
4. Василенко Ю.А., Повхан І.Ф., Вашук Ф.Г. Загальна оцінка мінімізації деревоподібних логічних структур. *Науково технічний журнал «Східно-Європейський журнал передових технологій»*. 2012, Т. 1, № 4(55). С. 29–33.
5. Povhan I. General scheme for constructing the most complex logical tree of classification in pattern recognition discrete objects. *Електроніка та інформаційні технології*. 2019. Вип. 11. С. 112–117.
6. Василенко Ю. А., Василенко Е. Ю., Повхан І. Ф., Ковач М. Й., Нікарович О. Д. Мінімізація логічних деревоподібних структур в задачах розпізнавання образів. *Науково технічний журнал «Східно-Європейський журнал передових технологій»*. 2004. Т. 3, № 9. С. 12–16.
7. Лавер В. О., Повхан І. Ф. Алгоритми побудови логічних дерев класифікації в задачах розпізнавання образів. *Вчені записки Таврійського національного університету. Серія: технічні науки*. 2019. Т. 30(69), № 4. С.100–106.
8. Vtoghoff P. E. Incremental Induction of Decision Trees. *Machine Learning*. 2009. № 4. P. 161–186.
9. Повхан І. Ф. Проблема функціональної оцінки навчальної вибірки в задачах розпізнавання дискретних об'єктів. *Вчені записки Таврійського національного університету. Серія: технічні науки*. 2018. Т. 29(68), № 6. С. 217–222.
10. Whitley D. An overview of evolutionary algorithms: practical issues and common pitfalls. *Information and Software Technology*. 2001. Vol. 43, №14. P. 817–831.

#### References

1. Srikant, R., Agrawal, R. (1997). Mining generalized association rules. *Future Generation Computer Systems*, 13 (2), 61–180.
2. Vasilenko, Yu. A., Vasilenko, E. Yu., Povkhan, I. F., Vashchuk, F. G. (2004). Conceptual basis of pattern recognition systems based on the method of branched feature selection. *Scientific and technical journal "Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7, 13-15 [in Ukrainian].

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

3. Vasilenko, Yu. A., Vashchuk, F. G., Povkhan, I. F. (2011). The problem of estimating the complexity of the logic trees, recognition, and a general method of optimization. *Scientific and technical journal "Eastern-European Journal of Enterprise Technologies"*, 6/4(54), 24-28 [in Ukrainian].
4. Vasilenko, Yu. A., Povkhan, I. F., Vashchuk, F. G. (2012). General estimation of tree logical structures minimization. *Scientific and technical journal "Eastern-European Journal of Enterprise Technologies"*, 1/4 (55), 29-33 [in Ukrainian].
5. Povkhan, I. (2019). General scheme for constructing the most complex logical tree of classification in pattern recognition of discrete objects. *Collection of scientific papers «Electronics and information technology»*, 11, 112-117.
6. Vasilenko, Yu. A., Vasilenko, E. Yu., Povkhan, I. F., Kovach, M. I., Nikarovych, O. D. (2004). Minimization of logic tree structures in pattern recognition problems. *Scientific and technical journal "Eastern-European Journal of Enterprise Technologies"*, 3/9, 12-16 [in Ukrainian].
7. Laver, V. O., Povkhan, I. F. (2019). Algorithms for constructing logical classification trees in pattern recognition problems. *Scientific notes of Tauride national University. Series: technical Sciences*, 30(69), 4, 100-106 [in Ukrainian].
8. Vtoghoff, P. E. (2009). Incremental Induction of Decision Trees. *Machine Learning*, 4, 61–186.
9. Povkhan, I. F. (2018). The problem of functional evaluation of the training sample in the problems of recognition of discrete objects. *Scientific notes of Taurida national University. Series: technical Sciences*, 29(68), 6, 217-222 [in Ukrainian].
10. Whitley, D. (2001). An overview of evolutionary algorithms: practical issues and common pitfalls. *Information and Software Technology*, 43 (14), 817–831.

UDC 004.8:004.89:519.7

Igor Povkhan

## FLEXIBILITY OF LOGICAL CLASSIFICATION TREES IN PATTERN RECOGNITION PROBLEMS

**Urgency of the research.** Modern trends in the development of the theory of artificial intelligence require effective approaches and methods in the problems of recognition (classification) of images, but the fundamental problem of constructing logical classification trees is the lack of algorithms and methods that would allow uniformly describe different recognition algorithms in the form of classification trees. The work is devoted to the problems of logical classification trees, offers an effective mechanism of learning and elimination of classification errors in the structure of the logical tree.

**Target setting.** At present, various methods and algorithms for constructing logical classification trees are known, but all of them, as a rule, are reduced to the construction of a single classification tree according to the initial training sample, and in the literature there are very few algorithms for constructing logical trees for large samples. It is clear that this is based on objective factors related to the peculiarities of the generation of such complex structures, methods of working with them and storage. This paper intends to at least partially overcome these limitations and is devoted to the development of an effective mechanism for the completion and elimination of classification errors in the structure of the logical tree.

**Actual scientific researches and issues analysis.** The recent publications in the open access, which are devoted to the problems of methods and algorithms of logical classification trees in the problems of pattern recognition, were considered.

**The research objective.** The possibility of efficient and economical operation of the proposed method of changing the structure of the logical tree with arrays of training samples of large volume.

**The statement of basic materials.** Identification of the mechanism by which it would be possible to build a logical classification tree by incomplete initial information (both by the number of objects and by the number of features). This logical tree will accurately recognize the part of the training sample on which the tree is built, and give errors on other sets (to avoid this situation is proposed by applying the algorithm scheme to eliminate errors in the tree structure).

**Conclusions.** The proposed method of completion and elimination of errors in the structure of the logical classification tree allows you to work with training samples of large volume and provides high speed and efficiency of hardware resources in the process of generating the final classification scheme.

**Keywords:** recognition tasks; logical classification trees; elimination of classification errors; recognition scheme; discrete object.

References: 10.

**Повхан Ігор Федорович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення систем, ДВНЗ «Ужгородський національний університет» (вул. Заньковецької 89Б, м. Ужгород, 88000, Україна).

**Povkhan Igor** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of software, Uzhgorod national University (89B Zankovetsky Str., 88000 Uzhgorod, Ukraine).

**E-mail:** igor.povkhan@uzhnu.edu.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1681-3466>

УДК 004.03

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-140-145

Сергій Гріненко

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ІТ-ПІДПРИЄМСТВ

**Актуальність теми дослідження.** Оскільки головним завданням діяльності будь-якого ІТ-підприємства є розробка та впровадження інформаційних систем та технологій, то всі процеси, які пов'язані з реалізацією цього завдання, повинні також використовувати принципи сталого розвитку.

**Постановка проблеми.** На сьогодні залишається невирішеним питання сталого розвитку ІТ-підприємств, його складових, принципів та основних складових сталого розвитку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Були розглянуті останні наукові публікації з предметної області за останні 11 років у відкритому доступі.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Незважаючи на те, що нині існує певна кількість досліджень, що присвячені сталому розвитку, немає робіт, в яких було б розкрито представлення сталого розвитку ІТ-підприємства, враховуючи специфіку цього домену.

**Постановка завдання.** Метою цього дослідження є розробка інформаційної технології для представлення та забезпечення сталого розвитку ІТ-підприємства, що включає характеристику цього домену, а також формування складових інформаційної технології сталого розвитку відповідно до предметної області та наведено основні рекомендації щодо реалізації сталого розвитку в контексті ІТ-підприємств.

**Виклад основного матеріалу.** У статті розглянуто питання сталого розвитку ІТ-підприємств, що включає в себе дослідження еволюції поняття сталого розвитку, подано авторське розуміння терміну «сталій розвиток ІТ-підприємств», наведено характеристики, принципи та основні складові сталого розвитку. Визначено інструменти забезпечення та реалізації сталого розвитку в контексті ІТ-підприємств.

**Висновки відповідно до статті.** До головних результатів дослідження предметної області можна віднести авторське розуміння терміну «сталого розвитку ІТ-підприємств», та визначення інструментів забезпечення та реалізації сталого розвитку в контексті ІТ-підприємств відповідно до запропонованої інформаційної технології.

**Ключові слова:** інформаційна технологія; сталій розвиток ІТ-підприємств; принципи сталого розвитку; «зелені» ІТ. Рис.: 1. Бібл.: 21.

**Актуальність теми дослідження.** Концепція «сталого розвитку» є одним із пріоритетних векторів нашої держави в умовах сьогодення. У цьому контексті принципи сталого розвитку повинні бути впроваджені в усі сфери діяльності економіки країни. Зважаючи на те, що інформаційні системи та технології є обов'язковою складовою будь-якої діяльності, то їх можна вважати важливим активом стійкого розвитку. Оскільки головним завданням діяльності будь-якого ІТ-підприємства є розробка та впровадження таких систем та технологій, то всі процеси, які пов'язані з реалізацією цього завдання, повинні також використовувати принципи сталого розвитку.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідження предметної області «сталого розвитку ІТ-підприємств» представлені роботами як закордонних, так і вітчизняних вчених, серед яких S. Murugesan, S. Naumann, A. Konys, M. Lungu, В. С. Харченко. До результатів досліджень можна віднести [6-9; 11; 13-14].

**Постановка проблеми.** Незважаючи на те, що на сьогодні існує певна кількість досліджень, що присвячені сталому розвитку, немає робіт, в яких би було розкрито представлення сталого розвитку ІТ-підприємства, враховуючи специфіку цього домену. Отже, постає питання про розкриття питання сталого розвитку ІТ-підприємств, його складових, принципів та основних складових сталого розвитку.

**Виклад основного матеріалу.**

**Еволюція теоретичних поглядів на категорію «сталій розвиток».**

Першим етапом в історії становлення концепції сталого розвитку можна вважати Конференцію ООН з проблем навколишнього середовища, що відбулася в Стокгольмі в червні 1972 року. Конференція у Стокгольмі поклала початок розвитку природоохоронної політики на державному рівні, а також природоохоронного руху в світовому масштабі. Цей термін не використовувався прямо, але все-таки міжнародна спільнота погодилася з принципом, який тепер є основоположним для сталого розвитку – і розвитком, і довкіллям, які розглядалися до того часу як окремі питання, можна взаємовигідно управляти.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Лише через 15 років термін «сталий розвиток» був популяризований завдяки доповіді Всесвітньої комісії з навколишнього середовища «Наше спільне майбутнє» та був вжитий у тому ж смислі, що вважається «класичним» визначенням сталого розвитку: «розвиток, який відповідає потребам сьогодення без шкоди для можливостей майбутніх поколінь для задоволення власних потреб».

Актуальність сталого розвитку підкреслено в межах роботи Конференції ООН у Ріо-де-Жанейро в 2012 р. (Ріо+20), рішень 195 країн-учасників конференції ООН щодо зміни клімату (Париж, 2015) та Указу Президента України «Про Стратегію сталого розвитку “Україна – 2020”».

На сьогодні існує декілька визначень поняття «сталого розвитку» в різних контекстах [1-2; 16-19].

Загальноприйнятими і найбільш поширеними є такі визначення.

Сталий розвиток – це такий розвиток країн і регіонів, коли економічне зростання, матеріальне виробництво і споживання, а також інші види діяльності суспільства відбуваються в межах, які визначаються здатністю екосистем відновлюватися, поглинати забруднення й підтримувати життєдіяльність теперішніх та майбутніх поколінь [1].

Сталий розвиток – це такий розвиток суспільства, за якого задоволення потреб нинішнього покоління повинно враховувати інтереси майбутніх поколінь [2].

Відповідно до резолюції, прийнятої Генеральною Асамблеєю ООН 25 вересня 2015 року у сфері сталого розвитку до 2030 року [3], зокрема цілі № 9 «Створення стійкої інфраструктури, сприяння всеосяжній і стійкій індустріалізації та інноваціям», можна виділити такі пункти використання принципів сталого розвитку для управління в IT сфері:

- розвивати якісну, надійну, сталу інфраструктуру, включаючи регіональну і транскордонну інфраструктуру, для підтримки економічного розвитку і добробуту людей;

- до 2030 року модернізувати інфраструктуру та переобладнати промислові підприємства, зробивши їх стійкими за рахунок підвищення ефективності використання ресурсів і більш широкого застосування чистих та екологічно безпечних технологій і промислових процесів за участю всіх країн відповідно до їхніх індивідуальних можливостей;

- активізувати наукові дослідження, нарощувати технологічний потенціал промислових секторів у всіх країнах, особливо таких, що розвиваються, у тому числі шляхом стимулювання до 2030 року інноваційної діяльності та значного збільшення чисельності працівників у сфері інновацій;

- сприяти розвитку екологічно сталої інфраструктури в країнах, що розвиваються, через збільшення фінансової, технологічної та технічної підтримки;

- підтримувати розробки, дослідження та інновації у сфері вітчизняних технологій;

- істотно розширити доступ до інформаційно-комунікаційних технологій.

Відповідно до операційної цілі 1.2. «Створення життєстійкої інфраструктури, сприяння інклюзивному енергоефективному та інноваційному промисловому розвитку» Стратегічної цілі № 1 [4], можна виділити такі кроки для досягнення сталого розвитку вітчизняної промисловості:

- сформувати організаційну інфраструктуру підтримки підприємництва у вигляді екосистем, технопарків, бізнес-інкубаторів, мереж надання послуг підприємствам, зокрема на засадах державно-приватного партнерства; сприяти розвитку кластерних мереж;

- до 2030 року модернізувати інфраструктуру і підприємства базових галузей промисловості, зробивши їх збалансованими за рахунок підвищення ефективності використання природних ресурсів та ширшого застосування енергоефективних і екологічно безпечних технологій чистого виробництва та інтегрованих систем управління згідно з міжнародними стандартами;

- до 2030 року наростити частку реалізованої інноваційної продукції в обсязі промислової продукції до 15 %;

– активізувати наукові дослідження, нарощувати технологічний потенціал промислових секторів, зокрема шляхом стимулювання інноваційної діяльності;  
– створити національну інфраструктуру геопросторових даних промислових підприємств та їхнього впливу на довкілля (реєстри викидів, скидів і переносу забруднюючих речовин).

#### **Поняття «сталого розвитку ІТ-підприємства».**

Для дослідження предметної області були проаналізовані такі джерела:

- Порядок денний у галузі сталого розвитку на період до 2030 року. Резолюція, прийнята Генеральною Асамблеєю ООН 25 вересня 2015 року [3];
- Стратегія сталого розвитку України до 2030 року [4];
- наукові дослідження закордонних та вітчизняних вчених [5-14];
- нормативно-законодавча база (стандарти, закони тощо) [20-22];
- опитування доменних експертів.

Під «сталий розвитком ІТ» будемо розуміти керований розвиток, основою якого є екологічний підхід (екопідхід), а також який характеризується напрямками, принципами, складовими, інструментами забезпечення сталого розвитку ІТ-підприємств та моделями ІТ-підприємств. Оскільки основною діяльністю ІТ-підприємств є розробка, впровадження та супроводження програмного забезпечення (ПЗ), то ПЗ розглядається як основний актив діяльності ІТ-компаній. Тому в цій статті «сталий розвиток ІТ-підприємств» досліджується саме з погляду розробки програмних продуктів (ПП).

Враховуючи вищенаведені твердження, можна навести завдання застосування екoпідходу в дослідженнях діяльності ІТ-підприємств:

1. Застосуванням до розробки ПЗ загальних принципів і вимог екологічного виробництва й використання технічних об'єктів [6; 9; 10; 12].

2. Реалізацією «зеленого», ресурсозберігаючого та безвідходного виробництва ПЗ [8, 13, 14].

3. Впровадження в управління ІТ підприємствами нових моделей з урахуванням принципів сталого розвитку [5; 7; 9; 11].

Вирішення цих завдань вимагає розроблення інформаційної технології забезпечення сталого розвитку ІТ-підприємств. На рис. 1 наведено основні складові інформаційної технології.



*Рис. 1. Складові інформаційної технології сталого розвитку*

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Під інструментами забезпечення та реалізації сталого розвитку в контексті ІТ-підприємств будемо розуміти:

- створення та підтримку роботи інформаційно-аналітичних центрів, освітніх та науково-дослідних установ із питань сталого розвитку та аналогічних центрів кращих практик сталого розвитку;
- пріоритетність розробки та впровадження екологічних технологій, зокрема енергоощадних і низьковуглецевих;
- забезпечити наукову обґрунтованість рішень у сфері врахування принципів сталого розвитку,
- сприяти розвитку досліджень, що забезпечують оцінку ресурсів та їх ефективного використання;
- впровадження нових моделей в управління ІТ-підприємств (екосистеми, бізнес-інкубатори, техноцентри тощо);
- використання у діяльності ІТ-підприємств ресурсозберігаючого ПЗ;
- використовувати на всіх етапах життєвого циклу ПП принципів «зеленості»;
- використовувати інновації та кращі практики з розробки ПЗ.

**Висновки відповідно до статті.** Цілі сталого розвитку ІТ-підприємств, враховуючи специфіку їхньої діяльності, мають становити систему взаємоузгоджених заходів. У процесі визначення цілей сталого розвитку, відповідних завдань та показників необхідно враховувати глобальні орієнтири розвитку домену. У статті розглянуто питання сталого розвитку ІТ-підприємств, що включає в себе дослідження еволюції поняття сталого розвитку, подано авторське розуміння терміну «сталого розвитку ІТ-підприємств», наведено характеристики, принципи та основні складові сталого розвитку. Визначено інструменти забезпечення та реалізації сталого розвитку в контексті ІТ-підприємств.

#### Список використаних джерел

1. Що таке сталий розвиток? URL: <http://www.sd4ua.org/shho-take-stalij-rozvitok>.
2. Про засади державної регіональної політики: Закон України від 05.02.2015 № 156-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/term/33999:52098/sp?sp=i6:max15>.
3. Порядок денний в галузі сталого розвитку на період до 2030 року. Резолюція, прийнята Генеральною Асамблеєю ООН 25 вересня 2015 року. URL: [https://www.ua.undp.org/content/dam/ukraine/docs/SDGreports/Agenda2030\\_UA.pdf](https://www.ua.undp.org/content/dam/ukraine/docs/SDGreports/Agenda2030_UA.pdf).
4. Проект «Концепція переходу України до сталого розвитку до 2030 року». URL: <http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc34?id=&pf3511=64508&pf35401=462260>.
5. Orsato R. J. Sustainability strategies, Business press. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1057/9780230236851\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1057/9780230236851_2).
6. Chen A. J. W., Boudrean M.-C., Watson R. T. Information systems and ecological sustainability. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/4bc9/7e80dc0b74a50fe4106399fe9477d292c192.pdf>.
7. Dyllick I., Hockerts K. Beyond the business case for corporate sustainability. URL: <https://instruct.uwo.ca/business/bus020-mwf/acs410/reading14.pdf>.
8. Harnessing. Green IT: Principles and Practices. (with GR Gangadharan; Eds). Wiley and IEEE Computer Society Press. URL: [https://books.google.com/books/about/Harnessing\\_Green\\_IT.html?id=xAtJK2L7O5UC](https://books.google.com/books/about/Harnessing_Green_IT.html?id=xAtJK2L7O5UC).
9. Konys A. An Ontology-Based Knowledge Modelling form a Sustainability Assessment Domain. URL: [https://res.mdpi.com/sustainability/sustainability-10-00300/article\\_deploy/sustainability-10-00300.pdf?filename=&attachment=1](https://res.mdpi.com/sustainability/sustainability-10-00300/article_deploy/sustainability-10-00300.pdf?filename=&attachment=1).
10. Naumann S. Sustainability Informatics – A new Subfield of Applied Informatics? URL: <http://enviroinfo.eu/sites/default/files/pdfs/vol119/0384.pdf>.
11. Lungu M. Reverse Engineering Software Ecosystems. PhD thesis. URL: <https://www.inf.usi.ch/faculty/lanza/Downloads/Lung2010a.pdf>.
12. Grinenko S. A. Systematic Mapping Studies in Sustainable IT. *Інженерія програмного забезпечення*. 2016. № 4(28). Р. 5–14.

13. Зеленая ИТ-инженерия: в двух томах. Том 1. Принципы, модели, компоненты / под ред. В. С. Харченко. Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2014. 594 с.
14. Зеленая ИТ-инженерия: в двух томах. Том. 2. Системы, индустрия, социум. Лекционный материал / под ред. В. С. Харченко. Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2014. 688 с.
15. Хомяченкова Н. А. Мониторинг устойчивого развития промышленного предприятия. *Российское предпринимательство*. 2011. № 1, вып. 2 (176). С. 63-67.
16. Гришаков К. Р. Понятие устойчивого развития промышленного предприятия. *SCIARTICLE.RU*. 2013. № 3. С. 126-134.
17. Колочева В. В., Титова В. А. Устойчивое развитие предприятий на основе процессного подхода. *Вестник ЮУрГУ*. 2010. № 7. С. 20-25.
18. Шандова Н. В. Рушійні сили стійкого розвитку промислового підприємства. *Економічні інновації*: зб. наук. пр. Одеса: ИПРЕД НАН України, 2013. Вип. 54. С. 354-362.
19. ISO 14001. Environmental Management Systems – Requirements with guidance for use. URL: <https://www.iso.org/iso-14001-environmental-management.html>.
20. BS 8900-1:2013. Managing sustainable development of organizations. URL: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1204639/mod\\_folder/content/0/BS8900.pdf?forcedownload=1](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1204639/mod_folder/content/0/BS8900.pdf?forcedownload=1).
21. BS 8900-2:2013. Managing sustainable development of organizations. Framework for assessment against BS 8900-1. Specification. URL: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1204639/mod\\_folder/content/0/BS8900.pdf?forcedownload=1](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1204639/mod_folder/content/0/BS8900.pdf?forcedownload=1).

### References

1. Scho take staliy rozvitok? [What is sustainable development?]. *www.sd4ua.org*. Retrieved from <http://www.sd4ua.org/shho-take-staliy-rozvitok> [in English].
2. Pro zasady derzhavnoi rehionalnoi polityky [On the principles of state regional policy]. № 156-VIII (on February 5, 2015). *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/term/33999:52098/sp?sp=i6:max15> [in English].
3. Poriadok denniy v galyzi stalogo rozvitky na period do 2030 roky. Rezolutsiya, priyniata Generalnou Asambleieu OON 25 veresnia 2015 roky [Sustainable Development Agenda 2030. Resolution adopted by the UN General Assembly on 25 September 2015]. *www.ua.undp.org*. Retrieved from <https://www.ua.undp.org/content/dam/ukraine/docs/SDGreports/Agenda2030-UA.pdf> [in English].
4. Proekt «Kontseptsiya perehody Ukrainu do stalogo rozvitky do 2030 roky» [Project «Concept of transition of Ukraine to sustainable development till 2030»]. *wl.c1.rada.gov.ua*. Retrieved from <http://wl.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc34?id=&pf3511=64508&pf35401=462260> [in English].
5. Orsato, R. J. (n.d.). Sustainability strategies, Business press. *link.springer.com*. Retrieved from [https://link.springer.com/chapter/10.1057/9780230236851\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1057/9780230236851_2) [in English].
6. Chen, A. J. W., Boudrean, M.-C. & Watson, R. T. (n.d.). Information systems and ecological sustainability. *pdfs.semanticscholar.org*. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/4bc9/7e80dc0b74a50fe4106399fe9477d292c192.pdf> [in English].
7. Dyllick, I. & Hockerts, K. (n.d.). Beyond the business case for corporate sustainability. *instruct.uwo.ca*. Retrieved from <https://instruct.uwo.ca/business/bus020-mwf/acs410/reading14.pdf> [in English].
8. Harnessing. Green IT: Principles and Practices. (with GR Gangadharan; Eds). Wiley and IEEE Computer Society Press. *books.google.com*. Retrieved from [https://books.google.com/books/about/Harnessing\\_Green\\_IT.html?id=xAtJK2L7O5UC](https://books.google.com/books/about/Harnessing_Green_IT.html?id=xAtJK2L7O5UC) [in English].
9. Konys, A. (n.d.). An Ontology-Based Knowledge Modelling form a Sustainability Assessment Domain. *res.mdpi.com*. Retrieved from [https://res.mdpi.com/sustainability/sustainability-10-00300/article\\_deploy/sustainability-10-00300.pdf?filename=&attachment=1](https://res.mdpi.com/sustainability/sustainability-10-00300/article_deploy/sustainability-10-00300.pdf?filename=&attachment=1) [in English].
10. Naumann, S. (n.d.). Sustainability Informatics – A new Subfield of Applied Informatics? *enviroinfo.eu*. Retrieved from <http://enviroinfo.eu/sites/default/files/pdfs/vol119/0384.pdf> [in English].
11. Lungu, M. (n.d.). Reverse Engineering Software Ecosystems. PhD thesis. *www.inf.usi.ch*. Retrieved from <https://www.inf.usi.ch/faculty/lanza/Downloads/Lung2010a.pdf> [in English].
12. Grinenko, S. A. (2016). Systematic Mapping Studies in Sustainable IT. *Software Engineering Journal*, 4(28), 5–14 [in English].
13. Kharchenko, V. S. (Ed.) (2014). *Zelenaia IT-inzhenerii. Tom 1. Printsipy, modeli, komponenty [Green IT Engineering. Volume 1. Principles, models, components]*. Kharkiv: National Aerospace University after Zhukovskiy «KhAI» [in Russian].



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

14. Kharchenko, V. S. (Ed.) (2014). Zelenaiia IT-inzhenerii. Tom. 2. Sistemy, industriia, sotsium. Lektsionnyi material [Green IT Engineering. In two volumes. Volume 2 Systems, Industry, Society. Lecture material]. Kharkiv: National Aerospace University after Zhukovskiy «KhAI» [in Russian].
15. Khomyachenkova, N. A. (2011). Monitoring ustoichivoho rozvitiia promyshlennogo predpriatiia. Rossiiskoe predprinimatelstvo [Monitoring of sustainable development of an industrial enterprise]. *Russian entrepreneurship*, 1 (2 (176)), 63–67 [in Russian].
16. Grishakov, K. R. (2013). Poniatie ustoichivoho rozvitiia promyshlennogo predpriatiia [The concept of sustainable development of industrial enterprise]. *SCIARTICLE.RU*, 3, 126–134 [in Russian].
17. Kolocheva, V. V. & Titova, V. A. (2010). Ustoichivoe razvitie predpriatii na osnove protsessnogo pokhoda [Sustainable development of enterprises on the basis of process hike]. *Vestnyk YuUrHU – Bulletin of YuUURU*, 7, 20–25 [in Russian].
18. Shandova, N. V. (2013). Rushiini syly stiikoho rozvytku promysloвого pidpriemstva [The driving force behind the sustainable development of an industrial enterprise]. *Ekonomichni innovatsii – Economic innovations* (Is. 54, pp. 354–362). Odessa: IPREED NAS of Ukraine [in Ukrainian].
19. ISO 14001. Environmental Management Systems – Requirements with guidance for use. [www.iso.org](https://www.iso.org) Retrieved from <https://www.iso.org/iso-14001-environmental-management.html> [in English].
20. BS 8900-1:2013. Managing sustainable development of organizations. *edisciplinas.usp.br*. [www.iso.org](https://www.iso.org). Retrieved from [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1204639/mod\\_folder/content/0/BS8900.pdf?forcedownload=1](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1204639/mod_folder/content/0/BS8900.pdf?forcedownload=1) [in English].
21. BS 8900-2:2013. Managing sustainable development of organizations. Framework for assessment against BS 8900-1. Specification. *edisciplinas.usp.br*. Retrieved from [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1204639/mod\\_folder/content/0/BS8900.pdf?forcedownload=1](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1204639/mod_folder/content/0/BS8900.pdf?forcedownload=1) [in English].

UDC 004.03

Sergiy Grinenko

**INFORMATION TECHNOLOGY TO PROVIDE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF IT-ENTERPRISES**

**Urgency of the research.** From the point of view that the main task of any IT enterprise is to develop and implement information systems and technologies, all processes related to the implementation of this task should also apply the principles of sustainable development.

**Target setting.** Nowadays the issue of sustainable development of IT enterprises, its components, principles and main components of sustainable development are unresolved.

**Actual scientific researches and issues analysis.** The latest scientific publications in the domain for the last 11 years were considered and were publicly available.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Despite the fact that today there is a certain amount of research on sustainable development, today there are no works in which the representation of sustainable development of an IT enterprise would be disclosed, given the specifics of this domain.

**The research objective.** The aim of the research is to develop information technology to represent and ensure the sustainable development of the IT enterprise, including the characteristics of the domain, as well as the formation of components of sustainable development information technology in the subject area, and provides basic recommendations for the implementation of sustainable development in the context of IT enterprises.

**The statement of basic materials.** The article deals with the issues of sustainable development of IT enterprises, which includes the study of the evolution of the concept of sustainable development, presents the author's understanding of the term "sustainable development of IT enterprises", describes the characteristics, principles and main components of sustainable development. The tools for providing and implementing sustainable development in the context of IT enterprises are identified.

**Conclusions.** The main results of the domain research include the author's understanding of the term "sustainable development of IT enterprises" and the definition of tools for providing and implementing sustainable development in the context of IT enterprises in accordance with the proposed information technology.

**Keywords:** information technology; sustainable development of IT enterprises; principles of sustainable development; green IT.

Fig. : 1. References: 21.

**Грінєнко Сергій Анатолійович** – асистєнт кафедри інженєрії програмного забезпєчення, Національний авіаційний університєт (просп. Комарова, 1, 03058, м. Київ, Україна).

**Grinenko Sergiy** – assistant of Software Engineering Department, National Aviation University (1 Komarova Av., 03058 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** serggrin@ukr.net

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5544-2605>

UDC 681.5:004.77

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-146-154

Róbert Rákay, Alena Galajdová

## COMPARISON OF COMMUNICATION PROTOCOLS FOR SMART DEVICES

**The urgency of the research.** Modern trends in the automation focus on the implementation of new communication protocols, wireless data transfer and reduced costs. The communication part of every automation system is crucial, whether it is in the home or industry.

**Target setting.** During the design of the automated systems and the connection of different devices solution, developers have to address different requirements as addressing, data rates, data security, etc. The newest communication protocols and data transfer technologies provide significant data rate and MCU load reduction.

**Actual scientific researches and issues analysis.** To prepare this paper, different free available datasheets and experimental solutions were analyzed as well as conclusions of our previous and other ongoing experiments were used to create the knowledge base about this research topic.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** There are many different communication solutions and every manufacturer of communication device provides its best solution. Not all of them can be described in this article.

**The research objective.** The different communication technologies were analyzed for future implementation to a smart devices for home automation, in this article.

**The statement of basic materials.** To propose a future model of home automation system, it is necessary to implement the newest communication technologies. Using the latest communication protocols, such as MQTT, CoAP or WebSocket provides a good basis to solve this issue.

**Conclusions.** The proposed paper provides possibilities of the communication for a smart devices of the home automation system. Compared communication protocols have different advantages and disadvantages. The tested protocols meet the communication requirements for home automation devices.

**Keywords:** communication protocols; smart devices; home automation.

Fig.: 9. Tables: 2. References: 13.

**Introduction.** Internet of Things is the term which is used to describe any form of applications that connect and make things – devices to interact through the internet. These devices and “their” network can be divided into Consumer Internet of Things (CIoT) and Industrial Internet of Things (IIoT). These classes of IoT share the same architecture composed of:

- Data collection
- Data storing
- Analysis of data
- Share of information

The IoT for customers or simply IoT represents the consumer oriented applications where all the devices are working to fulfil the needs of the consumer. Typical representatives of this class are smart devices of home automation systems, for example: refrigerator, washer, dryer, personal gadgets such as fitness sensors, smartwatches, etc.

The typical data volumes and rates are relatively low for these systems. The gathered data represent temperature, air pressure, number of steps and other information. The majority of applications are not mission or safety critical and the failure of the devices won't cause any harm, maximally financial or comfort [1].

The Industrial Internet of Things IIoT (Fig.1) represents the industrial applications of interconnected devices which work together [2].

Typically devices operate in industrial grade transport systems, energy production or distribution and also medical environment, etc. The data volumes and transmission rates are relatively higher than in standard IoT. The majority of applications are critical in meanings of goals, aims and safety. Failure or bigger delay can cause great damage, both financial and environmental, e.g. failure of smart grid has a severe impact on the life of people and economy, the errors of intelligent traffic system can threaten drivers and walkers too. The majority of IIoT applications are system centric [3].



Fig. 1. Typical IIoT system

INDUSTRY 4.0 is the term describing the increased integration of information and communication technologies into production systems. According to the three leading German associations of mechanical engineering, information, communication and electrical industry, Industry 4.0 aims for optimization of value chains by implementing an autonomously controlled and dynamic production. With this integration better customization and individualization is carried out [4, 5].

The minimal requirements to determine the suitability of protocols are based on the shown automated monitoring system. (Fig. 2) The main goal of the system is to collect the temperature and humidity in three different room, and in case of emergency alarm the people are warned in the room through a signaling device, smartphone, tablet or notebook.

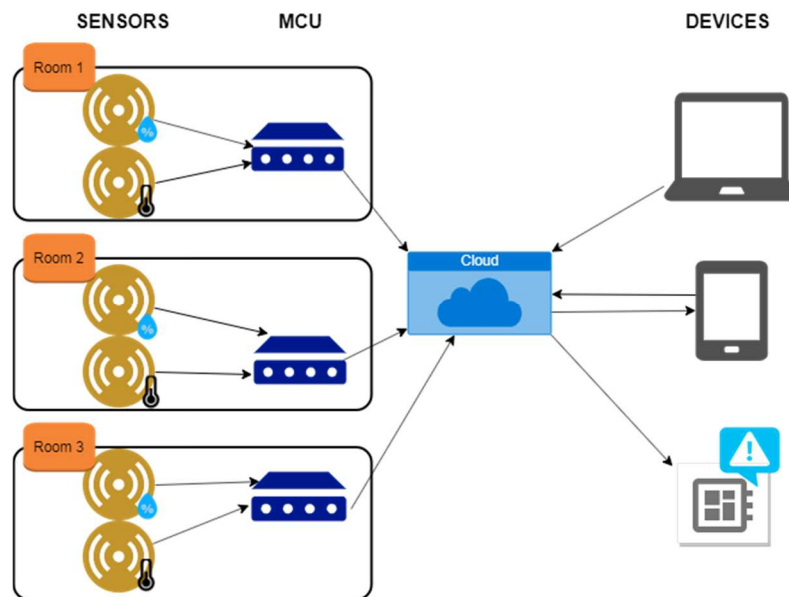


Fig. 2. Automated monitoring system

The collected data is processed from digital values to temperature and humidity in the microcontrollers and after that is sent to the cloud platform. The message body will consist of address and measured value. The values should be collected every 1 hour. The data is represented as numbers with two decimal places. Because of the experimental nature of the monitoring system the data collection is not time critical and the data rates are based on the available wireless connection to a local Wi-Fi router. For this system the measured values are not sensitive or private data therefore the security is not a critical aspect. The data collection will be carried out on one floor of an administrative building where all three rooms are adjacent. The aim of the experiments is not to test the technical characteristics of the standardized communication protocols but to find a suitable, easily applicable protocol for the proposed automation system.

**Data processing.** The data is collected from the cyber-physical world (CPS). CPS is the instrument to reach the increased automation. The main parts of CPS are microcontroller (MCU), actuators, sensor and communication interface. CPS can work autonomously and cooperate with the production environment.

By integrating CPS to the industrial system a “smart factory” is created. Depending on the type of applications data is being created from sensors or sensor networks for market analysis, web pages statistics, etc. The collected data is stored for on-line and off-line processing.

The stored data is analyzed, statistics are created and short/long term trends are updated. The processed data is shared to the relevant services or applications and subscribers. These systems are supposed to react, display, publish, and store the data. The key requirement in IoT is the efficient and scalable data sharing. The degree of performance depends on the application and sharing platform. Several standards to fulfil the requirements have been proposed to address this key need of the IoT [6].

There are two key aspects in the IoT: the devices and the server side that supports them. In some applications there is a third category, the gateway that supports data aggregation, event processing, bridging. The gateway connects the device to the wider Internet. The connections are based on GPRS connectivity, battery discharging, radio interference, etc, for both types of connections. Typical representatives of devices are embedded controllers of lower and higher classes, such as Arduino, Arduino Yún, and Raspberry Pi.

Some of these devices integrate sensor, some include communication interfaces. The communication between devices, Internet or the gateway is usually carried out by different models (Fig. 2):

- Direct Ethernet or Wi-Fi connectivity, TCP or UDP
- Bluetooth
- Bluetooth Low Energy (BLE)
- Near Field Communication (NFC)
- Zigbee
- SRF and point-to-point radio links
- UART or serial lines
- SPI or I2C wired buses
- ESPNow etc. [7]

There are many protocols to regulate the communication. For example HTTP protocol is very important for many devices, and a simple controller can create request such as GET and POST to read or write data to other device.

Although the HTTP is supported by many devices and is well known protocol, it has some disadvantages such as the size of the overhead, big requirement on memory size and power requirements. In order to fulfil needs of IoT we need simpler, smaller communication protocols.

Other requirements for IoT devices are:

- The ability to disconnect a rogue or stolen device.
- The ability to update the software on a device.
- Updating security credentials.
- Remotely enabling or disabling certain hardware capabilities.
- Locating a lost device.
- Wiping secure data from a stolen device.
- Remotely configuring Wi-Fi, GPRS or network parameters [8].

**Testing of communication protocols.** For the testing of basic communication properties we used the MCU ESP 32 and ESP 8266 connected to sensors and LEDs.

The main goal was to find the most suitable easily configurable communication protocol for embedded devices of smart homes and consumer IoT applications. The detailed parameters of MCU are described in the next section.

**The ESP32 microcontroller.** It supports different applications of different complexity, from simple sensing with one MCU to sensor networks. The MCU integrates two microchips with different operation cycles from 80-240 MHz. The main board includes various peripherals such as: capacitive sensors, hall sensor, communication interfaces SDIO, SPI, UART, I2S, and I2C. Bluetooth, Bluetooth Low Energy and Wi-Fi are available to support wireless communication. Technical details of MCU are described in the Table 1 [9, 10].

Table 1

*Technical details of ESP8266 and ESP32*

Characteristics	ESP8266	ESP32
MCU	Xtensa Single-Core 32-bit L106	Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 600 DMIPS
Frequency	80 MHz	80-240 MHz
Wi-Fi	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n
Bluetooth	No	BL v4.2, BLE
SRAM	160 kB	512 kB
Flash	SPI Flash, up to 16 MB	SPI Flash, up to 16 MB
GPIO	17	36
HW/ SW PWM	No/8 channels	1/ 16 channels
SPI/I2C/I2S/UART	2/1/2/2	4/2/2/2
ADC	10 bit	12 bit
CAN	No	1
Ethernet Mac interface	No	1
Touch sensor	No	Yes
Temperature sensor	No	Yes

Programming of devices was conducted in Arduino IDE programming environment. The described MCUs created the base of experiments. With their communication interfaces they have many connectivity options. The EP32 was used as a basis for the MQTT Experiment.

The ESP8266 microcontroller has been used with the Wi-Fi, WebSocket, CoAP protocols. Both development boards are part of the monitoring system, where ESP8266 board is used with HTTP and ESP32 is programmed as a MQTT signaling device.

#### **Communication protocols.**

**CoAP - Constrained Application Protocol.** This is an alternative to HTTP. It is currently applied in various IoT solutions, where the client-server structure is preferred and not the broker as with MQTT. It uses a binary representation of data that is more efficient than HTML or XML format. The formatting protocol uses, among other things, message header compression, resource search, automatic configuration, and other additional features. It supports 4 types of messages: No Confirmation, With Confirmation, Reset, and Only Confirmation [10].

**MQTT** is a communication protocol for M2M (machine-machine) connection. It is designed as a "very light" communication protocol for sending messages between the publisher and the subscriber with the aim to minimize bandwidth and minimize equipment resource requirements, but with reliability and a certain amount of messaging (Fig.3). These goals have made MQTT an ideal case for internet and M2M protocols, and for mobile applications where bandwidth and battery capacity are limited.

The current implementations are in experimental workplaces that are focused on: location-based messaging, home automation, automation in a laboratory environment, as this protocol is still being developed, In addition to experimental solutions, deployment options are explored in everyday applications like Facebook Messenger, Amazon Web Services, and more [11, 12].

The MQTT protocol works on TCP / IP and provides lossless, two-way communication.

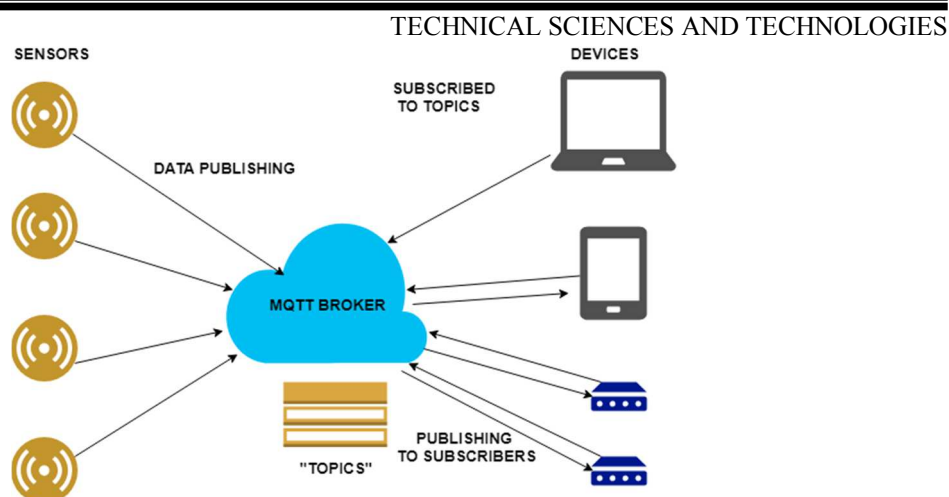


Fig. 3. MQTT communication principle

**WebSocket** is a protocol that allows communication between the client and the server (end-point) using the TCP protocol. The advantage of WebSocket communication is a full duplex connection, which allows simultaneous two-way communication over HTTP protocol. Header is smaller than HTTP. The communication cycle is as follows:

1. The client sends the handshake request to the server.

2. The server responds to the request with the next HTTP header, the last in this communication, if the request is received, the server sends an HTTP client message that switches to WebSocket protocol.

3. From now on, communication between the client and the server is open, and they can exchange an unlimited number of messages until the end of the connection [13].

**Experiments.** The experiments were focused on creating functioning wireless connection with the MCU. Each experiment use a different protocol described in the previous section with aim to find a most suitable, sustainable one for embedded devices in industrial field and home automation systems.

**Protocol CoAP.** One of the newest protocol for IoT is CoAP- Constrained Application Protocol. CoAP is similar to HTTP (Fig. 4). To test this protocol the ESP8266 board was used with combination of a web tool Copper. This protocol uses methods PUT, GET, POST, and DELETE to exchange data.

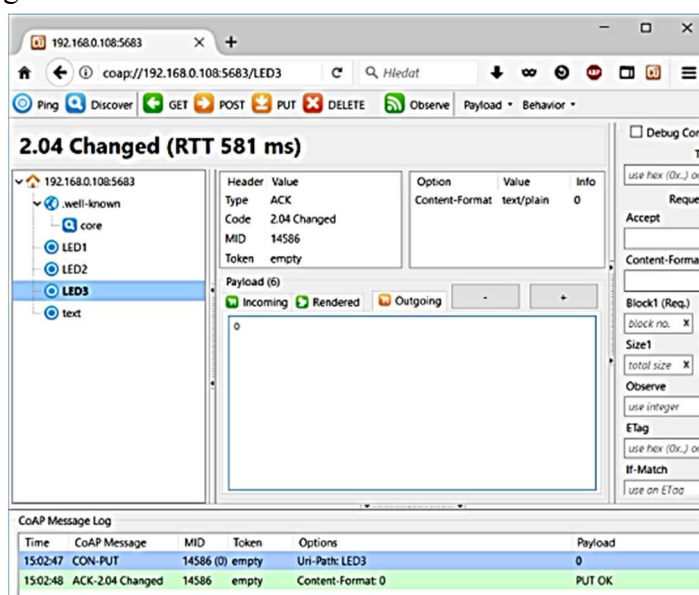


Fig. 4. Preview of Copper interface during CoAP communication

The communication addressing is based on IP addresses of devices. If the control algorithm process the received data and the callback function includes relevant messages the MCU execute the received orders. In our case acknowledge message and LED light were executed.

The experiment with this protocol showed that “constrained communication” or smaller messages with binary format are suitable for MCU and embedded devices. This protocol is currently under development and not all platforms are supported, which is currently a big disadvantage. The latency during the test was up to 800 ms, which is sufficient for non-time critical applications.

**Protocol WebSocket.** To test this protocol the combination of ESP8266 and RGB LED was used. ESP board creates webserver, an internal web page with 3 sliders to control the colors of LED. Individual sliders represent values for each color of RGB, carried as 3 hexadecimal numbers. This type of communication is suitable for wireless controllers of remotely controlled devices.

Through this continuous connection we are able to control the color of RGB without waiting or interrupting the connection. Preview of control program and received messages are shown on the Figure 5.

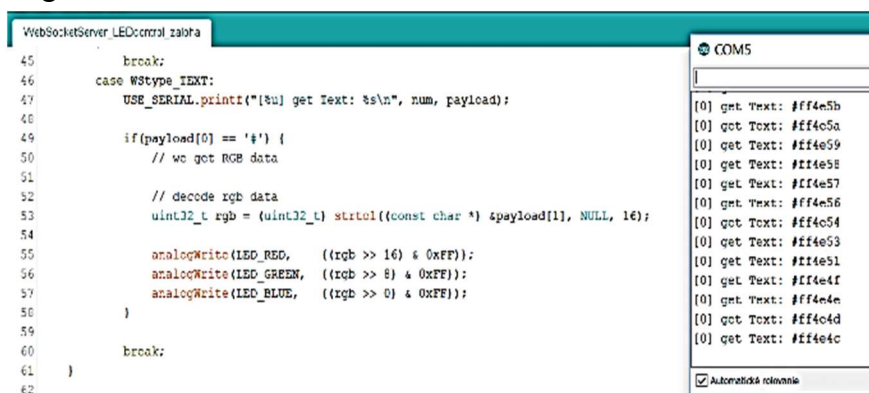


Fig. 5. Preview of WebSocket communication

It is a two-way (full-duplex) communication; the RGB color is continuously controlled with the sliders. This protocol is not supported by the majority of current platforms. A preview of running WebSocket connection is shown on the Figure 6.

**HTTP and MQTT protocols.** The last test included a combination of both ESP boards and sensors. The created system collects data from its environment with photo-resistors, temperature sensors, humidity sensors and accelerometers. Monitoring of the environment was carried out every 15 minutes. The collected data are then transferred to cloud to store and visualize data. Logical structure of the system is shown on the Figure 7.

Preview of the monitoring system with HTTP and MQTT communication is shown below (Fig.8). The collected data are visualized in graphs, tables and numeric widgets.

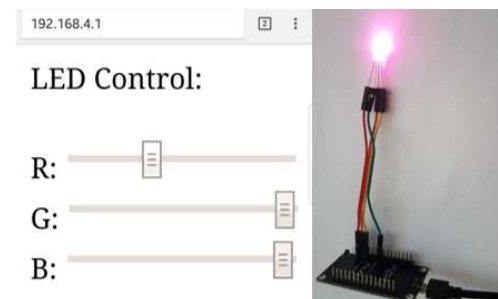


Fig. 6. Preview of Webserver and controlled RGB LED

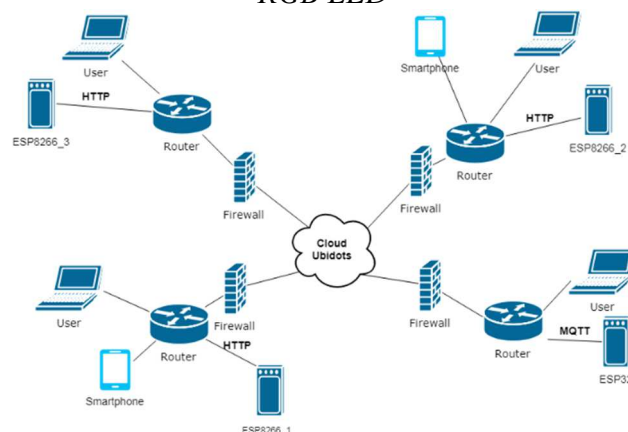


Fig. 7. Logical structure of monitoring system

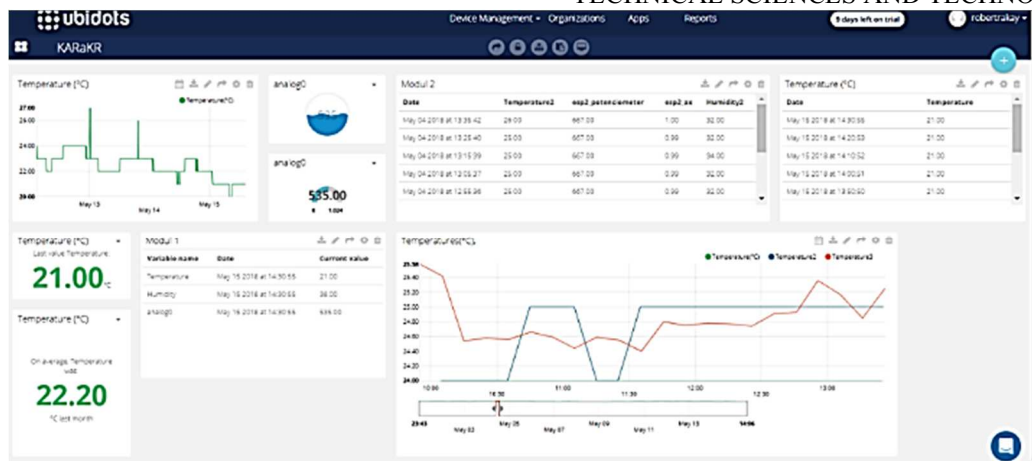


Fig. 8. Preview of monitoring systems interface

The Ubidots cloud provides MQTT broker to control the communication, which exchange messages between the publisher and the subscriber with the relevant topics. Messages represent the last value of variable, to which is subscribed at least one subscriber. Publisher send data with method PUBLISH, and adds values to TOPIC, basically the name of a variable or information of a sensor. The Figure 9 shows the received messages in the EPS board. Messages control a connected outputs, in this case LEDs on/off states.

```

COM3
-----
Message arrived in topic: /v1.6/devices/esp32/relay2/lv
Message:0
relay 2 == 0

-----
Message arrived in topic: /v1.6/devices/esp32/relay1/lv
Message:1
relay 1 == 1
    
```

Fig. 9. Preview of messages from the monitoring system

These tests showed that with an integrated MQTT broker, it is well prepared for integration in to IoT systems of nowadays. For more advanced devices like Raspberry Pi, which have advanced technical features, it is easy to use HTTP protocol but for embedded devices with limited computing capacity MQTT is more suitable.

Finally, a comparison of the tested communication protocol is shown in the Table 2.

Table 2

Comparison of tested communication protocol

	HTTP	MQTT	CoAP	WebSocket
<b>Transfer</b>	TCP	TCP	UDP	TCP
<b>Mechanism</b>	Request/Response	Publish/Subscribe	Request/Response	Publish/Subscribe
<b>Designation</b>	Smart Energy, home automation	Remote access	Local networks and communication	Smart Energy, home automation
<b>Quality</b>		QoS 0-1-2	With acknowledgement/ Without	
<b>Architecture</b>	Client/ Server	Publisher/Subscriber	Publisher/Subscriber with restrictions	WebSocket Server/Client
<b>Message size</b>	big	small	small	„infinite“
<b>Format</b>	ASCII	Binary	Binary	
<b>Data distribution</b>	1 to 1	1 to 0/1/N	1 to 1	1 to 1
<b>Security</b>	No, HTTPS for safe comm.	SSL/TLS	Less safe as HTTP (UDP)	SSL/TLS



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

It summarizes the main characteristics of protocols. Even all protocols are different in some meaning, they are suitable to be used in the IoT area.

**Conclusion.** In this paper, a comparison of selected IoT communication protocols is described. The communication protocol CoAP is unique in the size of the transferred messages but has its limitations in the currently supported platforms. CoAP will find its enforcement in the embedded devices of future automation system in commercial applications. The alternative protocol WebSocket creates a two-way continuous connection within its special solution. Currently there is no exact field for this protocol, but in systems with continuous control there are many applications which could be controlled with this type of communication. In the last experiment, we tested HTTP and MQTT protocols. The HTTP protocol burdens the hardware and for this reason it's not suitable for embedded devices of IoT. The MQTT with publish/subscribe and Broker/topic system offers a very suitable communication form for IoT systems. For its latency (time delay) this protocol is currently intended for solutions where time is not critical.

Finally the carried out experiments showed that for integrating MCU to home automation system the most suitable protocol is the MQTT. With its message size and transfer rate provides enough to transfer information like temperature, pressure, presence or other information.

**Acknowledgement.** This work has been supported by the Slovak Grant VEGA 1/0330/19 - Research and design of algorithms and systems for the fusion of heterogeneous data in multi-sensor architectures and by H2020: Manufacturing Industry Digital Innovation Hubs (MIDIH), reference no. 767498.

### References

1. Ray, P. P. (2018). A survey on Internet of Things architectures, *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, Volume 30, Issue 3, pp. 291-319, [online]. ISSN: 1319-1578. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157816300799?via%3Dihub>.
2. Miao Wu ; Ting-Jie Lu ; Fei-Yang Ling ; Jing Sun ; Hui-Ying Du (2010). Research on the architecture of Internet of Things, 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering(ICACTE), Chengdu, 2010, pp. V5-484-V5-487. [online] ISBN: 978-1-4244-6542-2. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5579493>.
3. Bednar, S., Modrak, V. (2014). Mass customization and its impact on assembly process' complexity, *International Journal for Quality Research*, 8(3), pp. 417-430. 20.[online] ISSN 1800-6450 Available from: <http://www.ijqr.net/journal/v8-n3/10.pdf>.
4. Carruthers, K. (2016). Internet of things and beyond: cyber-physical systems, [online]. Available from: <https://katecarruthers.com/2016/04/internet-of-things-and-beyond-cyber-physical-systems/>.
5. Šimšík, d., Galajdová, A., Šeminský, J., Rákay, R., Višňovský, M. (2016). Inovácia študijného programu automatizácia a riadenie strojov a procesov v reakcii na požiadavky priemyselnej praxe [Innovation of the study programme of automation and the machine and systems control regarding the demands of industrial practice]. ARaP. Prague: MM publishing, pp. 79-82. ISBN 978-80-906310-1-4.
6. Anawar, M. R. et al. (2018). Fog Computing: An Overview of Big IoT Data Analytics, *Wireless Communications and Mobile Computing*, Volume 2018, Article ID 7157192, Available from: <https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2018/7157192/>.
7. SUMEDHA, R. Communication without and with gateway. Available from: <https://www.slideshare.net/wso2.org/wso2con-eu-2017-building-smart-connected-products-with-wso2-iot-platform/>.
8. Ray, P. P. (2016). A survey of IoT cloud platforms, *Future Computing and Informatics Journal*, Volume 1, Issues 1–2, pp. 35-46, [online]. ISSN: 2314-7288. Available from: [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2314728816300149/](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2314728816300149/).
9. ESP8266. Datasheet (2019). [online], Available from: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf).
10. ESP32 Datasheet [online], Available from: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp\\_wroom\\_32\\_datasheet\\_en.pdf/](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp_wroom_32_datasheet_en.pdf/).
11. Shelby, Z., Hartke, K., Bormann, C. (2-14). The Constrained Application Protocol (CoAP) 6/2014[online]. ISSN: 2070-1721 Available from: <https://tools.ietf.org/html/rfc7252/>.

12. MQTT v3.1.1 (2015). OASIS Standard [online]. Available from: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/mqtt-v3.1.1.html>.

13. Srinivasan, I., Scharnagl, J., Schilling, K. (2013). Analysis of WebSockets as the New Age Protocol for Remote Robot Tele-operation, IFAC Proceedings, Volumes, Volume 46, Issue 29, pp. 83-88, [online]. ISBN 9783902823564, Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015343688>.

УДК 681.5:004.77

Роберт Ракай, Алена Галайдова

## ПОРІВНЯННЯ ПРОТОКОЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ SMART ПРИСТРОЇВ

**Актуальність теми дослідження.** Сучасні тенденції автоматизації зосереджені на впровадженні нових протоколів зв'язку, бездротовій передачі даних та зменшенні витрат. Комунікаційна частина кожної системи автоматизації є вирішальною, будь то в домашніх умовах чи в промисловості.

**Постановка проблеми.** Під час проектування автоматизованих систем та під'єднання різних пристроїв розробникам доводиться задовольняти різні вимоги, такі, як адресація, швидкість передачі даних, безпека даних тощо. Найновіші протоколи зв'язку та технології передачі даних забезпечують значне скорочення як швидкості передачі даних, так і завантаження мікроконтролера (MCU).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Під час підготовки даної роботи була проаналізована різноманітна документація у вільному доступі та експериментальні рішення, а також зроблені висновки з наших попередніх та інших проведених експериментів для створення бази знань за темою дослідження.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Існує багато різних комунікаційних рішень, і кожен виробник пристрою зв'язку пропонує найкраще рішення. Не всі вони можуть бути описані в цій статті.

**Постановка завдання.** У даній статті проаналізовані різні комунікаційні технології для подальшої реалізації у smart-пристрої для домашньої автоматизації.

**Виклад основного матеріалу.** Щоб запропонувати майбутню модель системи домашньої автоматизації, необхідно впровадити новітні комунікаційні технології. Використання останніх протоколів зв'язку, таких як MQTT, CoAP або WebSocket, дає хорошу основу для вирішення цієї проблеми.

**Висновки відповідно до статті.** Ця стаття пропонує можливості комунікації для розумних пристроїв системи домашньої автоматизації. Порівняні протоколи зв'язку мають різні переваги та недоліки. Перевірені протоколи відповідають вимогам зв'язку для пристроїв домашньої автоматизації.

**Ключові слова:** протоколи зв'язку; смарт-пристрої; домашня автоматизація.

Рис.: 9. Табл.: 2. Бібл.: 13.

**Róbert Rákay** – Assistant Professor, Ph.D. of technical sciences, Technical University of Kosice (Letná 9, 04200, Košice, Slovak Republic).

**Роберт Ракай** – кандидат технічних наук, Технічний університет Кошице (Letná 9, 04200, Košice, Slovak Republic).

**E-mail:** robert.rakay@tuke.sk

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7151-3749>

**Scopus Author ID:** 56922070700

**Alena Galajdová** – Head of the Department, associate professor, Ph.D. of technical sciences, Technical University of Kosice (Letná 9, 04200, Košice, Slovak Republic).

**Алена Галайдова** – кандидат технічних наук, Технічний університет Кошице (Letná 9, 04200, Košice, Slovak Republic).

**E-mail:** alena.galajdova@tuke.sk

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0128-4191>

**Scopus Author ID:** 6506796741

*Darina Hroncová***BOND GRAPH METHODOLOGY IN THE RLC CIRCUIT ANALYSIS**

**Urgency of the research.** The bond graphs theory aim for to formulate general class physical systems over power interactions. The factors of power are effort and flow. They have different interpretations in different physical domains. Yet, power can always be used as a generalized resource to model coupled systems residing in several energy domains.

**Target setting.** Formalism of power graphs enables to describe different physical systems and their interactions in a uniform, algorithmizable way and transform them into state space description. This is useful when analyzing mechatronic systems transforming various forms of energy (electrical, fluid, mechanical) by means of information signals to the resulting mechanical energy.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Over the past two decades the theory of Bond Graphs has been paying attention to universities around the world, and bond graphs have been part of study programs at an ever-increasing number of universities. In the last decade, their industrial use is becoming increasingly important. The Bond Graphs method was introduced by Henry M. Paynter (1923-2002), a professor at MIT & UT Austin, who started publishing his works since 1959 and gradually worked out the terminology and formalism known today as Bond Graphs translated as binding graphs or performance graphs.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** The electrical system model is solved with the help of the above mentioned bond graphs formalism. Gradually, the theory of power graphs in the above example is explained up to the construction of state equations of the electrical system. The state equations are then solved in Matlab / Simulink.

**The statement of basic materials.** Using bond graphs theory to simulate electrical system and verify its suitability for simulating electrical models. In various versions of the parameters of model we can monitor its behavior under different operating conditions. The language of bond graphs aspires to express general class physical systems through power interactions. The factors of power i.e., effort and flow, have different interpretations in different physical domains. Yet, power can always be used as a generalized coordinate to model coupled systems residing in several energy domains.

**Conclusions.** We introduced a method of systematically constructing a bond graph of an electrical system model using Bond graphs. A practical example of an electrical model is given as an application of this methodology. Causal analysis also provides information about the correctness of the model. Differential equations describing the dynamics of the system in terms of system states were derived from a simple electrical system coupling graph. The results correspond to the equations obtained by the classical manual method, where first the equations for individual components are created and then a simulation scheme is derived based on them. The presented methodology uses the reverse procedure. However, manually deriving equations for more complex systems is not so simple. Bond charts prove to be a suitable means of analysis, among other systems and electrical systems.

**Keywords:** mechatronics; energy modeling; Bond Graphs; modeling of dynamic system; source of an effort; source of an flow; capacitor; inductor; resistor.

Fig.: 4. References: 18.

**Introduction.** The aim of this paper is the interest of the use of bond graphs as modeling tool. Bond graph is an explicit graphical tool for capturing the common energy structure of systems. The work shows the use of Bond Graph formalism for modeling dynamic systems. In contrast with the classical method, where the equations for individual components are created first and then the simulation scheme is derived on their basis, the described method uses the reverse procedure. As an example an electrical RLC circuit system is solved by this approach at the level of its physical behavior. In this paper the method of generation of system equations is discussed. From a bond graph diagram of the system, using a step-by-step procedure, system equations may be generated. The differential equations describing the dynamics of the system are obtained in terms of the states of the system.

The concept of bond graphs was originated by Paynter (1961). The idea was further developed by Karnopp and Rosenberg in their textbooks (1968, 1975, 1983, 1990), such that it could be used in practice (Thoma, 1975; Van Dixhoorn, 1982). By means of the formulation by Breedveld (1984, 1985) of a framework based on thermodynamics, bond-graph model description evolved to a systems theory. The language of bond graphs aspires to express general class physical systems through power interactions. The factors of power i.e., effort and flow, have different interpretations in different physical domains. Yet, power can always be used as a generalized co-ordinate to model coupled systems residing in several energy domains [1-4].

**Bond graphs theory.** A subsystem is represented by a closed line with a name. This line represents the frontiers of the subsystem. For each energy interchange of the system with its environment we associate to it an energetic port of a defined type (mechanical energy, electrical energy, etc.). A unidirectional semi headed arrow shows the energy interchange through this port and carries the data relative to the power transported (e: effort and f: flow). These two

variables are necessary and sufficient to describe the energetic transfers inside the system. They correspond to a couple of variables in each energetic domain. The elementary components/subsystems are classified by their energetic behaviour (energy dissipation, energy storage, etc.), by their function inside the system (flows sensor, etc.).

**Bond Graph Standard Elements.** In bond graphs, one needs to recognize only four groups of basic symbols, i.e., three basic one port passive elements, two basic active elements, two basic two port elements and two basic junctions. The basic variables are effort ( $e$ ), flow ( $f$ ), time integral of effort ( $h$ ) and time integral of flow ( $q$ ). Examples of mechanical and electrical systems in bond graphs methodology are shown in Fig. 1.

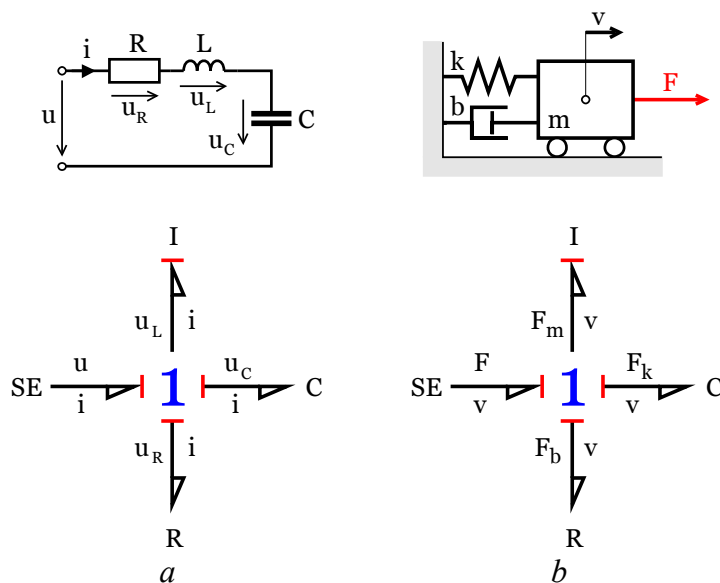


Fig. 1. Physical system:

a – electrical system RLC circuit; b – mechanical system mass-spring-damper

Source: [6; 7].

**Effort and flow sources.** The active ports are those, which give reaction to the source. For, example if we step on a rigid body, our feet reacts with a force or source. For this reason, sources are called active ports. Force is considered as an effort source and the surface of a rigid body gives a velocity source. They are represented as a half arrow pointing away from the source symbol. In electrical domain, an ideal shell would be represented as an effort source. Similarities can be drawn for source representations in other domains [5-7].

**Description of the model.** To demonstrate the bond graph methodology as an example an electrical model of RLC system is analyzed Fig. 2. An RLC circuit (or LCR circuit) is an electrical circuit consisting of a resistor, an inductor, and a capacitor. The RLC part of the name is due to those letters being the usual electrical symbols for resistance, inductance and capacitance respectively [8-12].

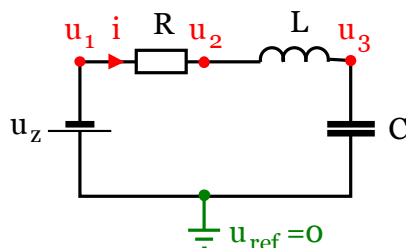


Fig. 2. Electrical system RLC circuit with reference voltage  $u_{ref}$ , voltages  $u_1, u_2, u_3$  of the element ports

Source: [6; 7].

**Systematic procedure to derive a bond graph.** We have discussed the basic bond-graph elements and the bond, so we can transform a domain-dependent ideal-physical model, written in domain-dependent symbols, into a bond graph. For this transformation, there is a systematic procedure, which is presented here [6, 7, 12]. First we determine which physical domains exist in the system and identify all basic elements like C (capacitor), I (inductor), R (resistor), SE (source of the effort), SF (source of the flow), TF (transformer) and GY (gyrator). This system contains an electrical domain part with the inductance L of the inductor (I:L), the resistance R of the resistor (R:R) and a capacity of the condenser C (C:C). Voltage  $u_z$  is considered as an effort source (SE:  $u_z$ ). Indicate in the ideal-physical model per domain a reference source – effort voltage  $u_{ref}$  (reference voltage with positive direction), Fig. 2. The references are indicated in the ideal physical model: the ideal velocity  $u_{ref} = 0$ . Identify all other efforts (voltages) and give them unique names  $u_1, u_2, u_3$ , Fig. 2. Draw these efforts (electrical: voltages), graphically by 0-junctions in Fig. 3.

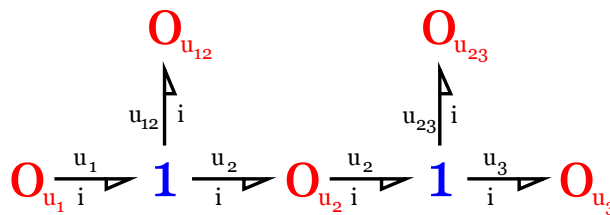


Fig. 3. Voltages as 0-junctions and connecting 0-junctions with 1-junctions

Source: [6; 7].

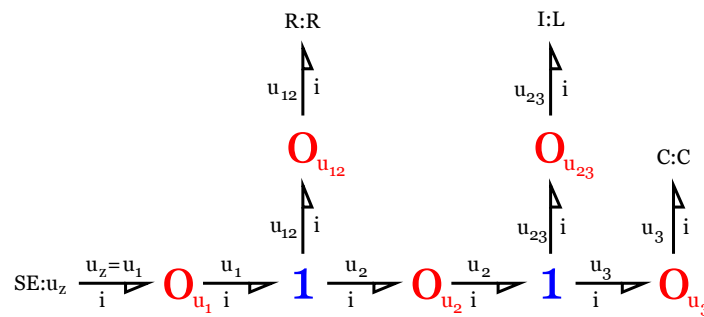


Fig. 4. Connecting elements R, I, C, SE with 0-junctions

Source: [6; 7].

Identify all effort differences (electrical: voltage = effort) needed to connect the ports of all elements enumerated in Fig. 3 to the junction structure. When checking all ports of the elements found the linear voltage differences,  $u_{12}$  and  $u_{23}$  are identified. Construct the voltages differences using a 1-junction and draw them as such in the graph Fig. 3. The junction structure is now ready and the elements can be connected. Connect the port of all elements found at step 1 with the 1-junction of the corresponding efforts or efforts differences Fig. 4. Simplify the resulting graph by applying the simplification rules in Fig. 5 and Fig. 6 [7].

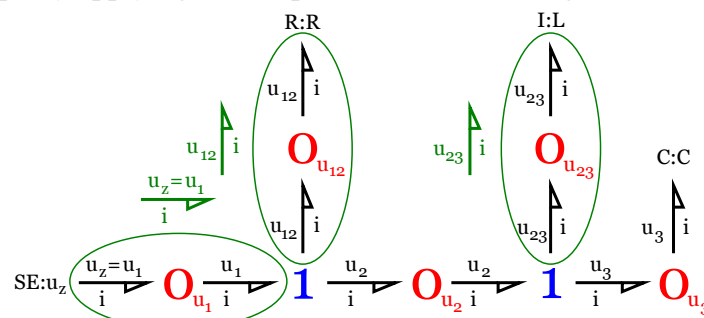


Fig. 5. Simplify the resulting graph by applying the simplification rules

Source: [6; 7].

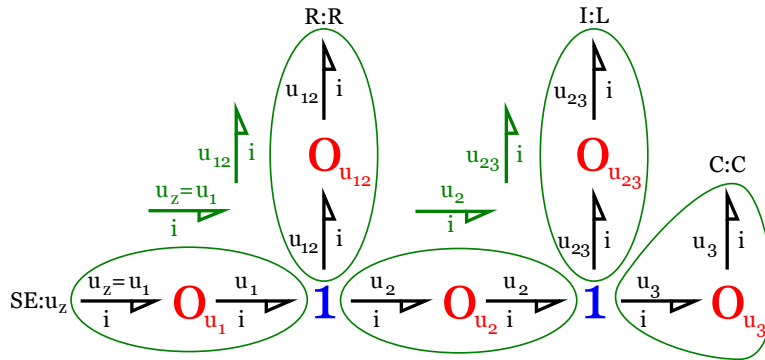


Fig. 6. Simplify the resulting graph by applying the simplification rules, the 0-junctions with voltages  $u_2$  and  $u_3$

Source: [6; 7].

A junction between two bonds can be left out, if the bonds have a through power direction (one bond incoming, the other outgoing). A bond between two the same junctions can be left out and the junctions can join into one junction. Two separately constructed identical effort or flow differences can join into one effort or flow difference. Determine the signal direction and causality in Fig. 7. Causality establishes the cause and effect relationships between the factors of power.

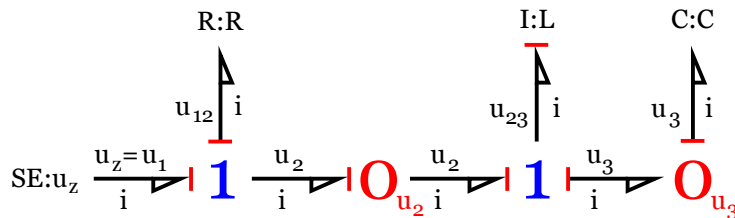


Fig. 7. Determine the causality

Source: [6; 7].

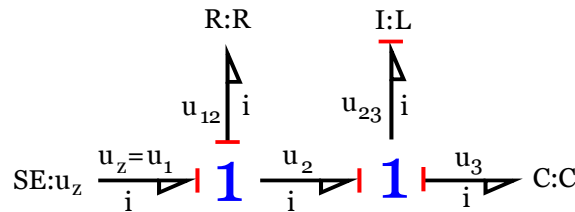


Fig. 8. Simplify the resulting graph, the 0-junctions reduction and causality

Source: [6; 7].

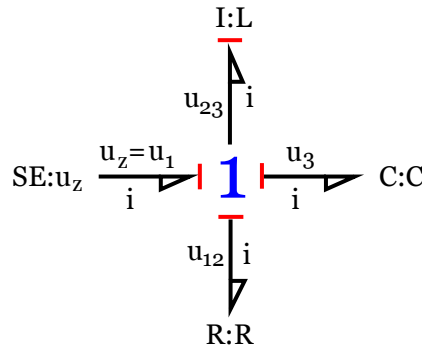


Fig. 9. The final bond graph with signal direction and causality

Source: [6; 7].

In bond graphs, the inputs and the outputs are characterized by the causal stroke. The causal stroke indicates the direction in which the effort signal is directed (by implication, the

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

end of the bond that does not have a causal stroke is the end towards which the flow signal is directed). There are two ways of describing an element's behavior (e.g. effort in, flow out vs. flow in, effort out) as different causal forms. Note that the two alternative causal forms may, in general, require quite different mathematical operations. The causal form we use, i.e. which variable we select as input and which we select as output, can make a lot of difference. For example, the required mathematical operations may be well defined in one causal form, but not defined at all in the other. The causal bond graph of this system can be derived, in which the inputs and the outputs are characterized by the causal stroke. This is the starting point, from which we continue toward the differential equations describing the dynamics of the system. A causal bond graph (Fig. 9) can be expanded into a block diagram (Fig. 10).

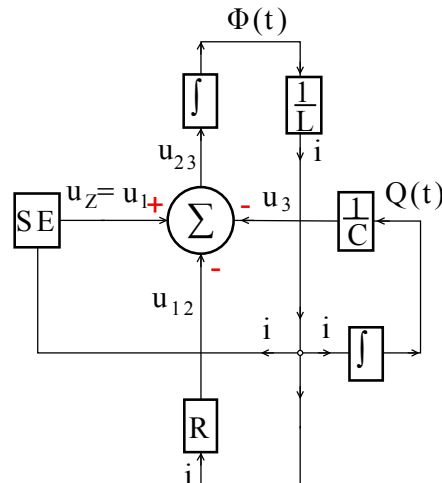


Fig. 10. Bond graph expanded to a block diagram with source effort voltage  $u_z$   
Source: [6; 7].

The equations derived from a bond diagram (Fig. 10) are:

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = u_{23} \tag{1}$$

$$\frac{dQ(t)}{dt} = i \tag{2}$$

$$u_{23} = -u_3 - u_{12} + u_z \tag{3}$$

where state variables  $\Phi(t)$  and  $Q(t)$  are magnetic flux and electric charge respectively and next equations:

$$u_3 = \frac{1}{C} \cdot Q(t) \tag{4}$$

$$u_{12} = R \cdot i \tag{5}$$

$$i = \frac{1}{L} \cdot \Phi(t) \tag{6}$$

State equation in matrix form are:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Phi(t)}{dt} \\ \frac{dQ(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R \cdot \frac{1}{L} & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi(t) \\ Q(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_z \tag{7}$$

After substitution:

$$\begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{du_3}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ u_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_Z \quad (8)$$

The state equation can be solved in Matlab/Simulink [13-18].

**Conclusions.** The differential equations describing the dynamics of the system in terms of the states of the system were derived from a bond graph diagram of a RLC circuit of electrical system. Model of a simple electrical RLC circuit consisting of a resistor, an inductor, and a capacitor is taken. The results correspond with equations obtained using traditional method, where the equations for individual components are created first and then the simulation scheme is derived on their basis, although the described method uses the reverse procedure. However, manual derivation of equations for larger systems is not all that simple. For instance, in some cases the derivation may lead to formation of so called algebraic loops. Similarly, complexities and errors of various types, like causal loops, power loops and differential causalities may exist in the model of a system.

**Acknowledgement.** This work was supported in part by the Ministry of Education of the Slovakia Foundation under grant projects KEGA No. 049TUKE-4/2017, grant projects VEGA No. 1/0389/18 and grant projects KEGA No. 018TUKE-4/2018.

### References

1. Breedveld, P., C., Rosenberg, R., C., Zhou, T. (1991). Bibliography of Bond Graph Theory and Application, Journal of the Franklin Institute, 328(5/6), p.1067-1109.
2. Breedveld, P., C. (2008). Modeling and Simulation of Dynamic Systems Using Bond Graphs, [https://www.researchgate.net/publication/255027172\\_Modeling\\_and\\_Simulation\\_of\\_Dynamic\\_Systems\\_using\\_Bond\\_Graphs](https://www.researchgate.net/publication/255027172_Modeling_and_Simulation_of_Dynamic_Systems_using_Bond_Graphs).
3. Broenink, J., F. Introduction to Physical Systems Modelling with Bond Graphs, <https://pdfs.semanticscholar.org/edbe/4223c787adebd6e4674317a197312ecf87d.pdf>.
4. Karnopp, D., C., Margolis, D., L., Rosenberg, R., C. (2005). Modelling and simulation of mechatronic systems. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
5. Horáček, P. (1999). *Systems and models*, Nakladatelství ČVUT, Praha, Česko.
6. Gmíterko, A., Šarga, P., Hroncová, D. (2012). Mechatronika I, Technická univerzita Košice, Košice, Slovakia.
7. Hroncová, D. (2012). Studies of compatible software tools for abstract and concrete design of mechatronic systems and linking them for the purpose of logical and physical modeling, Dissertation thesis, Košice, Slovakia.
8. Drahoš, P., Kutiš, V., Dúbravský, J., Sedlár, T. (2011). Design and Simulation of SMA Actuator, International Review of Automatic Control, vol. 4, no. 4 (2011), p. 588-593.
9. Hanzel, J., Jurišica, L., Klúčik, M., Duchoň, F. (2011). Identification of the Experimental Ultrasonic System Parameters, in "AD ALTA" Journal of Interdisciplinary Research, Vol. 1, Iss. 2, p. 138-141.
10. Hanzel, J., Klúčik, M., Jurišica, L., Vitko, A. (2011). Identification Based Model of Ultrasonic Sensor, in "Research and Education in Robotics - EUROBOT 2011", Prague, Czech Republic, Heidelberg, Springer, p. 144-157.
11. Karban, P. (2006). Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink. Computer Press, Brno, Česko.
12. Gmíterko, A., (2004). *Mechatronics*, Emilenia, Košice, Slovakia.
13. Vittek, J. (1997). *Matlab pre elektrické pohony*, Nakladateľstvo Žilinskej univerzity, Žilina, Slovensko, p. 35-36.
14. Pásztó, P., Hubinský, P. (2010). "Application of a Visual System for a Mobile Robot Navigation (OpenCV)," in Process Control 2010," 9th International Conference. University of Pardubice, Kouty nad Desnou, Česko, paper C015a.



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

15. Delyová, I., Frankovský, P., Hroncová, D. (2011). Kinematics analysis of movement of a point of a simple mechanism, In: Modelling of mechanical and mechatronic systems 2011, *The 4th International conference*, TU Košice, Herľany, Slovakia.

16. Segřa, ř., Segřa, J. (2011). Modelling and Optimization of Vehicle suspension with Magnetorheological Dampers, *7th International Conference Dynamics of Rigid and Deformable Bodies 2008*, FVTM UJEP Ústí nad Labem, řesko.

17. Skořilas, J., Skořilasová, B., Soukup, J. (2011). Investigation and vibration of vehicle mechanical model. In: *Dynamika tuhých a deformovatelných těles 2011 - Sborník přednášek z 9. mezinárodní konference v Ústí nad Labem*, FVTM UJEP, Ústí nad Labem, řesko.

18. Svoboda, M., Soukup, J. (2011). Analytical solutions of motion equations of railway car, determination of basic geometric, mass and stiffness parameters. *Dynamika tuhých a deformovatelných těles 2011 - Sborník přednášek z 9. mezinárodní konference*. FVTM UJEP, Ústí nad Labem, řesko.

УДК 681.5:004.77

Дарина Гронцова

### МЕТОДОЛОГІЯ ПОВ'ЯЗАНИХ ГРАФІВ У ЛАНЦЮГОВОМУ АНАЛІЗІ «RLC»

**Актуальність теми дослідження.** Теорія зв'язних графів спрямована на вираження фізичних систем загального класу через енергетичні взаємодії. Факторами потужності є зусилля і потік. Вони мають різні тлумачення в різних фізичних областях. Тим не менш, потужність завжди може використовуватися як узагальнений ресурс для моделювання зв'язних систем, що знаходяться в декількох енергетичних областях.

**Постановка проблеми.** Формалізм силових графів дозволяє описати різні фізичні системи та їх взаємодії однаковим, алгоритмізованим способом та перетворити їх у опис простору станів. Це корисно для аналізу мехатронних систем, що перетворюють різні форми енергії (електричну, текучу, механічну) за допомогою інформаційних сигналів у механічну енергію, що отримується.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Протягом двох останніх десятиліть теорії графів приділялася увага університетів із усього світу, а зв'язні графи були частиною навчальних програм у все більшій кількості університетів. В останнє десятиліття їх промислове використання набуває все більшого значення. Метод Бондграфів був введений Генрі М. Пейнтером (1923-2002), професором MIT & UT Austin, який почав публікувати свої роботи з 1959 року і поступово напрацьовував термінологію та формальні методи, відомі сьогодні як зв'язні графи, що перекладаються як сполучені графи або графи ефективності.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Модель електричної системи формується за допомогою вищезазначених формальних методів зв'язних графів. Поступово теорія силових графів у наведеному вище прикладі пояснюється аж до побудови рівнянь стану електричної системи. Потім рівняння стану розв'язуються за допомогою Matlab / Simulink.

**Виклад основного матеріалу.** Використання теорії зв'язних графів для моделювання електричної системи та перевірки її придатності для імітаційного моделювання електричних моделей. У різних варіаціях параметрів моделі ми можемо відстежувати її поведінку за різних умов експлуатації. Мова зв'язних графів прагне виразити фізичні системи загального класу через силові взаємодії. Фактори сили, тобто зусилля і потоку, мають різні інтерпретації в різних фізичних областях. Однак потужність завжди можна використовувати як узагальнену координату для моделювання зв'язних систем, що знаходяться в декількох енергетичних областях.

**Висновки відповідно до статті.** Ми представили метод систематичної побудови графу зв'язків моделі електричної системи за допомогою Бондграфів. Практичний приклад електричної моделі наведено як приклад застосування цієї методології. Причинний аналіз також надає інформацію про правильність моделі. Диференціальні рівняння, що описують динаміку системи у термінах станів системи, були отримані із простого зв'язного графа електричної системи. Результати відповідають рівнянням, отриманим класичним ручним методом, де спочатку створюються рівняння для окремих компонентів, а потім на їх основі складається схема імітаційного моделювання. Запропонована методологія використовує зворотну процедуру. Однак вивести рівняння для більш складних систем вручну не так просто. Зв'язні графи виявляються придатним засобом для такого аналізу, серед електричних або інших систем.

**Ключові слова:** мехатроніка; енергетичне моделювання; Бондграфи; моделювання динамічної системи; джерело зусиль; джерело потоку; конденсатор; індуктор; резистор.

Рис.: 4. Бібл.: 18.

**Hroncová Darina** – assistant professor, Ph.D. of technical sciences, Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**Гронцова Дарина** – кандидат технічних наук, факультет механічної інженерії, Технічний університет Кошице (Letna 9, 042 00 Košice, Slovak Republic).

**E-mail:** darina.hroncova@tuke.sk

**SCOPUS Author ID:** 55988359500

UDC 681.2

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-162-167

*Lubica Miková***DESIGN AND STRESS ANALYSIS OF WHEEL MOBILE ROBOT**

**Urgency of the research.** In the context of design of new, improved devices or technical systems containing electronic elements, we are increasingly encountering the concepts like mechatronics, mechatronic systems, mechatronics system solving approach or just simply mechatronics. The impact of mechatronics is most noticeable in mobile mechatronic products, especially in the automotive industry, where mechatronic systems are increasingly being used.

**Target setting.** The design a wheeled chassis with improved ability to cross rugged terrain. Its individual parts are subject of simualtions and stress ananlysis, which confirmed the advantage of the chosen design and mobility of the chassis.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Designing a robot for a specific purpose always involves several steps. Before considering the design of a robot, it is necessary to determine the environment in which it should operate. The problem of four or more wheeled chassis arises when the wheels are unsprung and the unevenness of the terrain surface causes loss of wheel contact with the terrain surface and thus loss of traction.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** The question of the physical design of a mobile robot is uninvestigated, because it will be solved in future.

**The research objective.** The main aim was design and stress analysis of individual parts of the mobile wheeled robot with improved ability to pass through rugged terrain.

**The statement of basic materials.** The chassis is based on five modules which are connected between each other. Its steering ability against each other is determined by the upper connection cover. Two modules integrated between wheels are for storage, which can be used for battery sources or auxiliary control.

**Conclusions.** All construction parts of this mobile robot were designed in Solidworks software, taking into account the simplicity of the structure and its ease of manufacture. The mobile chassis was tested in various terains simulations, where all his movements and terrain adaptation were monitored. The mobile chassis structure was recalculated from the point of view of the mechanics theory.

**Keywords:** wheeled mobile robot; simulation model.

Fig.: 10. Table: 1. References: 11.

**Introduction.** Designing a robot for a specific purpose always involves several steps. Before considering the design of a robot, it is necessary to determine the environment in which it should operate, be it the type of surface or the obstacles it may encounter when moving in that environment. Four or more wheeled chassis with differential steering are simple at first sight, but the problem arises when the wheels are unsprung and the unevenness of the terrain surface causes loss of wheel contact with the terrain surface and thus loss of traction. This problem is not the case with two- and three-wheel chassis, which are naturally stable even in rugged terrain in terms of keeping the wheels in contact with the terrain. It is important to use a system to keep the wheels on the terrain surface so that locomotion can be realized [1-9]. The aim of this article is to design a wheeled chassis with improved ability to cross rugged terrain. Its individual parts are subject of simualtions and stress ananlysis, which confirmed the advantage of the chosen design and mobility of the chassis.

**Mobile wheeled robot with increased ability to cross a rugged terrain.** The chassis is based on five modules which are connected between each other. Its steering ability against each other is determined by the upper connection cover. Two modules integrated between wheels are for storage, which can be used for battery sources or auxiliary control. These modules are also used as a strut, formed by spacers for already mentioned upper connection cover, on which the control unit and possible superstructure can by mounted. The design of individual modules and system of tilting bushings of motors connected to the wheels, was the main issue, when designing the construction of mobile robot.

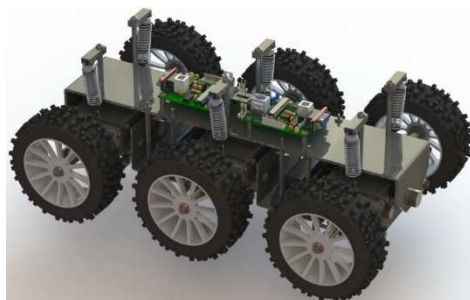
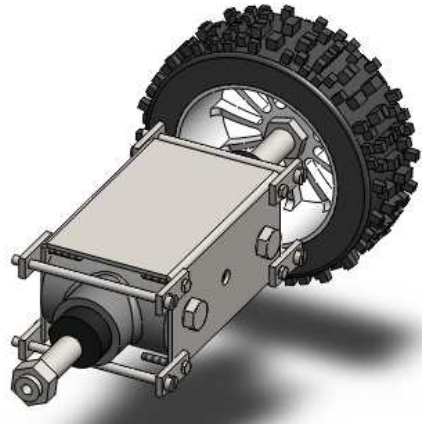


Fig. 1. Model of mobile robot

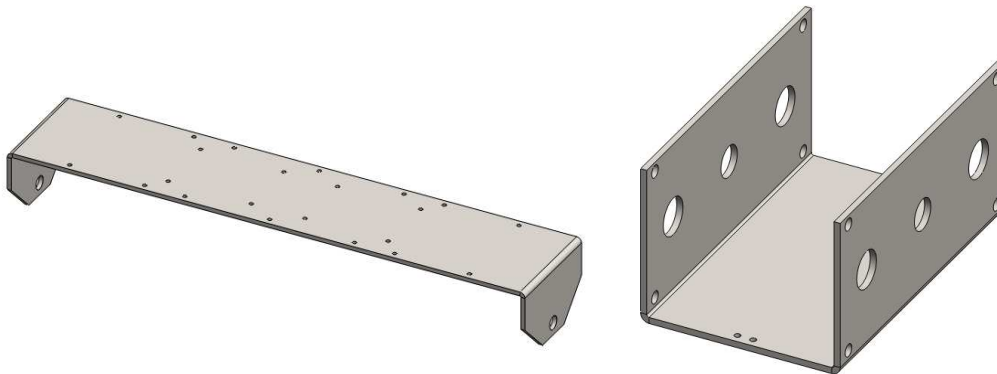
TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

As you can see on the Fig. 1, we proceed to design of the suspension of the individual modules on which the bushings are attached to the motors on the wheels by dashpots. They are attached to the top of the frame of the robot. The dashpots reduce rotation of the modules and absorb impacts caused by the wheel passing through the rugged terrain. Those vibrations may affect the electronic parts located on the upper body of the robot or any active superstructure sensitive to these vibrations. Rotation of individual modules is ensured by self-weight. When the wheel passes over and obstacle, the chassis is able to follow the terrain and thus increase the traction of the entire robot. Overall rotation of the modules is limited by mechanical stops, which limits this movement up to approximately 20 degrees. This range can be variable because it depends on the length of the holders of these stops. The rotation of the module is limited by the mechanical contact between the module and the connecting upper part itself.



*Fig. 2. Detail of mechanical limitation of the rotation for the bushings with motors*

Upper body construction is from bent steel plate with 3 mm thicknes and chassis modules are from 2 mm steel plate. This should be sufficient for the stresses that occur when robot passes over an obstacle.



*Fig. 3. Upper part of body construction and chassis module*

**Stress analysis of the supporting frame and individual parts of the chassis.** Strength check of the supporting frame was done in SolidWorks software. The frame was loaded with a load capacity of 2 kg and three times its own weight, taking into account the dynamic stress. For allowed stress  $\sigma_D$  following applies:

$$\sigma_D = \frac{R_e}{n}$$

$$\sigma_D = \frac{355}{2} = 175,4MPa$$

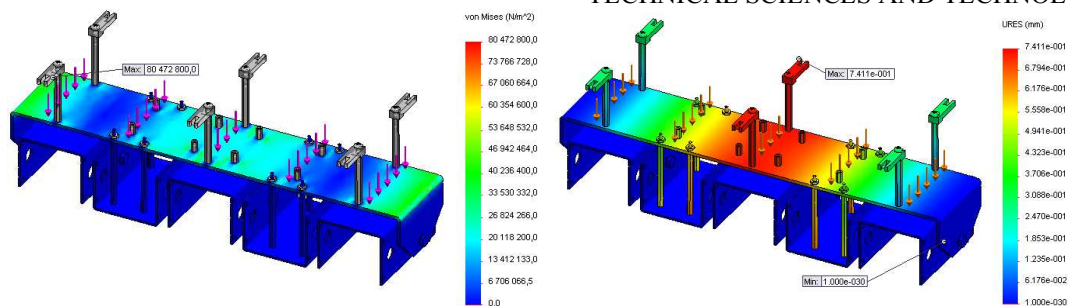


Fig. 4. Maximum stress and benning of the support frame

As can be seen on Fig. 4, the maximum stress reached approximately 80 MPa. Under this load the benning reached level of 0,74 mm in the center of the structure. This deformation does not affect functionality of the robot.

**Individual chassis modules check when crossing obstacles.** The designed mobile wheeled robot should be characterized by his improved ability to cross a rugged terrain, simulating the behavior of the designed construction solution in different environments and different situations.

Table

Parameters of simulation

Estimated weight	6 kg
Estimated load capacity	2 kg
Engine speed	40 rpm
Static coefficient of friction fS (coarse-grained asphalt)	1
Dynamic coefficient of friction fS (coarse-grained asphalt)	1,25
Static coefficient of friction fS (concrete)	0,97
Dynamic coefficient of friction fS (concrete)	1,05

For the purposes of the simulation, an obstacle track was created to simulate the rugged terrain with obstacles this chassis may encounter when moving in it. The track consisted of various protrusions, holes and at the end also obstacles for one row of wheels. Chassis behavior, suspension and tilting the bushes with motors was analyzed. During the simulation various strength analyses were evaluated for selected components, which were most heavily loaded during this test. During the movement, it was possible to observe the advantages of the proposed structure when crossing obstacles such as holes and surface irregularities. The rotation motor mounts followed the terrain, confirming the assumption of excellent robot traction. Also the advantage of tilting modules with dashpots was also confirmed, where the modules adjusted their position when passing one row of wheels over an obstacle and after returning from it they reestablished their starting position.



Fig. 5. Movement of mobile robot in terrain

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Three critical points were selected where the stress reached maximum values. In Fig.6 it's possible to see the stress field during the crossing through uneven surface and obstacle at the end. Maximum value was reached when passing through uneven surface, approximately 108 MPa at the point of the attachment the connecting screw. Possible solution of this problem was to apply a washer to the joint, to reduce this stress concentration.

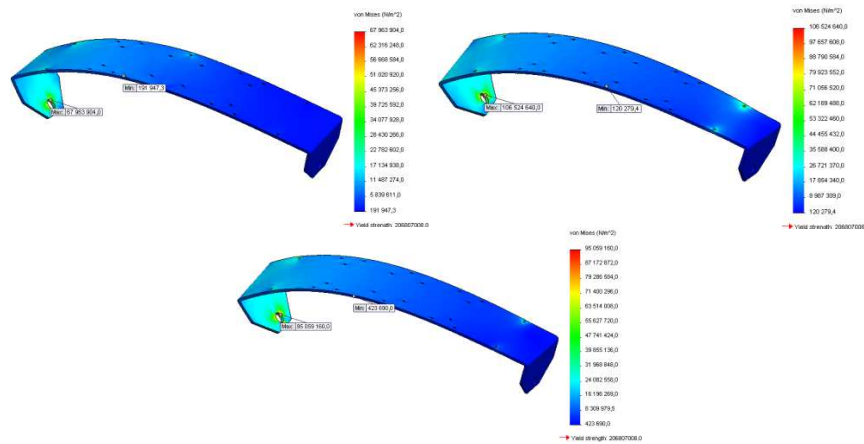


Fig. 6. Stress in upper body construction during the crossing the hole, uneven surface and last obstacle

The same case of loading occurred on the chassis of the modules. The stress during the terrain crossing reached 170 MPa at the point where the module was connected to the body of the robot with screw. At this point the stress concentration had to be also limited. Therefore, a washer was mounted in the connection, which reduced the tension at this point to approximately 80 MPa.

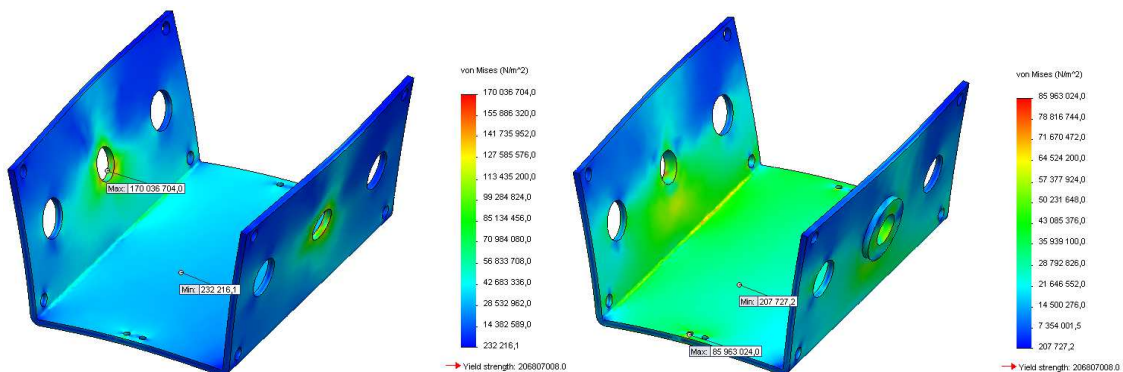


Fig. 7. Stress on the chassis module without the washer and with the washer

Another simulation was the movement of the mobile chassis down the stairs. One of the conditions of the design was the ability to move down the stairs without stuck in or tipping over. The stairs were constructed on the basis of building standards STN 73 4130 [7]. This standard discusses that the minimum width of a step shall be 250 mm.

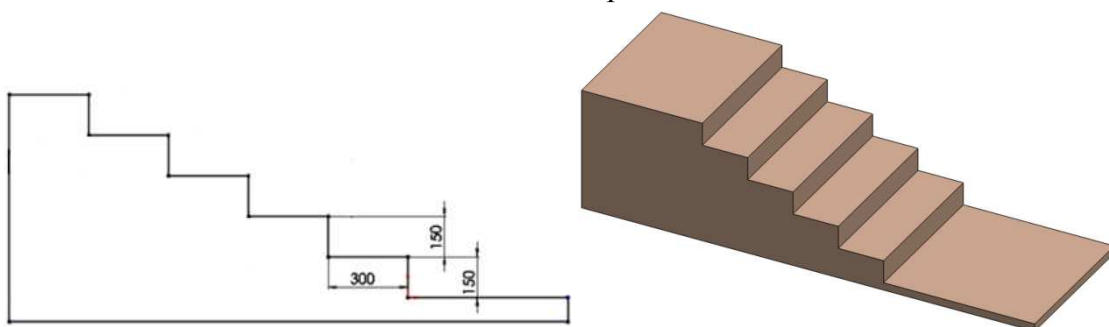


Fig. 8. Dimensions and staircase model

As in previous simulations, the stresses and deformations of the construction were evaluated.

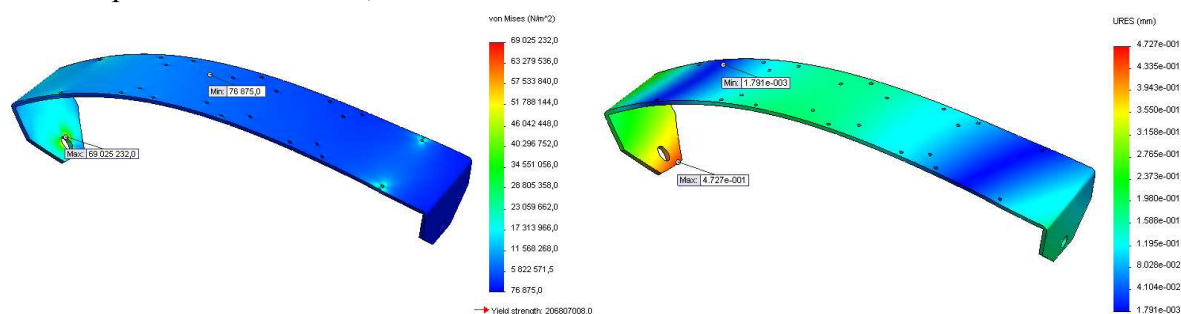


Fig. 9. Stress and deformation in upper chassis

In Fig. 9 the stress can be observed on the chassis module. When moving down the stairs, the maximum stress at the mounting point of the connecting screws was 150 MPa. Already in the previous case, washers had to be applied, which reduced the tension up to 60 MPa.

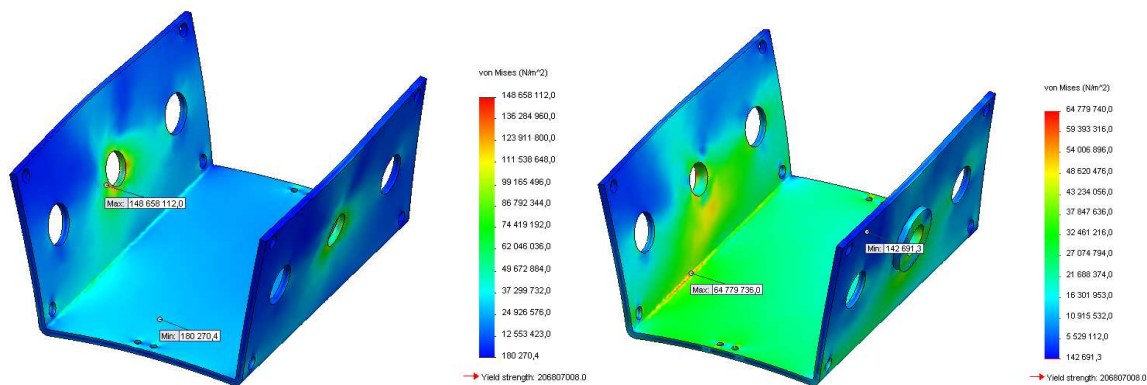


Fig. 10. Stress on the chassis module without the washer and with the washer

**Conclusion.** The aim of this article was design and stress analysis of individual parts of the mobile wheeled robot with improved ability to pass through rugged terrain. All construction parts of this mobile robot were designed in Solidworks software, taking into account the simplicity of the structure and its ease of manufacture. The mobile chassis was tested in various terrains simulations, where all his movements and terrain adaptation were monitored. After evaluating the simulations and confirming his usefulness when passing through rugged terrain, the mobile chassis structure was recalculated from the point of view of the mechanics theory, so that the allowable stresses with respect to the yield point of the material were not exceeded.

**Acknowledgement.** This research was funded by Slovak Grant Agency VEGA1/0872/16 “Research of synthetic and biological inspired locomotion of mechatronic systems in rugged terrain” and by project Slovak Grant Agency VEGA 1/0389/18 “Research on kinematically redundant mechanisms”.

### References

1. Vitko, A., Jurišica, L., Babinec, A., Duchoň, F., & Kľúčik, M. (2010) Some Didactic Problems of Teaching Robotics. *Proceedings of the 1st International Conference Robotics in Education, Slovak University of Technology in Bratislava*, ISBN 978-80-227-3353-3.
2. Kelemen, M., Kelemenová T., Jezný, J. (2008). Four legged robot with feedback control of legs motion. *Bulletin of Applied Mechanics*, 4 (16), 115-118.
3. Duchoň, F., Hubinský, P., Hanzel, J., Babinec, A., Tölgyessy, M. (2012). Intelligent Vehicles as the Robotic Applications. *Procedia Engineering*, 48.
4. Ivanjko, E., Komsic, I., Petrovic, C. (2007). Simple off-line odometry calibration of differential drive mobile robots. *Proceedings of 16th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, Ljubljana, Slovenia*, (pp. 164–169).

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

5. Virgala, I., Vacková, M., Kelemen, M. (2010). Two-legs walking robot "Wirgil". *Medical and treatment*, 40 (2), (pp. 32-35).
6. Miková, L., Kelemen, M., Kelemenová, T. (2008). Four wheeled inspection robot with differential controlling of wheels. *Acta Mechanica Slovaca*, 12 (3-B), (pp. 548-558).
7. STN 73 4130 Schodištia a šikmé rampy - Základné ustanovenia.
8. Haiyang, J. Peng, Z., Ying, H., Jianwei, Z., Zhizeng, Z. (2010). Design and Kinematic Analysis of a Pedicle Screws Surgical Robot. *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Tianjin, China.
9. Koniar, D., Hargas, L., Simonova, E. (2014). Virtual Instrumentation for Visual Inspection in Mechatronic Applications. *6th Conference on Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems (MMaMS), Slovakia*.
10. Miková, L., Trebuňa, F. (2012). The Application of Simulation Methods for Modeling Mechatronic Systems, *Acta Mechanica Slovaca, Vol. 16, No. 2*, (pp. 32-36).
11. Gracia, L., Tornero, J. (2008). Kinematic control of wheeled mobile robots, *Latin American Applied Research*, Vol. 38, (pp. 7-16).

УДК 681.2

Любица Микова

## КОНСТРУКЦІЯ ТА СИЛОВИЙ АНАЛІЗ КОЛІСНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

**Актуальність теми дослідження.** У контексті проектування нових, вдосконалених пристроїв або технічних систем, що містять електронні елементи, ми все частіше стикаємося з такими поняттями, як мехатроніка, мехатронні системи, підхід до вирішення систем мехатроніки або просто мехатроніка. Вплив мехатроніки найбільш помітний у мобільних мехатронних виробках, особливо в автомобільній промисловості, де все частіше застосовуються мехатронні системи.

**Постановка проблеми.** Конструювання колісного шасі з покращеною здатністю долати нерівну місцевість. Його окремі частини підлягають імітації силовим навантаженням, що підтвердило перевагу обраної конструкції та мобільності шасі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проектування робота для конкретної мети завжди включає кілька етапів. Перш ніж розглянути конструкцію робота, необхідно визначити, в якому середовищі він повинен працювати. Проблема чотирьох і більше колісних шасі виникає коли колеса не підресорені, а нерівність поверхні місцевості зумовлює втрату контакту колеса з нерівною поверхнею та відповідно втрату зчеплення.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Питання про фізичну конструкцію мобільного робота не досліджено, оскільки це буде вирішено в майбутньому.

**Постановка завдання.** Основною метою було проектування та аналіз напружень окремих частин мобільного колісного робота з покращеною здатністю проходити через нерівну місцевість.

**Виклад основного матеріалу.** Шасі базується на п'яти модулях, які з'єднані між собою. Його керуваність залежить від модулів розташованих один проти одного і обмежується верхньою кришкою з'єднання. Два модуля, вбудовані між колесами, призначені для зберігання, які можна використовувати для джерел живлення або допоміжного управління.

**Висновки відповідно до статті.** Всі конструктивні частини цього мобільного робота були розроблені в програмному забезпеченні Solidworks з урахуванням простоти конструкції та простоти виготовлення. Пересувне шасі тестувалося в різних моделях місцевості, де відслідковувалися всі його рухи та адаптація на місцевості. Пересувна структура шасі була перерахована з точки зору теоретичної механіки.

**Ключові слова:** колісний мобільний робот; імітаційна модель.

Рис.: 10. Табл.: 1. Бібл.: 11.

**Miková Lubica** – associate professor, Ph.D. of technical sciences Faculty of Mechanical Engineering, Technical University of Kosice (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

Любица Микова – доцент, кандидат технических наук, Технический университет Кошице (Letna 9, 04200 Kosice, Slovak Republic).

**E-mail:** lubica.mikova@tuke.sk

**Scopus Author ID:** 55259674100

## РОЗДІЛ III. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

UDC 621.314.1

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-168-174

*Dmitriy Alekseevskiy, Olena Mikhailutsa, Andriy Pozhuyev*

### AVERAGED MODEL OF A BOOST-TYPE PULSE DC CONVERTER

**Urgency of the research.** In the present paper, the questions of synthesis and application of the mathematical model of a boost-type DC converter, which has found widespread application in modern electrical devices and complexes, are considered.

**Target setting.** Modeling of electrical complexes, which include semiconductor converters together with electromechanical, thermodynamic and other relatively slow processes, is faces the problem of a significant increase in simulation time. One way to solve this problem is to use the mathematical description of the semiconductor converter in the values averaged over the period of operation of the semiconductor switch.

**Actual scientific researches and issues analysis.** In publications on this topic over the past few years, averaged models of DC converters of all basic types have been proposed. Both continuous and intermittent current modes are considered.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** In the models described in the publications, the continuous and intermittent current modes are considered as separate models in which ideal semiconductor switches are used. In addition, the adequacy of the models used is not given enough attention.

**The research objective.** The objective of this work is to synthesize an averaged mathematical model of a boost-type DC converter, which would take into account the effect of direct voltage drops on the circuit elements in continuous and intermittent current modes, as well as assess the adequacy of applying the averaged approach.

**The statement of basic materials.** In the article a description of an averaged mathematical model of a boost-type DC converter, which takes into account direct drops on the circuit elements and provides simulation both in continuous and intermittent current mode, is given. To confirm the performance and assess the adequacy of the proposed model, a joint simulation was performed using the proposed and reference (circuit) model, and its comparative analysis is given.

**Conclusions.** The results of the comparative analysis confirmed the adequacy of the proposed model and revealed the occurrence of an error in the intermittent current mode, and also determined its cause.

**Keywords:** Boost-type pulse DC converter; visual modeling; mathematical model adequacy.

*Fig.: 4. References: 10.*

**Urgency of the research.** The creation of complicated modern technical objects, such as electrotechnical complexes with semiconductor converters, is impossible without a qualitatively conducted modelling period. The need for efficient control algorithms synthesis for electrical systems, including a boost-type pulse DC converter, results from optimization of device operation. The creation of a mathematical model can significantly simplify the process of developing electronic systems in modelling period. The enhancing of electrical systems modelling process is achieved by visual modelling of a boost-type pulse DC converter. In addition, the form of the visual-structural representation of mathematical dependencies describing such devices is not only a way of describing the computation algorithm, but also contributes to the understanding of electromagnetic processes in it, which is important when training the technology specialists.

**Target setting.** Nowadays, there is a common problem of creating system models that include subprocesses with different rates of modelling optimization time. A particular interest is paid to electrical system structures, that include semiconductor converters along with electromechanical, thermodynamic and other relatively slow processes. The creation of an adequate model by means of circuit simulation is quite a challenge. It is much simpler and more efficient to syntheses for controlling electrical systems, which include a boost-type pulse DC converter, to carry out the structural modelling. Thus, the article solves an actual scientific problem regarding the creation of an algorithm that simulates the direct voltage drop process in semiconductor device switches. The developed algorithm is a constituent part of general simulation model of the boost-type pulse DC converter.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Widespread use of pulsed semiconductor converters in various modern electrical systems requires further improvements in the modeling processes. In recent decades, to increase the accuracy, a variety of tools (models, techniques and algorithms) have been developed, as well as software to enhance the modelling process for pulse semiconductor converters of three main types.



Notably, that many works of domestic and foreign scientists are devoted to the research of such issues. For example, in [1], a mathematical model of a boost-type pulse DC converter with pulse-width modulation is considered, which allows investigating the dynamics of the converter operation to ensure a scientifically based choice of the controller parameters. However, in the considered model, ideal switches are used, and the parameters of CVC (current-voltage characteristic) switches are taken into account only implicitly in equivalent resistance. This makes it difficult to parameterize the model using passport semiconductor switch data.

Works [2] and [3] consider averaged models of pulse semiconductor converters of three main types, based on their structural pulse models. But they don't pay respect to voltage drops in power diode and in transistor of the model. It is noted that a common practice today is the creation of computer models using standard modelling tools, for example, MATLAB Simulink, and the subsequent conduct of a model experiment to select device parameters, resulting in a performance decrease.

To overcome this problem, the work [4] substantiates averaged structural models of an inverting DC pulse converter. The described structural averaged models are not intended for simulation of a semiconductor converter modelling and cannot be used as an integral part of the model of an electrical engineering complex.

In [5], a description of the averaged mathematical model of a boost-type pulse DC converter is considered. Unfortunately, this model does not take into account the parameters of semiconductor switches and uses their ideal models. In addition, the paper presents only a mathematical description of an averaged model of converter and does not pay attention to organization of computational process.

Further, in [6], a mathematical model of a pulse converter with nonlinear external characteristics is considered. The model is presented in state variables on different parts of smoothness and makes it possible to regard the nonlinear properties of the transducer of the first kind in the modelling period. In the converter equivalent circuit, losses in switches are considered implicitly - as the equivalent loss resistance in the converter.

In [7], an averaged model of a DC pulse converter is also proposed. The reliability of the presented model is correlated with a model built by the author on the Kirchhoff's laws basis, and not with a circuit model. In this regard, the results of comparative modelling raise doubts, in particular, the presence of negative values of the inductance current during an oscillatory transient process.

In [8], the given approach clarifies the averaged mathematical models of main types of DC converters, which were described by the author earlier in [2]. This description, as a clarification, includes consideration of direct voltage drop on only one power switch – the power diode, and the voltage drop across the power transistor is not taken into consideration.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Nowadays, there are no domestic software systems conducting semiconductor converters modelling as part of electrical engineering complex. The mathematical basis of such a software should be an object simulation model itself and the pulse DC converter as a single whole. To reveal the above general issue, it is necessary to solve the problem of constructing an algorithm for modelling of just such systems being developed. It should be noted, in the authors' works considered in the review devoted to the problem of pulse voltage converters modelling, insufficient attention is paid to the analysis of the adequacy and accuracy of simulation results. Meanwhile, the developer of control systems with pulse voltage converters, would be interested in having an idea of the accuracy assessment of results reproduced by the model.

**The research objective.** To analyze the problem of growing modelling time caused by a large number of integrating system iteration of differential equations during each period of semiconductor switch operation, the use of an averaged mathematical model (with the example of a mathematical synthesis model of boost-type pulse DC converter) is considered.

**The statement of basic materials.** In the classical pulse DC converter scheme of boost type (Fig. 1), the averaged values of electrical quantities for the switching period of power switches are taken as state parameters of the model.

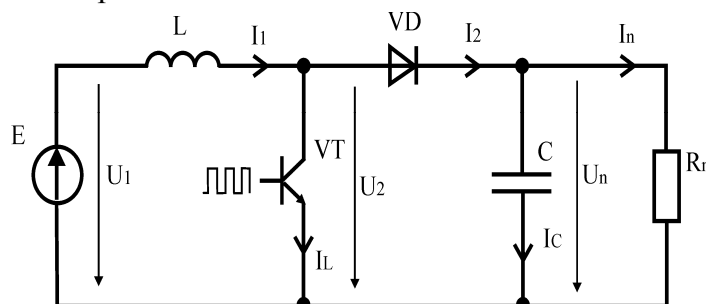


Fig. 1. Diagram of boost-type pulse DC converter

Voltage of the converter ( $U_n$ ) output is determined by the charge on the output capacitor, the integral value of which is described by the following expression:

$$U_n(t) = \frac{1}{C} \int_0^t I_C(\tau) d\tau + U_n(0), \quad (1)$$

where  $C$  is the capacitance of the output capacitor,  $U_n(0)$  is the initial voltage at the pulse DC converter output.

Herewith, the load current with a known resistance  $R_n$  is found according to Ohm's well-known law, which is written in the following form:

$$I_n(t) = \frac{1}{R_n} \cdot U_n(t). \quad (2)$$

The value of the current via the diode ( $I_2$ ) is proportional to the current inductance ( $I_1$ ) taking into account the fill factor of the diode open state  $\gamma_{VD}$ :

$$I_2(t) = \gamma_{VD}(t) \cdot I_1(t). \quad (3)$$

The inductance current is determined by the magnetic field energy of the inductor, the integral form of which is given by the following expression:

$$I_1(t) = \frac{1}{L} \int_0^t U_L(\tau) d\tau + I_1(0), \quad (4)$$

where  $L$  – is the value of input inductance,  $I_1(0)$  is the initial value of current inductance.

Voltage on the transistor switch is proportional to the voltage on the output capacitor, taking into account the fill factor of the diode open state:

$$U_2(t) = \gamma_{VD}(t) \cdot U_n(t). \quad (5)$$

The fill factor of the diode open state depends on the current mode and is determined (in continuous or intermittent current mode) by the following expression:

$$\gamma_{VD}(t) = \begin{cases} \frac{U_1(t) \cdot \gamma_{VT}(t)}{U_n(t) - U_1(t)} & \text{when } I_1(t) < \frac{U_1(t) \cdot \gamma_{VT}(t) \cdot T(t)}{2 \cdot L} \\ 1 - \gamma_{VT}(t) & \text{when } \frac{U_1(t) \cdot \gamma_{VT}(t) \cdot T(t)}{2 \cdot L} \leq I_1(t) \end{cases} \quad (6)$$

where  $T$  – is the switching period of the transistor, and the fill factor must satisfy the following condition:

$$0 < \gamma_{VD}(t) \leq \gamma_{VT}(t).$$

Using Kirchhoff's law, we determine the current of the output capacitor and the voltage across the inductance, the latter taking into account the losses in the switch elements and the inductance:

$$I_C(t) = I_2(t) - I_n(t) \tag{7}$$

$$U_L(t) = U_1(t) - U_2(t) \cdot \gamma_{VD}(t) - U_{onVD} \cdot \gamma_{VD}(t) - R_{onVD} \cdot I_2(t) - U_{onVT} \cdot \gamma_{VT}(t) - R_{onVT} \cdot I_1(t) \cdot \gamma_{VT}(t) - R_L \cdot I_1(t) \tag{8}$$

where  $U_{onVD}$ ,  $U_{onVT}$  – are direct voltage of the diode and the switch transistor,  $R_{onVD}$ ,  $R_{onVT}$  – are their direct resistance,  $R_L$  – resistance, that considers losses in the inductance coil. The mathematical model with the above expressions (1) - (8) can be easily represented by the visual block diagram of a boost-type pulse DC converter (Fig. 2), where the blocks indicated by dotted lines are numbered in accordance with expressions (1) – (8).

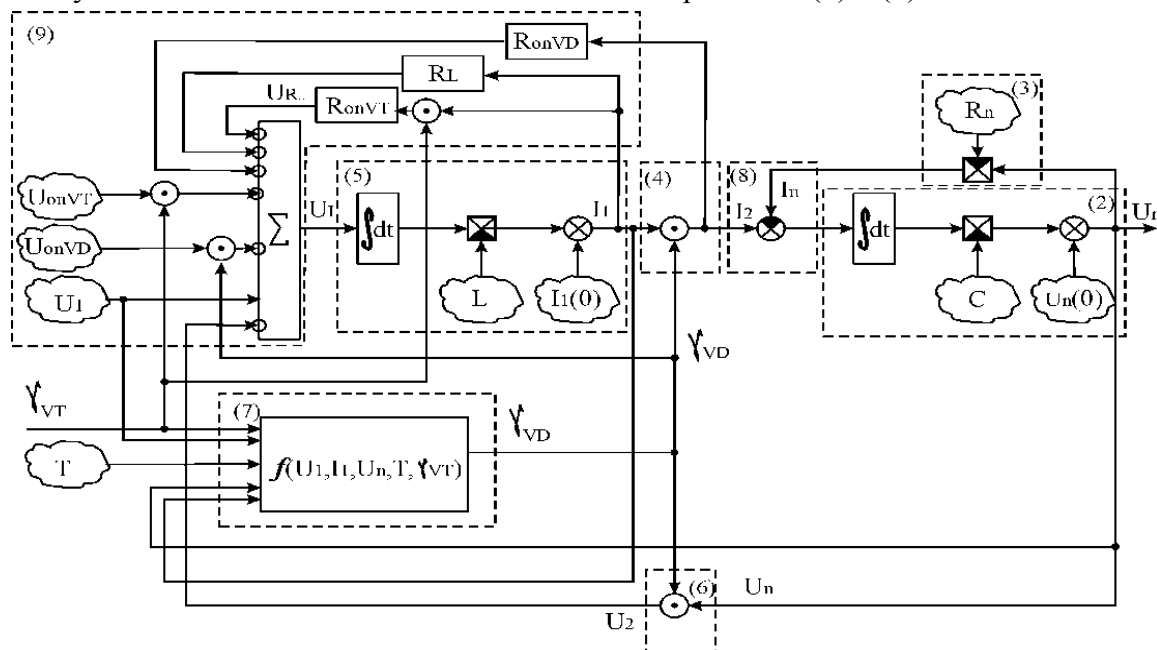


Fig. 2. Visual block diagram of a boost-type pulse DC converter

**Researches.** Adequate converter modelling, as an element of the system, needs a sufficiently large number of integration system iterations of differential equations during each period of semiconductor switch operation. Knowing that modern devices of converter equipment operate at tens and hundreds of kilohertz frequencies, the complex modelling throughout the entire transition process, with time constants from several seconds to several minutes, is associated with a huge total number of calculation iterations, and this, in its turn, leads to a significant increase of modelling time.

For example, the modelling of a high pressure lamp ignition controlled by a start-up device based on a boost-type pulse DC converter takes several hours, due to the fact that computational process also requires the numerical solution of transcendental equations. As it was mentioned above, the use of averaged models is a way to reduce the modelling time significantly.

A modelling of a boost-type pulse DC converter has been made in order to determine the coil current and capacitor voltage. For clarity and understanding of the essence of the proposed methodology, the results are compared at the circuit designed and structural levels, considering the participation of DC converter [9], [10].

According to the modelling results, dependencies of the coil current and the capacitor voltage on the operating time of the pulse converter were built (Fig. 3). The sawtooth curve

corresponds to the circuit model, and the smooth curve corresponds to the average model. Comparison of the modelling results (Fig. 3) at the circuit designed and at the structural level shows a high degree of adequacy of the proposed model. The implementation of the model presented in the work allows significantly (more than three orders of magnitude) to reduce the modelling time. Means of modelling verify the adequacy of the resulting mathematical model. A comparative analysis was carried out by comparing the results of applying the circuit and average models at the output using identical low-pass filters.

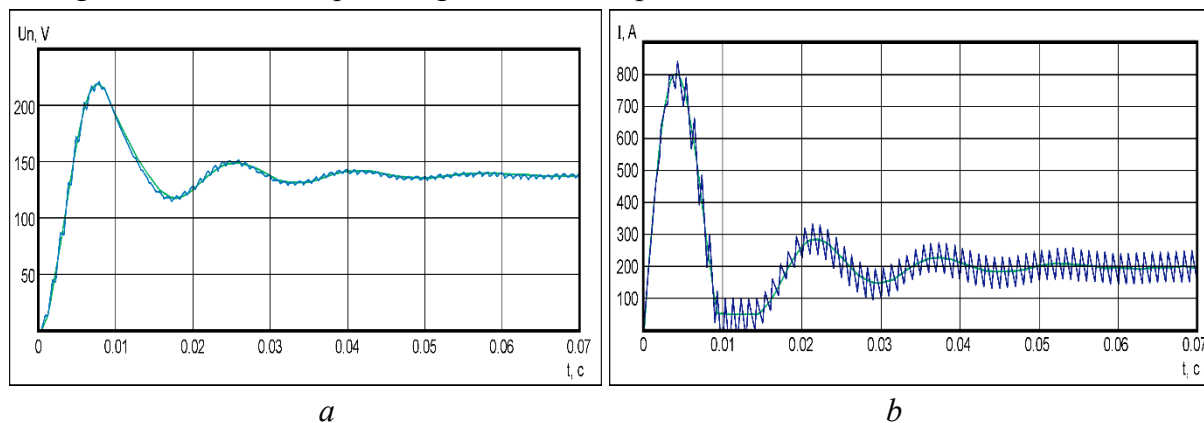


Fig. 3. The modelling results for two alternative models:  
a – dependence of the output voltage; b – current dependence

According to the modelling results, dependencies of the coil current and the capacitor voltage on the operating time of the pulse converter were built (Fig. 3). The sawtooth curve corresponds to the circuit model, and the smooth curve corresponds to the average model. Comparison of the modelling results (Fig. 3) at the circuit designed and at the structural level shows a high degree of adequacy of the proposed model. The implementation of the model presented in the work allows significantly (more than three orders of magnitude) to reduce the modelling time. Means of modelling verify the adequacy of the resulting mathematical model. A comparative analysis was carried out by comparing the results of applying the circuit and average models at the output using identical low-pass filters.

For the model proposed in the paper, Figure 4a), we present the results of a model experiment to determine the values of the relative modelling error. As in the previous review, a circuit model of a boost-type pulse DC converter was taken as a reference model. To compare the moments of transition process in Figure 4b), the smoothed temporal characteristics of the inductance current in discontinuous current section is given.

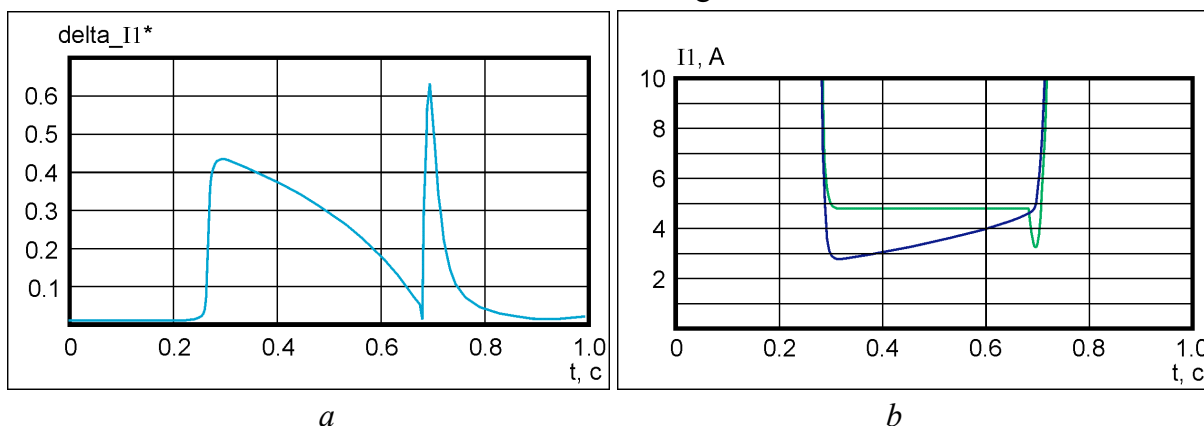


Fig. 4. The research results of the modelling relative error values

a – the relative modelling error; b – characteristics of the inductance current in discontinuous current section

The analysis of the graphs shows that the greatest modelling error falls on the discontinuous current mode, with peak values corresponding to moments of transition from the con-

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

tinuous current mode to the discontinuous mode and vice versa. The analysis of cause-and-effect relations structure conducted in this work reveals the presence of a rather rigid negative feedback on inductance current. It occurs in a natural way when applying the procedure for determining the regime of "intermittent-continuous current" in the formula (6). This procedure adequately reproduces transition moments; however, after the model reaches the discontinuous current mode, the computational algorithm begins to stabilize the value of choke current at the threshold value (Fig. 4). At the same time, in the reference model, inductance current varies with time due to a change in the voltage on capacitance. The voltage on capacitance thus determines magnitude of the error in the discontinuous current mode.

It should be noted that this problem seems to be present in implementation of models in works of other authors. For example, in [5], latent negative feedback on inductance current can be detected in the resulting system of model equations, although, as mentioned above, the accuracy of the averaged inductance current is not considered. This problem manifests itself only when the model is implemented on a PC and while organizing the computational flow, and its identification became possible only when applying a visual representation of the cause-and-effect relationships using a visual model.

Maximum error values and the nature of its change over time in sections of intermittent current depend on the parameters of the converter circuit. It should be noted that although it is quite large in relative values, in absolute value it does not exceed 1-2% of the nominal, which, in most cases, is acceptable for practical tasks. In the continuous current mode, the relative error averages only 0.6%. In connection with the above, the proposed model can be regarded as a sufficiently adequate one in relation to the main tasks of designing control systems for electrical systems, which include a boost-type pulse DC converter.

**Conclusions.** In present work, an actual scientific problem has been solved regarding the development of a boost-type pulse DC converter modelling algorithm. The scientific novelty of the work consists in improvement of boost-type pulse DC converter simulation model, which, unlike the existing ones, takes into account direct voltage drops on the device's semiconductor switches and in assessing the adequacy of the proposed model.

The presentation of an averaged mathematical model of boost-type pulse DC converter is a computational algorithm in a convenient, ready for use in practical form, since it is a complete description of computational process. The proposed modelling approach can be applied to other DC / DC converter circuits.

### References

1. Andriyanov, A. I., Malakhanov, A. A. (2006). Mathematical modeling of the dynamics of a pulse type up-converter. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 1(9), 61–69 [in English].
2. Belov, G. A. (2008). Structural models and the study of the dynamics of pulse converters. *Electricity*, 4, 40–49 [in English].
3. Belov G. A., Malinin A. V., Pavlova A. A. (2008). Structural dynamic models and frequency method for the synthesis of dual-circuit control systems of pulse converters. *Power Electronics*, 3, 98–106 [in English].
4. Belov, G. A., Serebryannikov, G. V., Semenov, Yu. M. (2013). Averaged structural dynamic models of an inverting pulse converter. *Practical power electronics*, 4(52), 28–35 [in English].
5. Kapustin, I. V., Lukashenkov, A. V. (2013). Structural dynamic models and frequency method for the synthesis of dual-circuit control systems of pulse converters. *News of TSU. Technical science*, 2, 126–135 [in English].
6. Andriyanov, A. I., Krasnov, N. A. (2013). Mathematical modeling of pulse voltage converters with nonlinear external characteristic. *Current Issues of Technical Sciences: Proceedings of the II Intern. scientific conf.* (pp. 28–31). Perm: Mercury [in English].
7. Mezhaikov O. G. (2015). Mathematical model of the down-converter voltage. *Young scientist*, 5, 171–176 [in English].
8. Belov, G. A. (2015). Linearization of averaged structures of dynamic models of pulsed DC converters in the discontinuous current mode. *Electricity*, 9, 55–64 [in English].

9. German-Galkin, S. G. (2001). *Computer simulation of semiconductor systems*. St. Petersburg [in English].

10. Chernykh, I. V. (2008). *Simulation of electrical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow: DMK Press; SPb: Piter [in English].

УДК 621.314.1

Дмитро Алексієвський, Олена Міхайлуца, Андрій Пожувєв

## УСЕРЕДНЕНА МОДЕЛЬ ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ ПІДВИЩУЮЧОГО ТИПУ

**Актуальність теми дослідження.** У статті розглядаються питання синтезу та застосування математичної моделі імпульсного перетворювача постійної напруги підвищуючого типу, який знайшов достатньо широке застосування в сучасних електротехнічних пристроях і комплексах.

**Постановка проблеми.** Моделювання електротехнічних комплексів, що мають у своєму складі напівпровідникові перетворювачі спільно з електромеханічними, термодинамічними й іншими відносно повільними процесами, постає перед проблемою значного збільшення часу моделювання. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування математичного опису напівпровідникового перетворювача в усереднених, за період роботи напівпровідникового ключа, величинах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У публікаціях на цю тему за останні кілька років запропоновані усереднені моделі перетворювачів постійної напруги всіх основних типів. Розглядаються, як режими безперервного, так і переривчастого струму.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** В описаних у публікаціях моделях режими безперервного й переривчастого струму розглядаються як окремі моделі, в яких використовуються ідеальні напівпровідникові ключі. Крім того, питанням адекватності застосовуваних моделей не приділено достатньо уваги.

**Постановка завдання.** Завданням цієї роботи є синтез усередненої математичної моделі імпульсного перетворювача постійної напруги підвищувального типу, яка враховувала б вплив прямих падінь напруги на елементах схеми в режимах безперервного й переривчастого струму, а також оцінка адекватності застосування усередненого підходу.

**Виклад основного матеріалу.** У роботі наведено опис усередненої математичної моделі імпульсного перетворювача постійної напруги підвищуючого типу, що враховує прямі падіння на елементах схеми і забезпечує моделювання як у режимі безперервного, так і переривчастого струму. Для підтвердження працездатності та оцінки його запропонованої моделі в роботі було проведено спільне імітаційне моделювання за допомогою запропонованої та еталонної (схемної) моделі й наведено його порівняльний аналіз.

**Висновки відповідно до статті.** Результати порівняльного аналізу підтвердили адекватність запропонованої моделі і виявили причину виникнення похибки в режимі переривчастого струму, а також визначили її причину.

**Ключові слова:** імпульсний перетворювач постійної напруги; візуальне моделювання; адекватність математичної моделі.

Рис.: 4. Бібл.: 10.

**Alekseevskiy Dmitriy** – PhD in Technical science, Associate Professor, Associate Professor of Electronic Systems department, Engineering Institute of Zaporizhzhya National University (226 Sobornyi Av., 69006 Zaporizhzhia, Ukraine).

**Алексієвський Дмитро Геннадійович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних систем, Інженерний інститут Запорізького національного університету (просп. Соборний 226, м. Запоріжжя, 69006, Україна).

**E-mail:** lasian2017@ukr.net

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5787-6092>

**ResearcherID:** S-9538-2018

**Mikhailutsa Olena** – PhD in Technical science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Automation Systems Software, Engineering Institute of Zaporizhzhya National University (226 Sobornyi Av., 69006 Zaporizhzhia, Ukraine).

**Міхайлуца Олена Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем, Інженерний інститут Запорізького національного університету (просп. Соборний 226, м. Запоріжжя, 69006, Україна).

**E-mail:** elenamikhaylutsa7@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-2935-7997>

**Scopus Author ID:** 16407827200, 57210602000

**Pozhuyev Andriy** – PhD in Physical and mathematical sciences, Associate Professor, Head of the Interfaculty Department of General Educational Disciplines, Engineering Institute of Zaporizhzhya National University (226 Sobornyi Av., 69006 Zaporizhzhia, Ukraine).

**Пожувєв Андрій Володимирович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач Міжфакультетської кафедри загальноосвітніх дисциплін, Інженерний інститут Запорізького національного університету (просп. Соборний 226, м. Запоріжжя, 69006, Україна).

**E-mail:** scorpio6828@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-4083-5139>

**Scopus Author ID:** 6506407054

Володимир Войтенко, Роман Єршов

## МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ КВАДРОКОПТЕРІВ ТА АВТОНОМНИХ РОБОТІВ

**Актуальність теми дослідження.** Мінімізація енергоспоживання електроприводами безпілотного літального апарату (БПЛА) або робота дозволяє підвищити ступінь автономності (дальність, швидкість, або час дії).

**Постановка проблеми.** У середовищі для багатодоменого моделювання на рівні структурних схем Simulink®, яке інтегроване з MATLAB®, представлено декілька моделей електричних двигунів, автономних джерел живлення, а також елементів систем керування. Адекватний підбір блоків, які б дозволили успішно відтворити прототип реальної фізичної системи керування, потребує окремого вирішення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Більшість публікацій із моделювання в цій предметній галузі сфокусовано або на докладному описі роботи з MATLAB® та Simulink®, або на моделюванні динаміки автономних апаратів та керуванні ними для забезпечення позиціонування у просторі.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Питання оптимізації енергоспоживання автономного об'єкта з кількома електроприводами залишається поза увагою.

**Постановка завдання.** Дослідження зосереджено на аналізі наявних Simulink-моделей електродвигунів, елементів живлення та керування, які можна було б використати для подальшої розробки системи керування БПЛА або робота з автономним живленням.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянуті особливості моделювання автономних апаратів, визначена динаміка окремого двигуна, сформульовано вимоги щодо точності стабілізації швидкості обертання ротора, проаналізовані блоки Simulink для автономних апаратів, на основі яких запропонована комплексна модель електропривода для автономного апарата.

**Висновки відповідно до статті.** Моделювання систем електроприводів автономних апаратів корисно як на початковій стадії проектування, так і за наявності фізичного макета, оскільки суттєво скорочує час та матеріальні ресурси, потрібні для розробки енергозаощадливої системи керування.

**Ключові слова:** модель електропривода; MATLAB; Simulink; безпілотний літальний апарат (БПЛА); автономний робот; енергоспоживання; безколекторний двигун постійного струму (БДПС).

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 20.

**Актуальність теми дослідження.** Безпілотні літальні апарати (БПЛА) та автономні роботи (АР) набувають дедалі більшого поширення в геодезії, геології, сільському господарстві, а також у спеціальних сферах [1]. Ці високотехнологічні вироби містять декілька керованих електроприводів, які живляться від єдиного автономного джерела (переважно акумулятора). Мінімізація споживаної електроприводами потужності дозволяє підвищити ступінь автономності пристрою (дальність, швидкість, або час дії).

**Постановка проблеми.** Дослідження методів енергоефективного керування пристроєм з автономним живленням доцільно розпочинати з етапу моделювання аби заощадити час та матеріальні ресурси. Комп'ютерне моделювання дозволяє дослідити поведінку об'єкта за умов різних завдань на керування, змін параметрів об'єкта, а також зовнішніх впливів та уточнити структуру та алгоритм роботи системи керування перед виготовленням вартісної фізичної моделі.

Найбільш поширеною програмою комп'ютерного моделювання мехатронних систем є MATLAB® [2], що зумовлено наявністю відповідного інструментарію, документації та численних прикладів, а також можливістю генерації програмного коду для цифрових систем керування. Середовище для багатодоменого моделювання на рівні структурних схем Simulink® інтегроване з MATLAB® і містить графічний редактор, а також налаштовувані бібліотеки блоків динамічних систем.

У Simulink® представлено декілька моделей електричних двигунів, автономних джерел живлення, а також численні елементи систем керування. Адекватний підбір блоків, які б дозволили успішно відтворити прототип реальної фізичної системи керування, являє собою проблему, що потребує окремого вирішення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Численні публікації присвячені опису принципів функціонування та початку роботи з MATLAB® та Simulink®, наприклад, [3; 4]. Розпочинаючи з версії MATLAB® 2018 доступний приклад [5], в якому показано використання Simulink® для моделювання квадрокоптера на основі мінідронів. У цьому прикладі використовується підхід, визначений у [6] та адаптований до важкопідйом-

ного квадрокоптера у [7]. У [8] розроблена точна імітаційна модель квадрокоптера, яка була реалізована у Simulink та використана для оптимізації конструкції та налаштування параметрів керування.

Для аналізу навігації та навколишнього середовища аерокосмічних транспортних засобів і візуалізації їх польоту за допомогою стандартних приладів кабіни або тренажера польоту в MATLAB® передбачений набір інструментів Aerospace Toolbox. Aerospace Blockset™ забезпечує блоки Simulink® для моделювання та аналізу динаміки аерокосмічних апаратів, які далі можна візуалізувати у FlightGear Flight Simulator.

Набір інструментів Robotics System Toolbox™ забезпечує алгоритми та апаратне підключення для розробки автономних додатків робототехніки для повітряних і наземних транспортних засобів, маніпуляторів та гуманоїдних роботів. Наявні алгоритми дозволяють планувати траєкторію та шлях руху роботів, уникати перешкоди та оцінювати положення. Для роботів-маніпуляторів є алгоритми зворотної кінематики, кінематичних обмежень та динаміки з використанням дерева жорсткого тіла.

Ця панель інструментів забезпечує інтерфейс між MATLAB® і Simulink® та операційною системою робота (Robot Operating System – ROS), що дозволяє тестувати та перевіряти додатки на роботах з підтримкою ROS і на симуляторах роботів, таких як Gazebo. Наявні приклади показують, як працювати з віртуальними роботами в Gazebo та з реальними роботами з підтримкою ROS.

Robotics System Toolbox підтримує генерацію коду C++, що дозволяє з моделі Simulink автоматично розгорнути вузол ROS в мережі, за допомогою зовнішнього режиму Simulink, переглядаючи сигнали та змінюючи параметри під час роботи моделі.

Найбільш повна та актуальна інформація стосовно панелей інструментів MATLAB® міститься в [2], а також вбудована в довідкову систему цих програм.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** У зазначених вище та інших джерелах [9–14] йдеться, насамперед, про вирішення головного завдання системи керування БПЛА або робота, а саме, – реалізація руху за заданим законом. Проте питання оптимізації енергоспоживання автономного об'єкта з кількома електроприводами залишається поза увагою.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз наявних блоків Simulink та виявлення тих, які можна було б використати для подальшого моделювання та розробки системи керування БПЛА або робота з автономним живленням. До таких блоків можна віднести електродвигуни, елементи живлення та керування.

**Особливості моделювання автономних апаратів.** У [15] вперше висловлено ідею щодо підвищення тривалості польоту БПЛА за рахунок зниження перерегулювання і тривалості перехідних процесів у системах електроприводів апарата, що є особливо актуальним, враховуючи обмежену ємність акумуляторної батареї. Цю ідею можна поширити й на автономні роботи з декількома електроприводами. Доцільно зазначити, що БПЛА називають «мініатюрними літаючими роботами» [7; 8; 16], що підкреслює схожість підходів до аналізу та проектування таких автономних апаратів.

Як базову схему БПЛА з кількома електроприводами будемо розглядати квадрокоптер. Специфіка його роботи полягає в тому, що всі чотири електроприводи тягнучих гвинтів постійно перебувають у перехідному режимі, навіть якщо апарат перебуває в нерухомому стані (висінні). Адже сукупність дестабілізуючих факторів (поток повітря, зміна маси БПЛА під час скидання навантаження, робота інших бортових систем) змушує регулятори, які враховують поточні похибки кутів крену, тангажу та ристання перерозподіляти тягові зусилля між окремими електродвигунами.

У [10] запропонований стенд для вимірювання тяги, бокового зусилля й крутного моменту за допомогою тензодатчика. Також передбачено схему контролю батареї, яка вимірює напругу і струм двигуна. Дані записуються на комп'ютер за допомогою мікро-



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

контролера для вимірювання аналогового сигналу з частотою дискретизації 400 Гц. Ці корисні ідеї можна використати під час розробки нової енергоефективної системи електроприводів автономного апарату, а от схеми контролю напруги і струмів двигунів доцільно зробити вбудованими, тобто невід'ємними складовими пристрою.

У БПЛА рекомендується застосовувати безколекторні двигуни постійного струму (БДПС), які допускають безпосереднє управління ротором без істотної втрати ефективності, тим самим усуваючи необхідність у редукторі, який був однією з причин вібрації в більш ранніх конструкціях [10]. Проводячи аналогії з роботами з автономним живленням, можна дійти до аналогічної рекомендації.

Тяга створюється кожним ротором за допомогою крутного моменту, що виробляє БДПС, причому динаміка кожного двигуна визначається

$$T_e = K_i i(t); \quad (1)$$

$$E = L di(t)/dt + R_a i(t) + K_e \omega(t), \quad (2)$$

де  $T_e$  – крутний момент, створюваний двигуном;  $E$  – напруга на двигуні;  $i(t)$  – струм, що проходить через двигун;  $\omega(t)$  – кутова швидкість обертання ротора.  $K_i$ ,  $R_a$  і  $K_e$  – це константи, характерні для двигуна, причому  $K_i$  – коефіцієнт крутного моменту;  $L$  – індуктивність, а  $R_a$  – загальний опір якоря двигуна;  $K_e$  – постійна проти-ЕРС.

У підсумку в [10] виводиться, що тяга, створювана ротором, пропорційна квадрату напруги на двигуні. Кути крену, тангажу та ризикання регулюються диференціальною тягою. Різниця тяги між протилежними двигунами забезпечує крутний момент крену й тангажу. Диференціальна тяга між двома парами двигунів, що обертаються у протилежних напрямках, забезпечує крутний момент ризикання.

У [14] отримано модель динаміки квадрокоптера з використанням рівнянь Ньютона та Ейлера, запропоновані стратегії керування, а поведінка квадрокоптера спостерігається у віртуальній реальності за допомогою Simulink 3D Animation.

У [11] розроблено імітатор на основі Matlab-Simulink. За допомогою цього вдалося перевірити точність моделі й надійність алгоритмів керування. Крім того, 3D-графічний інтерфейс і вхід джойстика полегшили тестування системи. Також описано процес ідентифікації констант, зокрема, порівняння сталих, отриманих різними методами.

У підручнику з моделювання мехатронних систем у середовищі Matlab-Simulink [17] описані бібліотеки Simulink і Sim Power System для дослідження цих систем. Зазначено, що БДПС – це пристрої, в яких магнітоелектрична синхронна машина з трапецеїдальним розподілом магнітного поля в зазорі включена до замкнутої системи з використанням датчика положення ротора та напівпровідникового комутатора (НПК). У цьому пристрої на виході НПК і, відповідно, на обмотках синхронної машини, формується прямокутна напруга. Для отримання положення ротора в БДПС використовуються імпульсні датчики, а регулювання швидкості здійснюється за рахунок зміни напруги живлення НПК.

У [12] сформульовано проблему динаміки чотирьох двигунів, які використовуються у квадрокоптері для управління 6 ступенями свободи апарату. Стверджується, що передавальна функція першого порядку є достатньою для представлення динаміки ротора, що використовується в безпілотній системі чотирьохроторного типу.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3)$$

У [9] представлено конструкцію телеуправління для мініатюрного безпілотного літального апарату. Як основа для проектування керування виведена проста динамічна нелінійна модель БПЛА, що діє для квазістаціонарних умов польоту. Розроблено контроль за положенням, який базується на інформації, знятій з інерціальної системи вимірювання. Для того щоб контролювати висоту БПЛА, розроблено адаптивний контролер, що уникає

наземних впливів і ґрунтується на вимірюваннях, отриманих від ультразвукового датчика низької вартості. Для обчислення вертикальної швидкості використовується оцінка на основі запропонованої моделі. Також наведені експериментальні результати.

Стаття [13] є оглядом, який присвячений математичному моделюванню квадрокоптера та ідентифікації параметрів, які використовуються в представлених моделях. Параметри моделі (довжина плеча, загальна маса квадрокоптера, матриця інерції, коефіцієнти тертя, тяги та опору) можна отримати за допомогою експерименту, розрахунку або поєднання обох способів. Експериментальна ідентифікація виконавчого механізму зазвичай вимагає використання випробувального стенда.

Динамічні показники та робастність системи електроприводів мають вирішальне значення для продуктивності та надійності квадрокоптера. У невеликих квадрокоптерах здебільшого використовують одиночні силові польові транзистори (FET), модулюючи напругу привода на кожному двигуні з постійними магнітами [7]. У більш великих апаратах використовують БДПС з електронними регуляторами швидкості (electronic speed controllers – ESC). Для отримання максимальної продуктивності ESC мають бути належним чином сконструйовані. Найчастіше використовують ESC літальних апаратів для хобі, оскільки вони доступні та мають малу вагу. Однак у них є кілька недоліків.

Розробляючи професійний квадрокоптер, треба мати на увазі, що хобі-контролери часто мають вбудований обмежувач пікового струму, який протікає під час крокової зміни швидкості (до 100 А в приводі X-4 [7]). Відсутність обмеження пікового струму може призвести до просідання напруги шини живлення внаслідок внутрішнього опору акумуляторів, що призведе до скидання авіоніки. Сильні сплески можуть навіть призвести до пошкодження ланцюгів комутації ESC. Щоб уникнути цих проблем, швидкість роботи ESC змінюється повільно, збільшуючи час реакції та обмежуючи пропускну здатність привода. У випадку з Flyer X-4 хобі-контролери швидкості з обмеженим піковим струмом не встигали реагувати, щоб стабілізувати БПЛА.

Переважно код мікроконтролера для хобі ESC та внутрішні системи недоступні; у такому ESC не існує прямого вимірювання швидкості обертання ротора, що може потребувати додаткових датчиків. У [7] зазначено, що керування швидкістю за допомогою хобі-обладнання з високим коефіцієнтом підсилення замкненого контуру із частотою оновлення всього лише 50 Гц для Flyer X-4 неможливо. Доступні зараз програмовані хобі ESC можуть бути підключені до комп'ютера для тонкої настройки та пристосовані для керування швидкістю великого квадрокоптера. Однак у високопродуктивному квадрокоптері майже напевно треба використовувати електроприводи власної розробки, як у випадку з Ascending Technologies [1].

Щоб забезпечити автоматичну стабілізацію положення квадрокоптера, потрібна висока динаміка тяги, для чого мотори мають бути в змозі швидко розганяти ротори. На більшості відомих квадрокоптерів встановлюють легкі ротори, що дозволяє миттєво змінювати швидкість без додаткового контролю. Великі квадрокоптери мають більш важкі, високоінерційні ротори, а тому потрібно локальне керування для штучного покращення динаміки двигуна. На практиці продуктивність роботи замкнутої системи керування найбільш сильно обмежена максимальним миттєвим струмом батарей, і це домінує в розробці системи керування автономного апарата.

Динаміку швидкості БДПС можна представити однополюсною динамічною системою, для якої підходить пропорційне керування зі зворотним зв'язком [7]. Коефіцієнт підсилення системи керування, який можна реалізувати, обмежений максимальним піковим значенням, яке потрібне для парирования збурень і завдань, і, водночас, не викликає несправності в контролері. Метод розрахунку оптимізованої системи управління для привода з насиченим піковим значенням описаний у [18].

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Якщо забезпечена достатня пропускна здатність, регулятора двигуна не потрібно підтримувати точну швидкість обертання ротора – система управління положенням всього БПЛА компенсує завдання моторів для стабільного польоту апарата. При цьому сили тяги як у вертикальному напрямі, так і паралельно Землі, пропорційні квадрату швидкості обертання роторів [11; 16].

У [16] динаміка ротора загалом була ідентифікована та підтверджена за допомогою інструменту ідентифікації MATLAB. Зазначено, що функції передачі першого порядку достатньо для відтворення динаміки між заданою та реальною швидкістю пропелера.

Розробка симулятора OS4 [8] супроводжувалась послідовними вдосконаленнями динамічної моделі, схеми управління та апаратного забезпечення робота. Остання версія включає ідентифіковану динаміку виконавчого механізму, аеродинамічний блок, контролер уникнення перешкод та планувальник високого рівня для визначення точок маршруту. Кожен блок описується одним або декількома файлами Matlab і може бути легко включений в інші симулятори.

Нарешті, в [8; 16] наводиться вираз для входів моделі квадрокоптера у просторі станів  $U_1, U_2, U_3, U_4$ , які, фактично, є виходами контролера керування положенням:

$$\begin{cases} U_1 = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2); \\ U_2 = b(-\Omega_1^2 + \Omega_4^2); \\ U_3 = b(\Omega_1^2 - \Omega_3^2); \\ U_4 = d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2), \end{cases} \quad (4)$$

де  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$  – швидкості обертання роторів;  $b$  – коефіцієнт вертикальної (*thrust*), а  $d$  – коефіцієнт горизонтальної (*drag*) тяги. Змінна  $U_1$  описує лінійний рух апарата, у той час як змінні  $U_2, U_3, U_4$  характеризують повороти квадрокоптера.

Таким чином, першочерговими блоками Simulink, які потребують аналізу, виходячи з мети дослідження, є:

- безколекторні двигуни постійного струму (БДПС);
- автономні джерела живлення;
- схеми контролю напруги і струмів двигунів;
- елементи керування БДПС.

**Блоки Simulink для автономних апаратів.** Під час створення складної моделі в середовищі MATLAB зазвичай використовується Simulink Library Browser, що є деревоподібною ієрархічною структурою, де розміщено моделі окремих елементів. Так, в Simulink® (Ver. 9.0 2017b) представлено декілька моделей електричних двигунів із постійними магнітами, а також відповідних регуляторів та інших компонентів.

Передусім розглянемо ті розділи Simulink®, де згадуються моделі безколекторних двигунів постійного струму (БДПС, Brushless DC Motor, BDCM), а також синхронних двигунів із постійними магнітами (СДПМ, Permanent magnet synchronous motor, PMSM).

Група Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Fundamental Blocks / Machines містить модель Permanent Magnet Synchronous Machine, яку було вперше представлено у версії MATLAB R2006a. Компонент призначений для моделювання динаміки трифазної синхронної машини з постійним магнітом із синусоїдальною або трапецієподібною зворотною електрорушійною силою або динаміку п'ятифазної синхронної машини з постійним магнітом із синусоїдальною зворотною електрорушійною силою. Цей блок можна використовувати в режимі генератора або двигуна, що визначається знаком механічного крутного моменту  $T_m$  (позитивний для моторного режиму, негативний для генераторного). Електричні та механічні частини машини представлені моделлю другого порядку в просторі станів.

У синусоїдальній моделі створюваний постійними магнітами у статорі потік та електрорушійні сили синусоїдальні. Трапецієподібна модель припускає, що розподіл об-

моток і потік, що створюються постійними магнітами, виробляють три проти-ЕРС трапецеїдальної форми.

Трифазна трапецеїподібна модель електричної системи ґрунтується на рівняннях, які виражаються у фазовій системі координат (система abc). Індуктивність фази приймається постійною і не змінюється залежно від положення ротора.

Механічна система описується такими рівняннями:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J} (T_e - T_f - F \omega_m - T_m); \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_m, \end{cases} \quad (5)$$

де  $\omega_m$  – кутова швидкість ротора (механічна швидкість);

$J$  – комбінована інерція ротора і навантаження;

$T_e$  – електричний момент, що продукує двигун;

$T_f$  – момент статичного тертя валу;

$F$  – коефіцієнт в'язкого тертя ротора та навантаження;

$T_m$  – механічний момент на валу;

$\theta$  – кутове положення ротора.

Гнучкість використання описаної моделі забезпечується великою кількістю налаштувань за допомогою трьох вкладок:

- Configuration Tab;
- Parameters Tab;
- Advanced Tab.

Вкладка Advanced Tab, зокрема, містить кнопку Compute from standard specifications. За її допомогою можна увійти на сторінку power\_PMSynchronousMachineParams (рис. 1). На цій сторінці треба обрати вид проти-ЕРС (Sinusoidal / Trapezoidal), міжфазовий опір та індуктивність, які легко виміряти безпосередньо на двигуні. Залежно від наявних відомостей про двигун або вимірювань можна вибрати базову константу: напруги (Voltage) або моменту (Torque), які прямо пов'язані одна з одною. Для цих та інших параметрів, які треба задати (момент інерції, коефіцієнт в'язкого тертя), індивідуально обираються одиниці вимірювання.

Рис. 1. Сторінка «Compute from standard specifications» блока Permanent Magnet Synchronous Machine

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Вхідним сигналом моделі є крутний момент, застосований до вала (Torque,  $T_m$  в н·м). А от вихідний сигнал моделі – швидкість машини – визначається інерцією машини  $J$  і різницею між застосованим механічним моментом  $T_m$  і електромагнітним моментом, який виробляє машина, і який представлений вихідним параметром  $T_e$ .

Як приклад в таблиці наведено параметри БДПС DB59C024035-A. У графі «Ім'я» подане ім'я змінної у скриптовому файлі, який спрощує роботу з моделлю.

Таблиця

Параметри моделі БДПС DB59C024035-A

Ім'я	Значення	Одиниця вимірювання	Опис
Rpp	0.135	Ом	Опір між фазами статора двигуна
Rs	0.0675	Ом	Опір статора двигуна
Lpp	0.2	мГ	Індуктивність між фазами статора
Is	0.1	мГ	Індуктивність статора двигуна
Kt	0.044	Н·м/А	Постійна моменту двигуна
EMF	3.7	$V \cdot 1000/x6^{-1}$	Постійна проти-ЕРС двигуна
Jr	17.3e-6	$кг \cdot м^2$	Інерція ротора
Vd	0.6e-3	Н·м·с	В'язке тертя
Pp	6	–	Кількість пар полюсів
Sf	0	Н·м	Момент сухого тертя
IVPF	[Jr, Vd, Pp, Sf]	$[кг \cdot м^2, Н \cdot м \cdot с, -, Н \cdot м]$	Вектор значень: інерція, в'язке тертя, кількість полюсів, сухе тертя

Натискання на кнопки Compute Block Parameters та Apply to model дозволяє автоматично перерахувати решту параметрів моделі БДПС та розпочати процес симуляції. Таким чином вираховується опір та індуктивність статора. Слід принагідно зазначити, що MATLAB автоматично перераховує пікове значення постійної проти-ЕРС двигуна, у той час як у документації на БДПС часто дають значення цього коефіцієнта за середньоквадратичною напругою.

Приклад power\_brushlessDCmotor ілюструє використання блока Permanent Magnet Synchronous Machine block.

У групі Simscape / Power Systems / Simscape Components / Machines / Permanent Magnet Rotor є декілька моделей двигунів з постійними магнітами. Brushless DC Motor (безколекторний двигун постійного струму), представлений у MATLAB, розпочинаючи з версії R2013b, моделює синхронну машину з постійним магнітом, трифазним статором та обмотками зіркою. Модель має чотири варіанти завдання розподілу потоку постійного магніту як функції кута ротора. Для двох варіантів простої параметризації БДПС із трапецеподібною проти-ЕРС треба вказати або потокозчеплення, або проти-ЕРС. Інші два варіанти дають більш точні результати, використовуючи дані, наведені в документації на конкретний двигун. У цих випадках треба вказати або часткову похідну від потокозчеплення, або виміряну постійну проти-ЕРС для заданої швидкості ротора.

Ця модель більш деталізована порівняно з попередньою та передбачає задання великої кількості параметрів, а тому є найбільш гнучкою. Особливістю є можливість задання низки параметрів за допомогою таблиць. Деталізовані дані можна отримати на завершальній стадії розробки нової системи, коли за наявності фізичного макета, вдається провести вимірювання та уточнити параметри двигуна. Моделювання, як і раніше, матиме сенс, оскільки допоможе спростити налаштування системи керування.

Декілька моделей електричних двигунів представлені в розділі Simulink®, який присвячений силовим агрегатам електромобілів. Так, у Powertrain Blockset / Propulsion / Electric Motors можна знайти Flux-Based PMSM (СДПМ на

основі потоку), Interior PMSM (внутрішній СДПМ), Mapped Motor (відображений двигун), Surface Mount PMSM (СДПМ для поверхневого монтажу). Зважаючи на специфіку застосування цих двигунів, досить відмінну від такої для автономних апаратів, розглядати їх тут не будемо.

Також у групі Simscape / Electronics / Actuators & Drivers / Rotational Actuators є ще один варіант моделі СДПМ – FEM-Parameterized PMSM із заданням параметрів за допомогою табличних даних магнітного потоку двигуна як функції струму і кута ротора. Цим способом сторонні пакети кінцевих елементів (Finite Element Magnetic, FEM) зазвичай експортують інформацію про потік. Через табличну форму потік може змінюватися нелінійним чином як від кута ротора, так і від струму. Тому цей блок можна використовувати як для моделювання СДПС із трапецеподібним профілем проти-ЕРС (тобто БДПС), так і зі звичайним СДПС. Ця модель могла б бути в нагоді під час розробки самого двигуна, отже, зважаючи на мету цього дослідження, використовувати її не будемо.

**Інші блоки Simulink для систем електроприводів.** У групі Simscape / Power Systems / Specialized Technology / Electric Drives / AC Drives є, зокрема, модель Brushless DC Motor Drive (привод безконтактного двигуна постійного струму). Цей привод має замкнутий контур регулювання швидкості за допомогою струму статора, використовуючи датчики Холла. Контур регулювання швидкості задає опорний електромагнітний момент машини. Опорні фазові струми статора, які відповідають заданому моменту, виводяться на основі константи крутного моменту машини і сигналів датчика Холла. Потім опорні фазові струми використовуються для отримання необхідних сигналів затвора для інвертора через регулятор струму з гістерезисом.

Головною перевагою цього привода в порівнянні з керованими напругою ШІМ-інверторами БДПС є його плавна динамічна реакція. Цей привод забезпечує властивість обмеження струму/ крутного моменту під час запуску та прискорення двигуна. Однак для належного функціонування привод потребує замкненого керування крутним моментом на основі сигналів струмів машини.

Блок Brushless DC Motor Drive використовує такі елементи бібліотеки Electric Drives / Fundamental Drive Blocks (Електричні приводи / Блоки фундаментальних приводів):

- Speed Controller AC (контролер швидкості);
- Current Controller (Brushless DC) (контролер струму БДПС);
- DC Bus (шина постійного струму);
- Three-Phase Inverter (трифазний інвертор).

Модель Current Controller (Brushless DC) являє собою гістерезисний контролер струму для використання з БДПС. Модель має два режими роботи, у яких інвертор може бути представленим детально або спрощено, за середнім значенням.

Блок PWM Generator (2-Level) (дворівневий ШІМ-генератор) генерує імпульси для перетворювачів на основі ШІМ, використовуючи дворівневу топологію. Блок може керувати комутаційними пристроями (FET, GTO або IGBT) трьох різних типів перетворювачів: однофазний напівмостовий (1 плече), однофазний повний міст (2 плеча) або трифазний міст (3 плеча). Опорний сигнал (вхід Uref), який також називають модулюючим, порівнюється із симетричним несучим сигналом трикутної форми. Коли опорний сигнал більший за несучий, для верхнього вентиля виробляється імпульс з рівнем «1», а для нижнього – «0».

Для управління однофазним повномостовим пристроєм можна вибрати однополярну або біполярну ШІМ-модуляцію. За допомогою однополярної модуляції кожне плече

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

контролюється незалежно. Другий опорний сигнал внутрішньо генерується шляхом зсуву фази опорного сигналу на 180 градусів. Використання біполярної модуляції передбачає синфазну роботу (стан) нижнього комутаційного пристрою другого плеча та верхнього перемикача першого плеча, а також верхнього вентиля другого плеча та нижнього вентиля першого плеча. Уніполярна модуляція створює якіснішу форму змінного струму, але діапазон регулювання напруги малий.

Блок Battery з групи Electric Drives / Extra Sources реалізує загальну динамічну модель, параметризовану для представлення найбільш популярних типів акумуляторних батарей. Параметри еквівалентної схеми можуть бути модифіковані для представлення конкретного типу батареї, виходячи з її розрядних характеристик. Типова крива розряду складається з трьох ділянок.

Перша ділянка являє собою експоненціальне падіння напруги після зарядки акумулятора від повністю зарядженого стану до номінального значення. Друга ділянка характеризує заряд, який можна взяти з батареї, поки напруга не впаде нижче номінальної. Нарешті, третя ділянка представляє тотальний розряд акумулятора, коли напруга швидко спадає.

Модель дозволяє досліджувати вплив температури та старіння (внаслідок циклічності) на ємність літій-іонного акумулятора, для чого використовуються відповідні рівняння. Дуже важливою властивістю моделі з погляду цього дослідження є також можливість відображення динаміки зміни напруги (часу відгуку акумулятора) при ступеневій зміні струму навантаження. Крім того, модель дозволяє спиратися на детальні параметри батареї, взяті з технічної документації (Data Sheets), а також отримані в результаті простих експериментів.

Група Electric Drives/Fundamental Drive Blocks, зокрема, містить блок Inverter (Three-Phase з версії MATLAB R2015b), призначений для моделювання стандартного трьохплечевого, дворівневого інвертора (детальний режим) або інвертора за середнім значенням напруги (усереднений режим). Середній режим має декілька варіантів залежно від типу двигуна змінного струму й дозволяє зменшити вимоги до продуктивності комп'ютера, який застосовується під час моделювання. У детальному режимі блок Inverter (Three-Phase) є екземпляром блоку універсального мосту (Universal Bridge), сконфігурованого у вигляді триланкового (трифазного) примусово-комутованого перетворювача. У цьому варіанті моделі можна обрати тип силового вентиля (GTO, MOSFET або IGBT).

**Комплексна модель електропривода для автономного апарата.** Наведена на рис. 2 модель базується на доопрацьованому прикладі Brushless DC Motor Fed by Six-Step Inverter (Examples > Simscape Power Systems > Specialized Technology > Machine Models power\_brushless DCmotor.slx).

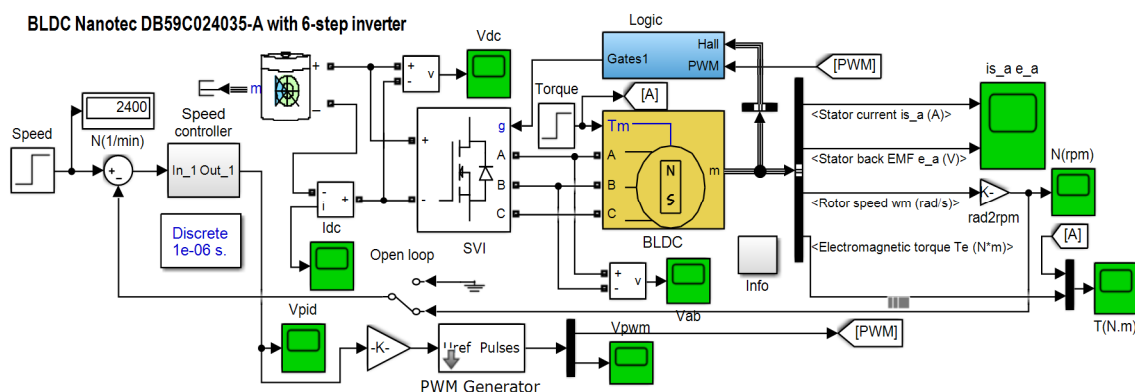


Рис. 2. Модель електропривода автономного апарата

Шина постійного струму інвертора (SVI) підключена безпосередньо до акумуляторної батареї. Модель дозволяє працювати в режимі прямого ШІМ-регулювання одночасно всіма 6 вентилями АІН. Для керування трьома напругами фазних обмоток А, В, С статора двигуна (BLDC) використовується регулятор швидкості (Speed controller), вихідний сигнал якого впливає на коефіцієнт заповнення імпульсів, що генерує дискретний ШІМ-генератор (PWM Generator). Сигнали затворів MOSFET інвертора виробляються шляхом декодування сигналів датчиків Холла на двигуні та домішування до них сигналу PWM за допомогою блока Logic.

Модель дозволяє досліджувати вільний хід двигуна. Для цього потрібно перемкнути тумблер у положення «Open loop» і встановити задану швидкість у значення холостого ходу ( $SPEED = NO\_LOAD\_SPEED = 4500 \text{ хв}^{-1}$  відповідно до технічних параметрів двигуна). За допомогою блоку Torque можна ступенево змінити момент навантаження з нульового значення (коли рух двигуна зумовлений інерцією ротора та заданими значеннями в'язкого та сухого тертя) до номінального. Якщо виконуються всі зазначені умови, швидкість обертання ротора двигуна знижується до паспортного значення  $SPEED\_RATED = 3500 \text{ хв}^{-1}$ . Вибір двигуна та завдання параметрів моделі здійснюється у відповідному скриптовому файлі.

**Експериментальні дослідження системи.** На рис. 3 показаний результат моделювання перехідного процесу швидкості ротора електропривода автономного апарата із замкнутою системою керування. Параметри двигуна відповідають таблиці. У момент часу  $t = 0$  з блока Speed подається сигнал завдання швидкості  $2000 \text{ хв}^{-1}$ . Після перехідного процесу тривалістю близько  $7 \text{ мс}$  система відпрацьовує завдання холостого ходу з невеликою похибкою. У момент часу  $Torque\_Step\_time = 40 \text{ мс}$  блок Torque змінює значення момент навантаження з  $Torque\_Initial\_value = 0$  на  $Torque\_Final\_value = 0,6 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Стрибкоподібне збільшення навантаження змушує регулятор формувати відповідний керуючий вплив для ШІМ-генератора, що супроводжується підвищенням фазних струмів електродвигуна.

Усі інші сигнали системи можна спостерігати за допомогою відповідних блоків візуалізації.

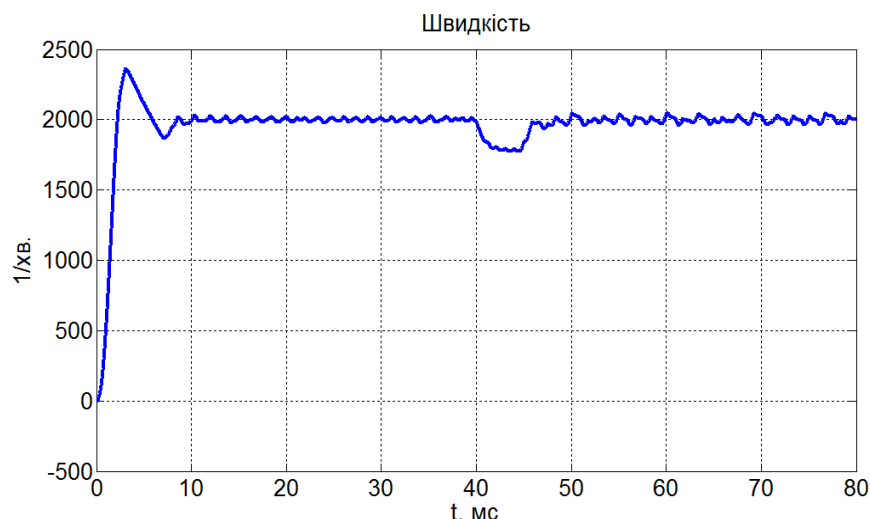


Рис. 3. Перехідний процес швидкості ротора електропривода автономного апарата

**Висновки відповідно до статті.** Проведений аналіз розробок БПЛА та автономних роботів підтверджує актуальність застосування MATLAB® та Simulink® для досліджень цих автономних апаратів. При цьому:



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

- схеми контролю напруги і струмів двигунів доцільно зробити вбудованими, тобто невід’ємними складовими самого автономного апарата;
- для високопродуктивних апаратів треба використовувати електроприводи власної розробки з якісною динамікою та можливістю доступу до всіх елементів;
- у розробці системи керування автономним апаратом домінує наявне обмеження миттєвого струму батарей, яке критично впливає на динаміку замкнутого контуру;
- якщо забезпечена достатня пропускна здатність, регулятора двигуна не потрібно підтримувати точну швидкість обертання ротора – система управління положенням всього БПЛА компенсує завдання окремих моторів для стабільного польоту апарата;
- тяга, створювана ротором, пропорційна квадрату напруги на двигуні, і в системах керування мультироторними БПЛА треба враховувати цей факт під час відпрацювання завдання та лінеаризації траєкторій руху;
- на стадії фізичного макетування системи електроприводів автономного апарату з метою спрощення настроювання системи керування доцільно використовувати більш точні моделі Simulink, що спираються на табличне завдання параметрів, які можна отримати за результатами випробувань.

Подальші дослідження доцільно зосередити в напрямку аналізу моделей силових частини елементів, а також розробки алгоритмів [19; 20] систем керування. Особливу увагу треба приділити дослідженню контуру струму, базовий варіант якого представлений блоком Current Controller (Brushless DC) (контролер струму БДПС).

**Список використаних джерел**

1. Ascending Technologies GmbH, 2019. URL: <http://www.asctec.de/en>.
2. Mathworks: Products and Services. URL: <https://www.mathworks.com>.
3. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. Москва: ДМК Пресс, 2012. 768 с.
4. Zamboni L. Getting Started with Simulink. Birmingham: Packt Publishing, 2013. 115 p.
5. Quadcopter Project. URL: [https://ww2.mathworks.cn/help/aeroblks/quadcopter-project.html?s\\_tid=srchtitle](https://ww2.mathworks.cn/help/aeroblks/quadcopter-project.html?s_tid=srchtitle).
6. Prouty R. Helicopter Performance, Stability, and Control. Malabar: Krieger Pub., 2005. 731 p.
7. Ponds P., Mahony R., Corke P. Modelling and control of a large quadrotor robot. *Control Engineering Practice*. 2010.
8. Bouabdallah S. *Design and control of quadrotors with application to autonomous flying*. PhD dissertation, EPFL, 2007.
9. Guenard N. et al. Control laws for the tele operation of an unmanned aerial vehicle known as an x4-flyer. Proc. (IEEE) International Conference on Intelligent Robots (IROS'06). Beijing, China, 2006.
10. Hoffmann G., Huang H., Waslander S., Tomlin C. *Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment*. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2007. 6461 p.
11. Bresciani T. *Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter*. Master's thesis, Lund University, Sweden, 2008.
12. Kamran Joyo M., Ahmed S.F., Desa H., Tanveer M. H., Warsi F.A. *Position Controller Design for Quad-rotor under Perturbed Condition*. Wulfenia Jnl., 2013. Vol. 20. No. 7. P. 178-189.
13. Chovancová A., Fico T., Chovanec L., Hubinský P. *Mathematical Modelling and Parameter Identification of Quadrotor (a survey)*. Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems MMaMS 2014. Procedia Engineering 96, 2014. P. 172-181.
14. Sabatino F. *Quadrotor control: modeling, nonlinear control design, and simulation*. Master's Degree Project. Stockholm, Sweden. KTH Electrical Engineering, June 2015.
15. Денисов Ю., Шаповалов О., Серeda О., Куц Є. Оптимізація енергодинамічних процесів у системі керування приводом стабілізації польоту безпілотного літального апарата. *Технічні науки та технології*. 2018. № 3 (13). С. 187–195.
16. Bouabdallah S., Siegwart R. Full Control of a Quadrotor. *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. P. 153–158.

17. Герман-Галкин. С. Г. *Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК*. Санкт-Петербург: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
18. Ponds P., Mahony R., Corke P. Design of a static thruster for microair vehicle rotorcraft. *Journal of Aerospace Engineering*. 2009. № 22(1). P. 85-94.
19. Войтенко В. П. Адаптивное квазиоптимальное регулирование в преобразователях с нейросетевой моделью силовой части. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 26–28.
20. Войтенко В. П. Квазиоптимальные промышленные регуляторы с нейроидентификацией объекта управления: монография. Чернигов: Чернигов. гос. техн. ун-т, 2013. 261 с.

### References

1. *Ascending Technologies GmbH* (2019). Retrieved from <http://www.asctec.de/en>.
2. *Mathworks: Products and Services* (2019). Retrieved from <https://www.mathworks.com>.
3. Diakonov, V. P. (2012). *MATLAB. Polnyi samouchitel [Complete tutorial]*. Moscow: DMK Press [in Russian].
4. Zamboni, L. (2013). *Getting Started with Simulink*. Birmingham: Packt Publishing.
5. *Quadcopter Project* (2019). Retrieved from [https://ww2.mathworks.cn/help/aeroblks/quadcopter-project.html?s\\_tid=srchtitle](https://ww2.mathworks.cn/help/aeroblks/quadcopter-project.html?s_tid=srchtitle).
6. Prouty, R. (2005). *Helicopter Performance, Stability, and Control*. Malabar: Krieger Pub.
7. Ponds, P., Mahony, R., Corke, P. (2010). *Modelling and control of a large quadrotor robot*. Control Engineering Practice.
8. Bouabdallah, S. (2007). *Design and control of quadrotors with application to autonomous flying*. PhD dissertation, EPFL.
9. Guenard, N. et al. (2006). Control laws for the tele operation of an unmanned aerial vehicle known as an x4-flyer. *Proc. (IEEE) International Conference on Intelligent Robots (IROS'06)*, Beijing, China.
10. Hoffmann, G., Huang, H., Waslander, S., Tomlin, C. (2007). Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*.
11. Bresciani, T. (2008). *Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter*. Master's thesis, Lund University, Sweden.
12. Kamran Joyo, M., Ahmed, S.F., Desa, H., Tanveer, M. H., Warsi, F.A. (2013). Position Controller Design for Quad-rotor under Perturbed Condition. *Wulfenia Jrnl.*, 20, 7, 178-189.
13. Chovancová, A., Fico, T., Chovanec, L., Hubinský, P. (2014). *Mathematical Modelling and Parameter Identification of Quadrotor (a survey)*. Modelling of Mechanical and Mechatronic Systems MMaMS 2014. – Procedia Engineering 96.
14. Sabatino, F. (2015). *Quadrotor control: modeling, nonlinear control design, and simulation*. Master's Degree Project. Stockholm, Sweden. KTH Electrical Engineering.
15. Denisov, Y., Shapovalov, O., Sereda, O., Kuts, Y. (2018). Optyimizatsiya enerhodynamichnyh protsesiv u systemi keruvannia pryvodom stabilizatsii poliotu bezpilotnoho litalnoho aparata [Optimization of energy dynamical processes in the control system of the drive for stabilizing the flight of the unmanned aerial vehicle]. *Technical sciences and technologies – Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 3 (13), 187-195 [in Ukrainian].
16. Bouabdallah, S., Siegwart, R. (2007). Full Control of a Quadrotor. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
17. German-Galkin, S. G. (2008). *Matlab & Simulink. Proektirovanie mehatronnyh system na PK [Designing mechatronic systems on a PC]*. SPb.: Korona-Vek [in Russian].
18. Ponds P., Mahony R., Corke P. (2009). Design of a static thruster for microair vehicle rotorcraft. *Journal of Aerospace Engineering*, 22(1), 85-94.
19. Voytenko, V. P. (2016). Adaptivnoye kvaziopimalnoe regulirovanie v preobrazovateliah s neyrosetevoy nodeliyu silovoy chasti [Adaptive quasi-optimal regulation in converters with a neural network model of the power unit]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamic*, 5, 26-28 [in Russian].
20. Voytenko, V. P. (2013). *Kvasiopimalnye promyshlennye reguliatory s neyroidentifikatsiyei ob'ekta upravleniya [Quasi-optimal industrial controllers with neuro-identification of the plant]*. Chernigov: ChDTU [in Russian].

*Volodymyr Voytenko, Roman Yershov*

## MODELS OF ELEMENTS OF THE ELECTRIC DRIVE SYSTEM OF THE QUADROPTERS AND AUTONOMOUS ROBOTS

**Urgency of the research.** Minimizing the power consumption of unmanned aerial vehicles (UAVs) or robots can increase the degree of autonomy (range, speed, or operation time).

**Target setting.** In the circuit level multi-domain simulation framework Simulink®, which is integrated with MATLAB®, several models of electric motors, standalone power supplies and control elements are presented. Adequate selection of blocks to successfully reproduce a prototype of a real physical control system requires a separate solution.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Most publications on modeling in this subject area are either focused on a detailed description of working with MATLAB® and Simulink®, or on modeling and controlling the dynamics of autonomous vehicles to provide positioning in space.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** The issue of optimizing the power consumption of a standalone multi-drive object remains unaddressed.

**The research objective.** The study focuses on the analysis of existing Simulink models of motors, batteries and controls that could be used to further develop a control system for UAV or robot with standalone power.

**The statement of basic materials.** Features of modeling of autonomous devices are considered, dynamics of a separate motor is determined, requirements for accuracy of stabilization of rotor speed are formulated, Simulink blocks for autonomous devices are analyzed, on the basis of which a complex model of electric drive for autonomous apparatus is proposed.

**Conclusions.** Modeling the drive systems of autonomous vehicles is useful both at the initial design stage and in the presence of a physical layout, since it significantly reduces the time and material resources required to develop an energy-efficient control system.

**Keywords:** model of electric drive; MATLAB; Simulink; Unmanned Aerial Vehicle (UAV); autonomous robot; power consumption; brushless DC-motor (BLDC).

*Fig.: 3. Table: 1. References: 20.*

**Войтенко Володимир Павлович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки, робототехніки, автоматики та мехатроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Voytenko Volodymyr** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** volodymyr.voytenko@inel.stu.cn.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-1490-0600>

**ResearcherID:** F-8698-2014

**Scopus Author ID:** 36167678700

**Єршов Роман Дмитрович** – старший викладач кафедри електроніки, робототехніки, автоматики та мехатроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Yershov Roman** – senior lecturer of the Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** roman.d.yershov@gmail.com

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0267-2906>

**ResearcherID:** H-1432-2016

**Scopus Author ID:** 57188719994

УДК 621.3.08

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-188-196

Віктор Шевченко, Ігор Кондратенко, Олександр Гусев,  
Олег Хоменко, Костянтин Тительмаєр

## ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МОДЕЛІ ДВОШАРОВОЇ КОТУШКИ ІНДУКТИВНОСТІ ДЛЯ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

*Актуальність теми дослідження.* Ця тема є актуальною у зв'язку зі зростаючим попитом та інтересом до бездротових зарядних пристроїв з боку дослідників та користувачів.

*Постановка проблеми.* У процесі розробки систем бездротової передачі енергії дослідникам потрібно проектувати котушки індуктивності з різною точністю параметрів відповідно до поставлених завдань. Тому необхідно знати, наскільки точно можна розробити модель котушки індуктивності в одному з популярних пакетів.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Були розглянуті останні публікації про різні програми, що використовуються для моделювання електромагнітних процесів. З джерел про будову котушок індуктивності зібрано необхідну інформацію для аналізу й порівняння.

*Виділення недосліджених частин загальної проблеми.* Досі не було зібрано та узагальнено у зручному для порівняння вигляді інформацію про різні структури, будову і складові котушок індуктивності для бездротової передачі енергії. Питанням точності моделей котушок індуктивності у програмах, що ґрунтуються на методі скінчених елементів, також не приділялось достатньо уваги.

*Постановка завдання.* Основне завдання полягає в оцінці точності моделювання двох однакових двошарових котушок для бездротової передачі електроенергії у відповідній програмі за методом скінчених елементів.

*Виклад основного матеріалу.* Проведено аналіз структури індуктивностей, а саме геометрії обмотки, форми й матеріалу феритового осердя та його ролі екранування електромагнітного поля та напрямлення потоку магнітної індукції на значення індуктивності. Розроблено та запропоновано спрощену модель індуктивності й визначено її електромагнітні параметри.

*Висновки відповідно до статті.* Підтверджено результати моделювання двошарових котушок, чим доведено, що ANSYS EM Suite є точним та надійним інструментом і навіть спрощені моделі індуктивностей цілком задовольняють вимоги інженерів та дослідників.

*Ключові слова:* бездротова передача енергії; індуктивна передача енергії; геометрія котушки; магнітний потік; форма осердя; екранування; моделювання методом скінчених елементів, двошарова котушка.

Рис.: 4. Табл.: 2. Бібл.: 19.

*Актуальність теми дослідження.* При зростаючому інтересі до бездротової передачі енергії та технічних вимог до бездротових зарядних пристроїв актуальною є тема про використання програмних засобів для моделювання електромагнітної частини системи бездротової передачі енергії.

*Постановка проблеми.* При проектуванні котушки індуктивності визначення певних геометричних та електромагнітних параметрів аналітичними методами може бути об'ємним і складним завданням. Для канонічних форм котушок використовуються емпіричні та приблизні формули. Складні форми котушок іноді подають як комбінацію канонічних форм, що не завжди приводить до достовірного результату. Тому для оптимізації та дослідження різних параметрів котушок індуктивності доцільно звернутись до чисельних методів розрахунку електромагнітного поля. Найбільшого поширення нині набув метод скінчених елементів (МСЕ), який реалізовано у відомих прикладних комерційних і академічних пакетах. Такі пакети прикладних програм пристосовані для розв'язку різноманітних задач, які описуються диференціальними рівняннями з граничними умовами різного ступеня формалізації, що, безперечно, передбачає певну точність результатів розрахунку параметрів індуктивності котушки. Отже, важливим та актуальним завданням є потреба з'ясувати, яка точність визначення параметрів може бути в моделі котушок індуктивності з більш складною геометрією.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Дослідники та інженери переважно використовують такі комерційні та академічні версії пакетів на основі МСЕ: ANSYS Maxwell [1-5], FEMM [2], [6-8], COMSOL [9; 10], 3D JMAG [11], [12], ANSOFT [13], Infolytica Magnet [14] та багато інших. Також для повного прогнозування роботи розроблених котушок виконується їх термічне моделювання [6]. Майже в усіх перелічених роботах не приділяється великого значення оцінці точності моделей.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

У статті [2] проведено порівняння моделі котушок індуктивності у програмах FEMM та ANSYS. Зазначено, що для простих одношарових круглих котушок індуктивності при потужності 5 кВА в ANSYS можна досягти вдвічі кращої точності визначення значень індуктивності. Показано, що похибка обчислення для магнітного поля порівняно з експериментальним вимірюванням за допомогою промислового приладу становить близько 10 % для обох пакетів [2].

В ANSYS є можливість побудови та дослідження електричної схеми із застосуванням попередньо змодельованих котушок. Але не враховано певні важливі параметри електронних компонентів, перш за все це стосується напівпровідників. Тому визначення втрат потужності всієї схеми, електричних параметрів може бути з похибкою, що більша за інженерну точність. У роботі [2] зазначено, що похибка для загальних втрат потужності становила близько 15 % при максимально точних налаштуваннях.

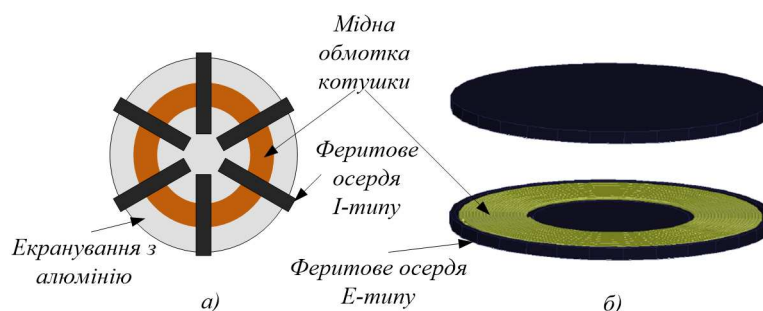
Академічні навчальні версії FEMM мають простий та інтуїтивний інтерфейс і дозволяють імітувати прості моделі та бачити обмежену кількість електромагнітних параметрів лише у двовимірній постановці. Пакети ANSYS, COMSOL – це потужні універсальні інструменти з комерційною ліцензією та відносно складним розвинутим інтерфейсом. Оскільки об'єктом дослідження є двошарові котушки індуктивності з подвійним намотуванням, потрібен потужний і досконалий інструмент для побудови моделі та визначення основних електромагнітних параметрів.

**Постановка завдання.** Основне завдання полягає в оцінці точності моделювання двох однакових двошарових котушок для бездротової передачі електроенергії у відповідній програмі за методом скінчених елементів.

**Виклад основного матеріалу. Геометрія котушки, матеріал осердя та екранування.**

У цій статті під бездротовою передачею енергії (БПЕ) мається на увазі індуктивний спосіб передачі енергії (ІСПЕ).

Структура котушки для бездротової передачі електроенергії (БПЕ) здебільшого складається з обмотки з мідного дроту, феритового осердя, екрануючої пластини (рис. 1) [15]. Добре відомо, що використання літцендрату замість звичайного мідного дроту з однаковим поперечним перерізом значно збільшить площу поверхні і, отже, зменшить скін-ефект на середніх і високих частотах [16]. Використання літцендрату також дозволяє зменшити масогабаритні параметри котушок індуктивності, покращуючи добротність та зменшуючи активний опір [15].



*Рис. 1. Структура котушки індуктивності для БПЕ:  
а – типова будова круглої котушки для електричних автомобілів;  
б – круглі котушки з феритовим осердям E-типу*

Джерело: [15].

Найчастіше використовуються круглі, квадратні та прямокутні форми котушок [6]. Геометрія круглої котушки забезпечує більший коефіцієнт магнітного зв'язку на одиницю площі поверхні [3]. Крім того, відомо, що на високих частотах опір провідника, зігнутого під прямим або гострим кутом, буде більшим. Останнє пояснює перевагу круглої котушки

перед прямокутною, оскільки ефективність передачі енергії здебільшого визначається добутком добротності індуктивності ( $Q$ ) і коефіцієнта магнітного зв'язку  $k$  [10]. Це і призводить до підвищення ефективності передачі енергії круглою котушкою [4; 5; 10].

Що стосується інших, більш складних і модифікованих форм котушок, вони представлені в [3; 17]. Було проведено їх порівняння, переваги та недоліки і рекомендації щодо застосування були відмічені та показані в табл. 1. За даними досліджень [3; 17], найкращими формами котушки є кругла та подвійна квадратна (Double-D Quadrature (DDQ)). Найкращий результат для щільності магнітного потоку отримано для геометрії DDQ, не набагато гірший результат – круглої геометрії [17].

Осердя необхідне для підвищення коефіцієнта зв'язку, індуктивності, взаємної індуктивності та добротності між котушками. Також осердя зменшує розповсюдження магнітного поля за межами взаємодії котушок. Для круглих котушок найпоширенішими формами осердь можуть бути плоска пластина, осердя Е-типу та U-типу [15]. Плоска пластина має найпростішу форму й добре відповідає конструктивно-функціональним вимогам [4]. У промисловості частіше використовують феритове осердя прямокутної форми, як більш універсальне та просте у виробництві.

Матеріал для екранування та спрямування магнітного потоку повинен забезпечувати хороший коефіцієнт зв'язку, утримувати й направляти магнітний потік, захищати від електромагнітного випромінювання [3]. Ферит є найбільш підходящим матеріалом через високу відносну проникність та малі втрати на високих частотах [3]. Одним із недоліків феритової структури великих розмірів є крихкість матеріалу та значне збільшення ваги всієї електромагнітної частини системи БПЕ.

Електромагнітне поле також змінюється зі збільшенням робочої частоти та потужності передачі. Магнітне поле індуктує вихрові струми в металевому об'єкті, який розташований на котушці приймача або поблизу нього, що призводить до додаткових втрат та можливого нагрівання об'єкта. Екранування мінімізує розповсюдження магнітного поля та зменшує його вплив на навколишній матеріал і тканини людини.

Екранування може бути з магнітних матеріалів (фериту) або металевих матеріалів (найчастіше з алюмінію), пасивним та активним [18]. Наприклад, для електромобілів пасивне екранування алюмінієвою пластиною є найпоширенішим методом зниження інтенсивності електромагнітного поля поза робочої зони завдяки простоті, надійності та відносно невисокій вартості [19]. Проте у випадку передачі потужності до декількох сотень ват екранування з фериту буде більш доречним, і його буде достатньо.

Результати проаналізованих джерел літератури [1–19] узагальнені в порівняльній табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння основних складових структури котушки

Параметр	Порівняльна пара	Переваги	Недоліки
1	2	3	4
Форма обмотки котушки	Кругла	Особливості: 1) Найпростіша структура для виготовлення; 2) Всенаправлені характеристики [17]; 3) Мінімальні втрати провідності у дротах обмотки [10].	
	Прямокутна і квадратна	Особливості: 1) Максимальна площа передачі [10]; 2) Симетричні характеристики [17]; 3) Добре підходить для пристроїв прямокутної форми, наприклад смартфонів [18].	

1	2	3	4
Конфігурація котушки	Проста (кругла, прямокутна, квадратна)	1) Стандартна форма, проста у виробництві; 2) Односторонній характер схеми потоку сприяє зменшенню витoku потоку [5; 4]; 3) Найвищий коефіцієнт зв'язку при зміні відстані між котушками [10; 17].	Вузкий ефективний робочий діапазон при осьовому зсуві [17].
	Складна (DD,DDQ)	1) Висока ефективність при великому діапазоні осьового зміщення [17]; 2) Більш рівномірний розподіл магнітного поля [3]; 3) Краща густина магнітного потоку [17].	Складна у виготовленні та об'ємна обмотка.
Матеріал осердя	Ферит, порівняно з металами та сплавами	1) Висока відносна магнітна проникність [3]; 2) Низькі втрати на високих частотах [10]; 3) Котушка має більшу індуктивність, взаємоіндуктивність та коефіцієнт зв'язку [3].	1) Крихкий матеріал, що додає значної ваги котушці [10]; 2) Дорожчі за метали та сплави, особливо при виготовленні на замовлення [3].
Структура осердя	Плоска феритова пластина	1) Проста у виготовленні і встановленні; 2) Тонка товщина.	Неоптимізоване використання площі поверхні осердя (наприклад, прямокутне осердя при круглій котушці).
	Осердя I-типу	1) Оптимальне використання всієї поверхні осердя; 2) Простота у виготовленні [18]; 3) Немагнітний проміжок між осердями покращує повітряну вентиляцію.	1) Більша товщина; 2) Збільшений витік електромагнітного поля за межі осердя [18]; 3) Складність рівномірного розміщення.
Застосування осердя	Із осердям	1) Високий коефіцієнт зв'язку [18]; 2) Низький витік магнітного потоку; 3) Зменшений розмір обмотки та кількість міді; 4) Поліпшення індуктивності, добротності та взаємоіндуктивності котушки [18].	1) Збільшена маса осердя; 2) Втрати в осерді та міді [18.]
	Без осердя	1) Висока добротність через незначну зміну індуктивності; 2) Великий струм через відсутність втрат в осерді.	1) Більші розміри котушки; 2) Велике електромагнітне поле через витік магнітного потоку; 3) Вплив на оточуючі металеві предмети [18].
Екрануючий ефект	З екраном	1) Зменшується витік електромагнітного поля [18]; 2) Зменшується негативний вплив ЕМІ на здоров'я людини та навколишній матеріал [18]; 2) Проста, надійна та недорога реалізація [19].	1) Може знижуватись ефективність котушки та збільшуються втрати [18]; 2) Може знизитись ефективність системи на 1-3 % [18; 19].
Матеріал екранування	Екранування феритовою пластиною	Ядро може ефективно фокусувати магнітний потік та екранувати його [10].	1) Більша маса; 2) Втрати потужності в осерді (на гістерезис та втрати від вихрового струму) [18].
	Екранування з металу (алюміній)	Легкий і дешевий матеріал для екранування [18].	1) Не так ефективно зменшує потік, особливо при високій частоті; 2) Втрати потужності в металі (від вихрового струму та ефекту близькості) [18].

З огляду на перераховані вище переваги, найчастіше використовують круглі котушки з прямокутними або квадратними феритовими осердями.

**Результати проектування і моделювання.** Як зазначалося вище, залежно від різної форми котушок та інших геометричних параметрів сильно залежать ефективність передачі та прийому енергії та загальна ефективність системи БПЕ. Ефективність буде різною при однаковій геометрії котушки залежно від значення індуктивності та кількості шарів обмотки котушки.

Концепція використання котушок із низьким значенням індуктивності передбачає використання їх при низьких входних напругах та великому струмі. Для цього часто витки роблять із подвійного дроту досить великого діаметра з відносно невеликим значенням індуктивності.

У геометрії двошарової котушки також є певні особливості. Двошарова та багатошарова обмотка – це спосіб зменшити зовнішній діаметр котушки. Щоб зовнішній діаметр котушки не перевищував габаритні розміри феритової пластини, у моделі на рис. 2 обмотку укладено у два шари, один над іншим. У свою чергу, кожен шар обмотки намотано паралельно двома провідниками. Це значно знижує послідовний опір котушок. У цьому випадку перевагою також є те, що кінці й початки обмоток перебувають не в зоні активної передачі енергії і котушки можна розмістити дуже близько між собою. При такому перерізі дроту можливий вхідний і вихідний струм більше 10 А та потужність, що перевищує 100 Вт, що в заданих геометричних розмірах є чудовим результатом. Забезпеченню досягнення такої потужності сприяє також феритова пластинка, що має досить значну товщину 2.5 мм. Осердя успішно замикає потік магнітної індукції, а також служить екраном і радіатором.

Моделювання здійснювалося в програмі ANSYS Electromagnetics Suite. На рис. 2, в показана спрощена модель у режимі проектування Eddy current. Зверху розміщені котушки передавача. У корпусі циліндра з необхідними розмірами розміщується обмотка з потрібною кількістю витків. Модель котушки покрита циліндричним повітряним об'ємом, радіусом 80 мм і заввишки 160 мм.

У режимі Eddy current котушки можна моделювати з необхідною частотою, бачити значення індуктивності, взаєміндуктивності, коефіцієнта зв'язку, опору котушок, а також деякі інші параметри [15]. Точність розрахунку індуктивності встановлено на рівні 1 %. Відсоток загальної енергетичної похибки попереднього проходу для полів встановлено менше ніж 1 %. Було зроблено 10 ітерацій обчислення з обмеженням розміру сітки поверхонь котушок та осердь, для повітряного циліндра встановлена адаптивна сітка. Загальна кількість скінчених елементів становила 85 174. Котушки містять 25 327 елементів, в обох феритових осердях міститься 4684 елементи. Усі інші елементи розташовані в об'ємі немагнітного проміжку.

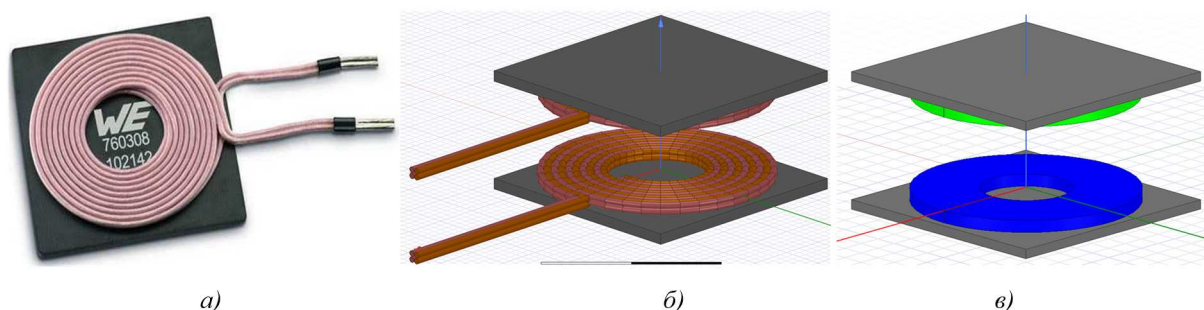


Рис. 2. Котушки індуктивності:

а – промисловий зразок; б – модель у режимі Magnetostatic; в – модель у режимі Eddy current

Магнітостатична “Magnetostatic” модель (рис. 2, б) це більш точна 3D модель, розроблена в магнітостатичному режимі програми. Ця модель показує, який котушка буде мати вигляд у реальності. Є можливість встановлювати відстань між витками, кількість витків, виводи та багато інших параметрів. При цьому значення індуктивності та роз-



TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

поділ магнітної індукції збігаються зі спрощеною моделлю при тих самих геометричних параметрах. У процесі моделювання виникли проблеми з обмеженням обчислювальної потужності комп'ютера та часом моделювання через велику кількість скінчених елементів моделі. Тому перевага була надана спрощеній моделі, що змогла показати необхідні параметри, які далі порівнюються з результатами вимірювань.

Зміну коефіцієнта зв'язку досліджено залежно від відстані між котушками та осьовому зсуві. Таким чином перевіряється фактор, що впливає на ефективність котушок.

На рис. 3 показано залежності коефіцієнта зв'язку від зміни немагнітного проміжку між котушками ( $\delta$ ) та осьового зсуву ( $\Delta$ ) при  $\delta = 1$  мм. Котушки мають прийнятний коефіцієнт зв'язку на невеликій відстані, який повільно зменшується зі збільшенням відстані. Для порівняння, максимальний коефіцієнт зв'язку в раніше розроблених одношарових котушках був більше ніж 0,95 [15]. На рис. 3, а поява від'ємних значень коефіцієнта зв'язку означає зміну напрямку магнітного потоку. Це явище виникає, коли котушки зміщуються відносно одна одної на 50 % зовнішнього діаметра і більше.

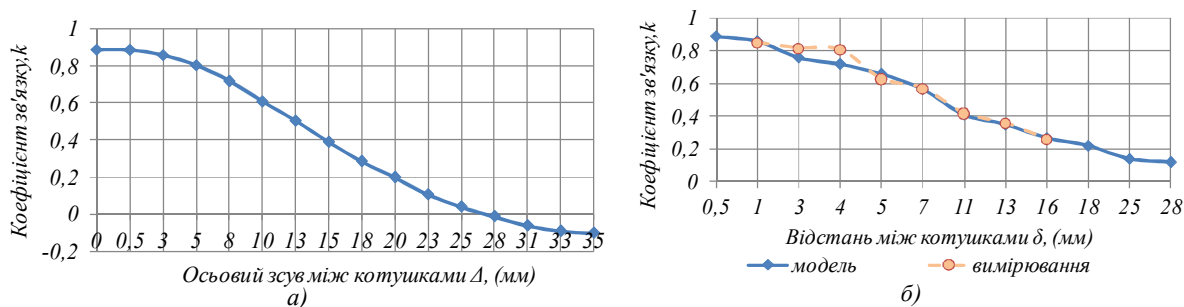


Рис. 3. Залежності коефіцієнта зв'язку при зміні відстані між котушками й осьовому зсуві: а –  $k=f(\Delta)$  при  $\delta=1$  мм (моделювання); б –  $k=f(\delta)$  (моделювання та вимірювання)

Для перевірки результатів моделювання коефіцієнт зв'язку було аналітично визначено при різному немагнітному проміжку між котушками. Для цього котушки зафіксовано на потрібній відстані. Потім окремо виміряно індуктивності обох котушок ( $L_1$  та  $L_2$ ), та індуктивність послідовно з'єднаних котушок ( $L_{12}$ ). Далі обчислено взаємодуктивність  $M$  за формулою (1):

$$M = \frac{(L_{12} - L_1 - L_2)}{2} \tag{1}$$

Відповідно до відомої формули (2) визначено коефіцієнт зв'язку:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \tag{2}$$

Результати моделювання та експерименту на рис. 3, б майже однакові, що вказує на правильність та точність моделі котушки.

Напрямок та інтенсивність магнітного потоку при зміні положення між котушками також важливі. Як видно з розподілу магнітної індукції (рис. 4, а), її величина нерівномірно розподіляється вздовж радіуса котушки, досягаючи найвищого значення на внутрішніх витках ( $B_{max} = 24,7$  мТл). Спостерігається також невелике розсіювання магнітного потоку за межами магнітної системи. Для його зменшення потрібно зменшити діаметр котушок або збільшити площу фериту. Магнітний потік також добре утримується та спрямовується при осьовому зміщенні котушок (рис. 4, б).

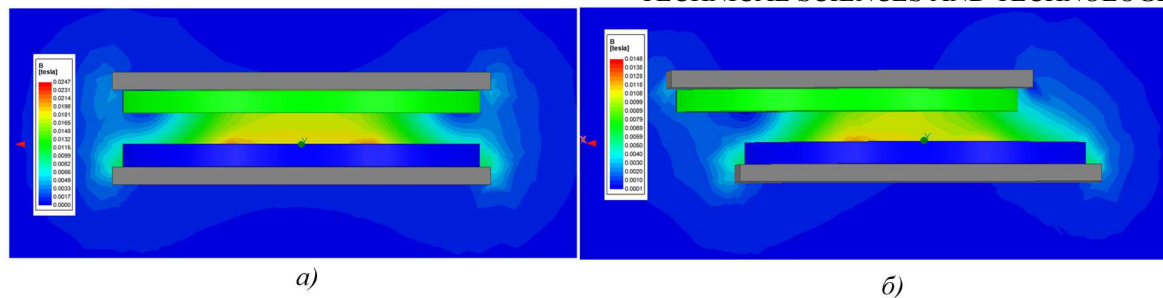


Рис. 4. Поширення потоку магнітної індукції:  
 а – при відстані між котушками 4,5 мм; б – при осьовому зсуві 10 мм  
 та при відстані між котушками 4,5 мм

Отже, дві котушки мають номінальну індуктивність 5,8 мкГн. Виміряні значення на 100 кГц дещо менші, але знаходяться в межах заданої виробником точності. Результати моделювання показали велику схожість параметрів індуктивності з наявними промисловими зразками (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняльна таблиця отриманих результатів

Позначення	Опис	Параметри		
		Модель	Вимірювання та інформація з документації	Відхилення, %
$L_1$	Котушка 1 (передавальна)	5,81 мкГн	5,66 мкГн	-2,58
$L_2$	Котушка 2 (приймальна)	5,86 мкГн	5,81 мкГн	-0,86
$D$	Зовнішній діаметр котушки	50 мм		0
$d$	Внутрішній діаметр котушки	20 мм		0
$d_w$	Діаметр дроту	1,4 мм		0
$L_{\text{ferr}} \& W_{\text{ferr}}, h_{\text{ferr}}$	Довжина, ширина і висота феритової пластини	53×53×2,5 мм		0
$\sigma_w, \sigma_{\text{ferr}}$	Електрична провідність дроту і фериту	5,8·10 <sup>7</sup> 1/О мм; 0,0 1 / О мм	-	-
$\mu_r$	Відносна магнітна проникність фериту	650		0
$N$	Кількість подвійних витків	10		0
$R$	Опір котушки	3,94 мОм	Близько 4 мОм	-

За такої двошарової структури потужність передачі може бути збільшена, а активний опір котушки зменшується. Це досягається за рахунок паралельних витків дроту двошарової обмотки. Одночасно зменшується коефіцієнт зв'язку та добротність через зменшення кількості витків. Це призводить до зниження ефективності котушок порівняно зі звичайними одношаровими котушками.

За результатами дослідження основні геометричні та електромагнітні параметри моделі котушок майже збігаються з комерційними зразками із точністю не менше як 3 %.

**Висновки відповідно до статті.** Ця стаття присвячена порівнянню основних компонентів електромагнітної частини системи для ІСПЕ та оцінці точності моделі індуктивних котушок у програмі ANSYS EM Suite за методом скінчених елементів. Визначено переваги котушки круглої форми, осердя прямокутної форми та використання феритового осердя для системи БПЕ.

Виконання такої дослідницької роботи, а саме поєднання моделювання та експериментального вимірювання, дозволило визначити основні електромагнітні параметри двошарових котушок. Двошарові котушки мають такі переваги, як більший максимальний вхідний струм і потужність передачі, менший зовнішній діаметр при заданому значенні індуктивності. Спрощена модель двошарових котушок в ANSYS показала дуже високу наближеність до реальної індуктивності. Точність розрахунку значення індуктивності досягається не менше ніж 3 %.

**Подяки.** Ця наукова робота була підтримана Міністерством освіти і науки України (Гранти № 0117U007260 та № 0118U003865) і проектом Україна-Латвія (№ 0119U102105).

### Список використаних джерел

1. Kan T., Nguyen T., White J. C., Malhan R. K., Mi C. C. A New Integration Method for an Electric Vehicle Wireless Charging System Using LCC Compensation Topology: Analysis and Design. *117 Transactions on Power Electronics*. Feb. 2017. Vol. 32, no. 2. P. 1638-1650.
2. Bosshard R., Kolar J. W., Wunsch B. Accurate finite-element modeling and experimental verification of inductive power transfer coil design. *117 Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014*. Fort Worth. 2014. TX. P. 1648-1653.
3. Knaisch K., Springmann M., Gratzfeld P. Comparison of coil topologies for inductive power transfer under the influence of ferrite and aluminum. *2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. Monte Carlo, 2016. P. 1-9.
4. Dai Z., Wang J., Long M., Huang H. A. Witricity-Based High-Power Device for Wireless Charging of Electric Vehicles. *Energies*. 2017. № 10. P. 323.
5. Ongayo D., Hanif M. Comparison of circular and rectangular coil transformer parameters for wireless Power Transfer based on Finite Element Analysis. *117 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. Fortaleza, 2015. P. 1-6.
6. Bosshard R., Kolar J. W., Mühlethaler J., Stevanović I., Wunsch B., Canales F. Modeling and  $\eta$ - $\alpha$ -Pareto Optimization of Inductive Power Transfer Coils for Electric Vehicles. *117 Journal of Emerging and Selected Topics in PowerElectronics*. March 2015. Vol. 3, no. 1. P. 50-64.
7. Valtchev S., Borges B., Brandisky K., Klaassens J. B. Resonant Contactless Energy Transfer With Improved Efficiency. *117 Transactions on Power Electronics*. March 2009. Vol. 24, no. 3. P. 685-699.
8. Nicolay P., Lenzhofner M. A Wireless and Passive Low-Pressure Sensor. *Sensors*. 2014. № 14. P. 3065-3076.
9. Tan L., Li J., Chen C., Yan C., Guo J., Huang X. Analysis and Performance Improvement of WPT Systems in the Environment of Single Non-Ferromagnetic Metal Plates. *Energies*. 2016. № 9. P. 576.
10. Bosshard R., Mühlethaler J., Kolar J. W., Stevanovic I. Optimized magnetic design for inductive power transfer coils. *Proc. 28th APEC*. 2013. P. 1812-1819.
11. Zaheer A., Hao H., Covic G. A., Kacprzak D. Investigation of Multiple Decoupled Coil Primary Pad Topologies in Lumped IPT Systems for Interoperable Electric Vehicle Charging. *117 Transactions on Power Electronics*. April 2015. Vol. 30, no. 4. P. 1937-1955.
12. Chen W., Liu C., Lee C. H., Shan Z. Cost-Effectiveness Comparison of Coupler Designs of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Dynamic Charging. *Energies*. 2016. № 9. P. 906.
13. Zuo P., Wu X., Li W., Liu W. Design of wireless energy transfer system based on coupled magnetic resonances. *117 International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS)*. Beijing, 2016. P. 527-532.
14. Zahid Z. U. et al. Design and control of a single-stage large air-gapped transformer isolated battery charger for wide-range output voltage for EV applications. *117 Energy Conversion Congress and Exposition*. Denver, CO, 2013. P. 5481-5487.
15. Shevchenko V., Karlov O., Husev O., Kondratenko I., Pakhaliuk B. Coil Design for Wireless Power Transfer with Series-Parallel Compensation. *117 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. July, 2019.
16. Cho J., Sun J., Kim H., Fan J., Lu Y., Pan S. Coil design for 100 KHz and 6.78 MHz WPT system :Litz and solid wires and winding methods. *117 International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*. Washington, DC, 2017. P. 803-806.
17. Knaisch K., Gratzfeld P. Comparison of magnetic couplers for inductive electric vehicle charging using accurate numerical simulation and statistical methods. *5th International Electric Drives Production*. 2015. P. 1-10.
18. Patil D., McDonough M. K., Miller J. M., Fahimi B., Balsara P. T. Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges. *117 Transactions on Transportation Electrification*. March 2018. Vol. 4, no. 1. P. 3-37.
19. Kim J. et al. Coil Design and Shielding Methods for a Magnetic Resonant Wireless Power Transfer System. *Proceedings of the 117*. June 2013. Vol. 101, no. 6. P. 1332-1342.

UDC 621.3.08

Viktor Shevchenko, Ihor Kondratenko, Oleksandr Husev,  
Oleg Khomenko, Kostiantyn Tytelmaier

## ESTIMATION OF THE DOUBLE-LAYER COILS MODEL ACCURACY FOR WIRELESS POWER TRANSFER USING FINITE ELEMENT MODELLING

**Urgency of the research.** This topic is actual with increasing demand and interest to the wireless chargers from researchers and users.

**Target setting.** In the development of wireless energy transfer systems it is needed to design inductors with different precision parameters in accordance with the tasks. Therefore, need to know how accurately design an inductor model in one of the popular packages.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Recent works on the various programs used to model electromagnetic processes have been reviewed. From the references about the inductors structure, the necessary information was collected for analysis and comparison.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Until recently, information on the various structures and inductors components for wireless energy transmission has not been collected and summarized in a comparably convenient in form. The question of the inductor models accuracy in finite element programs has also not enough attention was paid.

**The research objective.** In order to understand the design object, it is necessary to analyze and compare the structure of the inductors. Then need to evaluate the accuracy of modeling two identical double-layer coils for wireless energy transfer by finite element method in a popular finite element tool.

**The statement of basic materials.** The structure of inductances, namely coil geometry, shape and material of ferrite core, was analyzed. Their role in the shielding of electromagnetic radiation and the direction of the magnetic induction flux and influence on the value of self-inductance are determined. A simplified model of inductance is developed and its electromagnetic parameters are determined.

**Conclusions.** The results of double-layer coils modeling are confirmed. Proven that the ANSYS EM Suite is an accurate and reliable tool, and even the simplified inductance models fully meet the requirements of engineers and researchers.

**Keywords:** wireless power transfer; inductive power transfer; coil geometry; magnetic flux; core shape; shielding; finite element modeling; double-layer coil.

Fig.: 4. Tab.:2. References: 19.

**Шевченко Віктор Олександрович** – аспірант, асистент кафедри біомедичних радіоелектронних апаратів та систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Shevchenko Viktor** – Phd student, assistant of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** shevaip1990@gmail.com

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6201-8693>

**ResearcherID:** R-3688-2018

**Scopus Author ID:** 57204505187

**Кондратенко Ігор Петрович** – доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу електромагнітних систем Інституту електродинаміки НАН України (просп. Перемоги, 56, м. Київ, 03057, Україна).

**Kondratenko Igor** - Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Head of the Electromagnetic systems department, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine (56 Peremohy Av., 03057 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** dep7ied@ukr.net

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>

**Researcher ID:** O-4479-2017

**Scopus Author ID:** 7003332770

**Гусев Олександр Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біомедичних радіоелектронних апаратів та систем, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Husev Oleksandr** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Biomedical Radioelectronic Apparatus and Systems, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** oleksandr.husev@gmail.com

**ORCID:** [orcid.org/0000-0001-7810-457X](https://orcid.org/0000-0001-7810-457X)

**ResearcherID:** F-5792-2014

**Scopus Author ID:** 45861130600

**Хоменко Олег Борисович** – інженер держбюджетної теми 89/17, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Khomenko Oleg** – engineer of government project 89/17, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** olbor13@gmail.com

**Тительмаєр Костянтин Олександрович** – старший науковий співробітник держбюджетної теми 91/18, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Tytelmaier Kostiantyn** – Senior researcher of government project 91/18, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** kostya.tytelmaier@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7582-0204>

**ResearcherID:** F-4365-2016

**Scopus Author ID:** 57188715517

Шевченко В., Кондратенко І., Гусев О., Хоменко О., Тительмаєр К. Оцінка точності моделі двошарової котушки індуктивності для бездротової передачі енергії за допомогою методу скінчених елементів. *Технічні науки та технології*. 2019. № 3 (17). С. 188–196.

Сергій Бойко, Андрій Некрасов, Олексій Городній,  
Альона Хебда, Артем Дмитренко, Марина Ножнова

## ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ДО СИСТЕМИ ЇХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

**Актуальність теми дослідження.** Залізорудні підприємства є одними з найбільших споживачів паливно-енергетичних ресурсів України. Водночас аналіз розподілу потоків споживання електроенергії свідчить, що велика частка електричної енергії припадає саме на локальні енергетичні об'єкти, що зумовлює загалом актуальність вивчення питань особливостей прогнозування електроспоживання з мережі в умовах підприємств та актуальності застосування при цьому комбінованого підходу, особливо при впровадженні у структуру електропостачання цих підприємств розосередженої генерації.

**Постановка проблеми.** Проблемою, висвітленою в цій роботі, є синтез особливостей прогнозування електроспоживання підприємств при впровадженні до системи їх електропостачання розосередженої генерації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У попередніх дослідженнях автори обґрунтували позитивний ефект від впровадження джерел розосередженої генерації в умовах промислових підприємств, а саме модульність, надійність, місцеве керування, зменшення негативного впливу на екологію та малий пусковий період. Ці об'єкти, а це в масштабах України сотні гектарів, за всіма своїми параметрами можуть і повинні стати полігоном для розміщення комплексів джерел розосередженої генерації, які, по суті, повинні стати міні- або мікроелектростанціями у структурі систем електропостачання підприємств України, у тому числі залізорудних підприємств.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** В умовах залізорудного підприємства, яке має дуже складну та розгалужену структуру, а технологічні процеси дуже складні й залежать від багатьох факторів, прогнозування є важким і складним завданням, за умови одержання похибки прогнозу, яка б не перевищувала 4 %. Тому в умовах залізорудного підприємства доцільно використання для одержання прогнозу електроспоживання штучних нейронних мереж, які передбачають наявність суттєвих зв'язків між окремими факторами.

**Постановка завдання.** Таким чином, актуальним науково-практичним завданням є дослідження особливостей та механізму прогнозування електроспоживання залізорудних підприємств при використанні джерел розосередженої генерації у складі комплексу їх електропостачання.

**Виклад основного матеріалу.** У результаті аналізу можливості впровадження розосередженої генерації у складі енергетичних систем залізорудних підприємств було виявлено, що джерела розосередженої генерації впливають на розподільні мережі цих підприємств та перетворюють їх на активні елементи. Це призводить до необхідності внесення змін у прийнятті стратегії управління розподільними мережами підприємства та планування структури і режимів локальних енергетичних систем. У статті запропоновано використання штучних нейронних мереж для прогнозування електроспоживання електричної енергії, особливо при впровадженні джерел розосередженої генерації по комплексу електропостачання. За допомогою програми «Statistica» було побудовано графіки електроспоживання із загальної мережі ПАТ Полтавський ГОК з використанням нейронних мереж. Результат прогнозування у порівнянні з реальними даними має незначне відхилення, що є допустимим.

**Висновки відповідно до статті.** Для прогнозування, з достатнім рівнем ймовірності, електроенергоспоживання залізорудними підприємствами необхідно вирішити багатокритеріальну задачу з обов'язковим попереднім визначенням усіх факторів, що впливають та визначають рівні енергоспоживання конкретного підприємства.

Застосування нейронних мереж у системах прогнозування електроенергетичних параметрів джерел розосередженої генерації дозволить забезпечити багатофакторне прогнозування, що дасть змогу покращити прогнозованість згенерованої електроенергії розосередженою генерацією в часі, в умовах залізорудних підприємств.

**Ключові слова:** розосереджена генерація; електропостачання підприємств; прогнозування електроспоживання; штучні нейронні мережі.

Рис.: 3. Бібл.: 12.

**Постановка проблеми.** Україна має потужні ресурси розосередженої генерації (РГ). Експлуатація різних типів РГ є ефективною практично на всій території України [1].

Залізорудні підприємства, є одними з найбільших споживачів паливно-енергетичних ресурсів України. Між тим, що не менш важливо, досвід показує, що незважаючи на недовантаження електричних потужностей, збитки від аварійних перерв енергозабезпечення з кожним роком зростають.

Другим незалежним джерелом живлення електроспоживачів можуть бути, зокрема, використані спеціальні агрегати безперебійного живлення та акумуляторні батареї. Тому одним з альтернативних рішень є використання розосередженої генерації, розташованої на території підприємства, з метою електропостачання відповідальних електроприймачів у аварійних ситуаціях та в інших псевдоаварійних режимах роботи, а також з метою зменшення витрат за спожиту електроенергію та підвищення рівня надійності електропостачання.

Водночас аналіз розподілу потоків споживання електроенергії свідчить, що велика частка електричної енергії припадає саме на локальні енергетичні об'єкти, що обумовлює загалом актуальність вивчення питань особливостей прогнозування електроспоживання з мережі в умовах підприємств та актуальності застосування при цьому комбінованого підходу, особливо при впровадженні у структуру електропостачання цих підприємств РГ [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У попередніх дослідженнях автори обґрунтували позитивний ефект від впровадження джерел РГ в умовах промислових підприємств, а саме модульність, надійність, місцеве керування, зменшення негативно-го впливу на екологію та малий пусковий період [1; 8].

Тому ці об'єкти, а це в масштабах України сотні гектарів, за всіма своїми параметрами можуть і повинні стати полігоном для розміщення РГ, які, по суті, повинні стати міні- або мікроелектростанціями у структурі систем електропостачання підприємств України, у тому числі залізорудних [3].

**Визначення недосліджених частин загальної проблеми.** Таким чином, актуальним науково-практичним завданням є дослідження особливостей та механізму прогнозування електроспоживання залізорудних підприємств при використанні джерел РГ у складі їх розподільчих мереж.

**Мета статті.** Головною метою цієї роботи є синтез особливостей прогнозування електроспоживання підприємств за умови впровадження до системи їх електропостачання розосередженої генерації.

**Виклад основного матеріалу.** У результаті аналізу можливості впровадження РГ у складі енергетичних систем залізорудних підприємств було виявлено, що джерела РГ впливають на розподільні мережі цих підприємств та перетворюють їх на активні елементи. Це призводить до необхідності внесення змін у прийняті стратегії управління розподільними мережами підприємства та планування структури і режимів локальних енергетичних систем. При цьому їхній вплив може мати як позитивний, так і негативний характер, тому доцільно заздалегідь ґрунтовно досліджувати та аналізувати питання приєднання РГ до розподільних мереж залізорудних підприємств залежно від умов експлуатації та особливостей технологічного процесу електроприймачів [4].

До складу запропонованої системи електропостачання РГ входить таке устаткування: вітроенергетична станція (ВЕС), сонячна електростанція (СЕС), гідроенергетична станція (ГЕС), гідроакумулююча станція (ГАЕС); батарея акумуляторів, що служить для накопичення електроенергії при роботі джерел РГ для живлення системи її управління (або, за необхідності, як резервне джерело живлення); перетворювальна апаратура, у випадку використання генератора змінної напруги, що служить для перетворення згенерованої РГ електроенергії в постійний струм для живлення інвертора й заряду акумуляторних батарей (рис. 1).

В умовах залізорудного підприємства (ЗРП), яке має дуже складну та розгалужену структуру, а технологічні процеси дуже складні й залежать від багатьох факторів, прогнозування є важким і складним завданням, за умови одержання похибки прогнозу, яка б не перевищувала 4 %. Тому в умовах ЗРП доцільно використання для одержання прогнозу штучних нейронних мереж (ШНМ), які передбачають наявність суттєвих зв'язків між окремими факторами.

Нейрони слабкозв'язаних ШНМ розміщуються у вершинах прямокутної або гексагональної ґратки, а кожний нейрон буде зв'язаний із чотирма сусідніми нейронами (окіл фон Неймана) або із шістьма сусідніми нейронами (окіл Голея), або із вісьмома сусідніми нейронами (окіл Мура) [4].

ШНМ залежно від типу функцій активації, які входять до їх структури, поділяють на:

1) гомогенні ШНМ, які складаються із нейронів одного типу з єдиною функцією активації;

2) гетерогенні ШНМ, які складаються з нейронів із різними функціями активації.

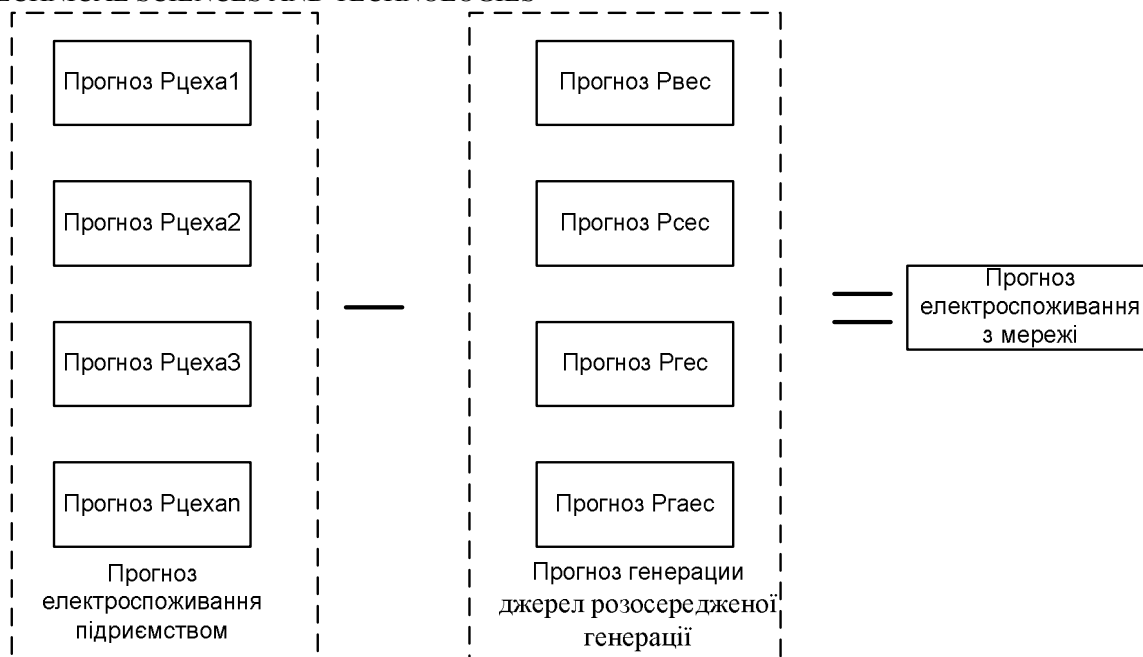


Рис. 1. Структурна схема визначення прогнозних показників енергоспоживання з мережі підприємства, при впровадженні у структуру електропостачання цих підприємств розосередженої генерації

ШНМ залежно від стану, в якому перебувають нейрони, поділяють на аналогові й бінарні, а залежно від кількості нейронів, які змінюють свій стан у деякий момент часу, поділяють на: синхронні ШНМ, коли лише один нейрон змінює свій стан; асинхронні, коли свій стан змінює декілька нейронів (група нейронів).

Функціонування ШНМ ґрунтується на подачі функцій багатьох змінних як суми функцій однієї змінної.

Найпростіша ШНМ складається з певної кількості ШНМ, які об'єднують у групи, які утворюють шари, нейрони яких ваговими зв'язками з'єднуються з вхідними сигналами від інших нейронів, попередніх шарів.

У результаті перетворень вхідних сигналів у нейронах певних шарів на виході із ШНМ одержують числове значення вихідного сигналу (OVT).

Вагові коефіцієнти можна записати у вигляді матриці, яка має  $m$  рядків та  $n$  стовпчиків:

$$W = \begin{pmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \dots & \omega_{1n} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \dots & \omega_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_{m1} & \omega_{m2} & \dots & \omega_{mn} \end{pmatrix}, \tag{1}$$

де  $m$  – кількість входів;  $n$  – кількість нейронів ШНМ.

Тоді вихідний вектор  $\vec{B}$ , елементами якого є виходи сигналів OVT із вихідних нейронів, обчислюють як матричний добуток матриці-рядка  $\vec{X}$ -вхідних елементів на матрицю  $\vec{W}$  вагових коефіцієнтів:

$$\vec{B} = \vec{X}\vec{W}, \tag{2}$$

де  $\vec{B}$  – вектор-рядок.

Якщо потрібний вихід із  $i$ -го нейрона позначити  $y_i$ , а реальний вихід із  $i$ -го нейрона позначити  $\hat{y}_i$ , тоді похибку для  $k$ -го зразка можна обчислити за формулою:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad i = 1, n. \quad (3)$$

тоді загальна похибка для всієї вибірки:

$$\Delta E_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n E_k, \quad k = 1, m. \quad (4)$$

Комбінований (сумарний) вхід до цього нейрона визначає його збудженість (активність), тобто сумарне значення вагових зв'язків, які впливають на цей нейрон, визначає реальний стан нейрона [5].

Для одного зразка при лінійній функції активації сигналу в нейроні похибку можна визначити за формулою:

$$E = \frac{1}{2} (y_i - \hat{y})^2 = \frac{1}{2} (y_i - NET)^2. \quad (5)$$

Перетворивши цей вираз одержимо:

$$E = 0,5(y_i^2 - 2y_i\hat{y} + \hat{y}^2) = 0,5[y_i^2 - 2y_i(NET) + (NET)^2].$$

Оскільки  $\hat{y} = (NET) = (x_1\omega_1 + x_2\omega_2)$  для двох вагових зв'язків, то

$$\begin{aligned} E &= 0,5[y_i^2 - 2y_i(x_1\omega_1 + x_2\omega_2) + (x_1\omega_1 + x_2\omega_2)^2] = \\ &= 0,5[y_i^2 - 2y_ix_1\omega_1 - 2y_ix_2\omega_2 + (x_1\omega_1)^2 + 2x_1\omega_1x_2\omega_2 + (x_2\omega_2)^2] = \\ &= 0,5[y_i^2 - 2y_ix_1\omega_1 - 2y_ix_2\omega_2 + x_1^2\omega_1^2 + 2x_1\omega_1x_2\omega_2 + x_2^2\omega_2^2]. \end{aligned}$$

Знайдемо залежність похибки  $E$  від  $\omega_1$ .

$$\begin{aligned} E(\omega_1) &= 0,5[x_1^2\omega_1^2 + (2x_1x_2\omega_2 - 2y_ix_1)\omega_1 + (y_i - 2y_ix_2\omega_2 + \omega_2^2x_2^2)] = \\ &= 0,5x_1^2\omega_1^2 + (x_1x_2\omega_2 - y_ix_1)\omega_1 + (0,5y_i - y_ix_2\omega_2 + 0,5\omega_2^2x_2^2). \end{aligned}$$

Позначивши  $0,5x_1^2 = a$ ,  $x_1x_2\omega_2 - y_ix_1 = b$ ,  $0,5y_i - y_ix_2\omega_2 + 0,5\omega_2^2x_2^2 = c$ , отримуємо:

$$E(\omega_1) = a\omega_1^2 + b\omega_1 + c. \quad (6)$$

Тобто залежність похибки  $E$  від  $\omega_1$  є параболічною. Аналогічно залежність похибки  $E$  від  $\omega_2$  також буде параболічною. Оскільки  $a = 0,5x_1^2 > 0$ , то витки параболи направлені вгору (в додатному напрямку осі  $E$ ). А це означає, що графік залежності  $E(\omega_1)$  має локальний мінімум, який збігається з вершиною параболи, яка є графіком залежності  $E(\omega_1)$  [6].

Оскільки вагові коефіцієнти на початковому етапі навчання ШНМ набирають деяких випадкових значень, тому точка, що характеризує початкове положення ШНМ у площині  $E, \omega_1$  може бути у довільному місці й малоймовірно, що буде знаходитись в точці локального мінімуму.

Отже, у процесі навчання ШНМ повинна проводити корекцію (зміну значень) вагових коефіцієнтів так, щоб мінімізувати числове значення загальної похибки ( $E$ ), щоб  $E \rightarrow E_{\min}$ , причому цей процес повинен проходити якомога швидше, тобто за меншу кількість ітерацій та епох. Якщо  $E$  буде залежати від двох змінних ( $\omega_1$  і  $\omega_2$ ), то у просторовій декартовій системі координат ( $E, \omega_1, \omega_2$ ) одержимо об'ємну фігуру обертання (параболоїд). Тобто одержимо поверхню, яка визначає величину похибки для різних комбінацій вагових коефіцієнтів ( $\omega_1$  і  $\omega_2$ ), а ваговий вектор, початок якого знаходиться в початку координат, а кінець у точці, яка є проекцією локального мінімуму параболоїда на площину  $\omega_1 \omega_2$ , вказує напрямок мінімізації похибки [7].



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Для корегування вагових коефіцієнтів можна застосувати правило Відроу–Хоффа або дельта – правило, яке в загальному вигляді має наступний математичний запис:

$$\Delta\omega_{ij} = \eta\delta_j x_i, \quad (7)$$

де  $\delta_j = y_j - \hat{y}_j$  – потрібний вихід із нейрона  $j$ , а  $\hat{y}_j$  – фактичний (реальний) вихід із  $j$  – нейрона,  $x_i$  – сигнал, який прийшов від  $i$ -нейрона,  $\eta$  – коефіцієнт зміни вагових коефіцієнтів (норма навчання),  $\Delta\omega_{ij}$  – величина зміни вагового коефіцієнта зв'язку між  $i$  та  $j$  нейроном.

У загальному вигляді дельта правило можна записати у вигляді:

$$\Delta\omega_{ij} = \eta\delta_j x_i = \eta(y_j - \hat{y}_j)x_i = \eta\left(y_j - \sum_{j=1}^m x_i \omega_{ij}\right)x_i. \quad (8)$$

Швидкість зміни похибки  $\frac{\partial E}{\partial \hat{y}_i}$  відносно зміни реального виходу із  $j$ -нейрона чисельно дорівнює:

$$\frac{\partial E}{\partial \hat{y}_i} = \hat{y}_j - y_j = -\tilde{\delta}, \quad (9)$$

а швидкість зміни виходу  $\hat{y}_j$  із  $j$ -нейрона від зміни вагових коефіцієнтів  $\Delta\omega_{ij}$  можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial \hat{y}_j}{\partial \omega_{ij}} = x_i. \quad (10)$$

Тоді швидкість зміни похибки від зміни вагових коефіцієнтів можна записати:

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial \hat{y}_j} \frac{\partial \hat{y}_j}{\partial \omega_{ij}}, \quad (11)$$

$$-\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = -\delta_j x_i, \quad (12)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = \delta_j x_i, \quad (13)$$

де  $\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}}$  – похідна по поверхні похибок залежно від зміни вагових коефіцієнтів.

Тоді можна зробити висновок, що зміни вагових коефіцієнтів повинні відбуватися в напрямку, протилежному похідній по поверхні похибки, тобто в напрямку, протилежному до напрямку градієнта – у напрямку зменшення, а не збільшення.

Кількість вхідних нейронів відповідає певній кількості ознак, які визначають із простору, з якого будуть вибрані всі зразки на вхід ШНМ [8].

Вхідні значення зразків перетворюються під дією вагових коефіцієнтів матриці  $W_1$  та зміщень  $\Theta_1$  та  $\Theta_2$  у підсумовуючому блоці (СБ) нейронів прихованого шару, а після активації пороговою функцією в блоці активації (БА) нейронів прихованого шару, одержуємо числові значення виходів із нейронів прихованого шару NET<sub>I</sub> та NET<sub>II</sub>. Потім у нейроні вихідного шару під дією вагових коефіцієнтів матриці  $W_2$  та зміщення  $\Theta_3$  та активації пороговою функцією у БА вихідного нейрона, одержуємо вихідне числове значення ОВТ для кожного зразка вхідних сигналів  $x_1, x_2$ .

Структурну схему ШНМ, розглянутої раніше, можна проілюструвати таким чином (рис. 2): вхідні нейрони нульового шару позначимо  $1_0, 2_0$ , приховані нейрони першого шару позначимо  $1_{(1)}, 2_{(1)}$ , а вихідний нейрон – символом  $1_{(2)}$ , вагові коефіцієнти зміщень для прихованого шару –  $\Theta_{1(1)}$  та  $\Theta_{2(1)}$ , а вихідного шару –  $\Theta_{1(2)}$ , вхідні сигнали до  $1_0$  нейрона через  $x_1 = (1,1,0,0)$ , а вхідні сигнали до  $2_0$  нейрона – через  $x_2 = (1,0,1,0)$ , загальний вихідний сигнал до нульового шару запишемо у вигляді кортежу:  $\{(x_1, x_2)\} = \{(1,0;1,0), (1,0;0), (0;1,0), (0;0)\}$ , а вихідний сигнал –  $OVT = \{0;1;1;0\}$ , а вагові коефіцієнти відповідно  $\omega_{ij}$  та  $\gamma_{jk}$ , матриці яких будуть:  $W_1 = \begin{vmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} \\ \omega_{21} & \omega_{22} \end{vmatrix}$  та  $W_2 = \begin{vmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{21} \end{vmatrix}$ .

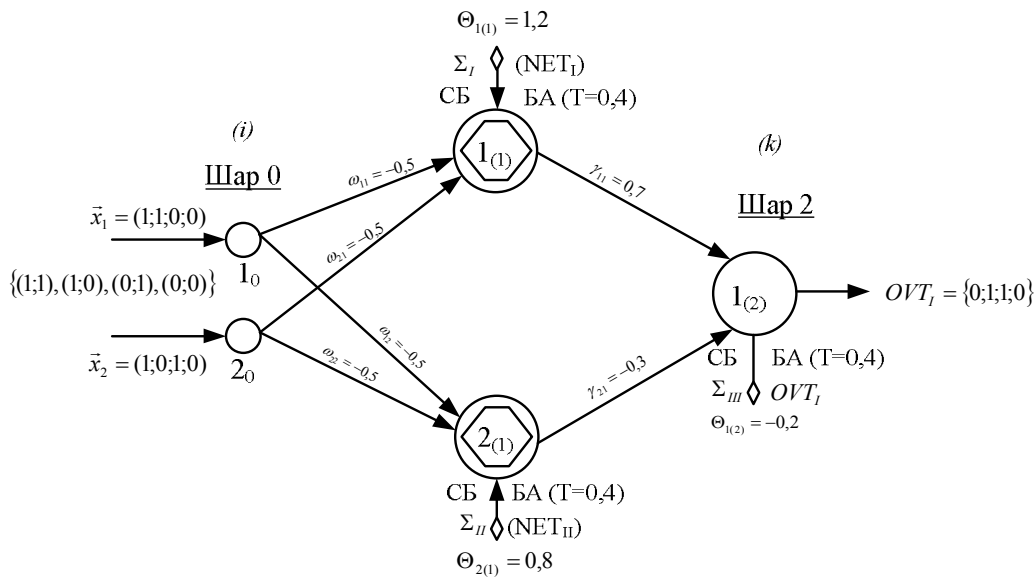


Рис. 2. Структурна схема штучної нейронної мережі

$$\Sigma_I = \sum_{i=1; j=1}^{i=n; j=m} x_i \omega_{ij} + \Theta_j; \quad i = 1, \bar{n}; j = 1, \bar{m}; \quad \Sigma_{II} = \sum_{i=1; j=1}^{i=n; j=m} x_i \omega_{ij} + \Theta_j; \quad i = 1, \bar{n}; j = 1, \bar{m};$$

$$\Sigma_{III} = \sum_{k=1; j=1}^{k=s; j=m} Y_j \gamma_{kj} + \Theta_k; \quad k = 1, \bar{s}; j = 1, \bar{m}.$$

У розглянутому випадку  $n = 2, m = 2, s = 1$ , де  $n$  – кількість нейронів нульового шару,  $m$  – кількість входів до нейронів прихованого шару від нейронів нульового шару (нейронів (першого) прихованого шару),  $s$  – кількість нейронів вихідного шару (другого шару);  $\omega_{ij}$  – ваговий коефіцієнт від  $i$ -го шару (вхідного) до  $j$ -го нейрона прихованого шару. Тоді  $\omega_{12}$  – ваговий коефіцієнт зв'язку від першого нейрона нульового шару (вхідного) до другого нейрона прихованого шару (першого шару), аналогічно для інших вагових коефіцієнтів.  $\gamma_{jk}$  – ваговий коефіцієнт зв'язку від  $j$ -го нейрона прихованого шару (першого шару) до  $k$ -го нейрона вихідного шару (другого шару).

$\Sigma_I$  – сума вагових зв'язків, які входять до першого нейрона прихованого шару,  $\Sigma_{II}$  – сума вагових зв'язків, які входять до другого нейрона прихованого шару,  $\Sigma_{III}$  – сума вагових зв'язків, які входять до нейрона виходу (другого шару).  $NET_I = Y_I$  – сигнал виходу із першого нейрона прихованого шару, після активації пороговою функцією ( $T=0,4$  – числове значення порогу),  $NET_{II}$  – сигнал виходу із другого нейрона прихованого шару (шар 2),  $OVT$  – числове значення вихідного сигналу із першого нейрона

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

вихідного шару (другого шару), після активації пороговою функцією ( $T = 0,4$  – числове значення порогу функції активації).  $\{(1,0;1,0), (1,0;0), (0;1,0), (0;0)\}$  – кортеж вхідних сигналів до нульового шару (вхідного шару),  $\{1,0,0\}$  – кортеж вихідних сигналів із другого шару (вихідного шару).

$\Theta_{1(1)}, \Theta_{2(1)}, \Theta_{1(2)}$  – вагові коефіцієнти зміщень першого та другого нейронів прихованого шару (першого шару) та першого нейрона вихідного шару (другого шару).  $\vec{x}_1 = (1,0;1,0;0;0)$  – вектор вхідних значень до першого нейрона ( $1_0$ ) вхідного шару (нульового шару),  $\vec{x}_2 = (1,0;0;1,0;0)$  – вектор вхідних значень до другого нейрона ( $2_0$ ) вхідного шару (нульового шару).

Схематично зображена ШНМ на рис. 2 для різних вхідних векторів буде одержувати на виході відповідні кожному з них значення [9]:

1.  $(1,0;1,0)$  на вході, а на виході  $OVT=0$ ;
2. На вході  $(1,0;0)$ , а на виході  $OVT=1$ ;
3. На вході  $(0;1,0)$ , а на виході  $OVT=1$ ;
4. На вході  $(0;0)$ , а на виході  $OVT=0$ .

Отже, кожному вхідному вектору  $(x_1, x_2)$  на виході ШНМ відповідає певне числове значення  $OVT$ .

Порогова функція

$$F(NET) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } NET < T \\ 1, & \text{якщо } NET \geq T \end{cases} \quad (14)$$

є прикладом нелінійної функції активації.

Прикладом лінійної функції є

$$F(NET) = \beta(NET), \quad (15)$$

область значень якої  $F(NET) \in (-\infty; +\infty)$ , за наявності якої у БА, вихід із нейрона буде дорівнювати значенню входу в цей нейрон, якщо  $\beta = 1$ . Тоді можна зробити висновок, що багатошарова нейронна мережа з лінійною функцією активації може розв'язувати лише ті задачі, які можуть розв'язувати одношарові нейронні мережі, які мають лише вхідні і вихідні нейрони. Тоді можна зробити такий висновок, що для багатошарових НМ треба використовувати нелінійні функції активації, це логістична функція

$$F(NET) = 1 + \exp[-\alpha \cdot NET^{-1}], \quad (16)$$

або інші нелінійні функції. Найкращим варіантом є логістична, оскільки вона є неперервною на всій області визначення  $(-\infty; +\infty)$ , диференційованою й монотонно зростаючою для всіх  $NET$  від  $(-\infty; +\infty)$  (на інтервалі значень  $(0;1)$ ).

Таким чином, кожний елемент  $i$  множини вхідних значень  $x$  з'єднаний ваговим значенням  $x_i \omega_{ij}$  із кожним ШН, а в СБ нейрона знаходять вагову суму входів до цього нейрона, яка поступає на БА, після активації в якому, на вихід до вихідного шару вийде сигнал  $NET$ . Вихідний вектор  $\vec{L}$  НМ, компонентами якого є виходи  $OVT$  із нейронів вихідного шару, чисельно дорівнює добутку матриці  $\vec{X}$  – вектор-рядок вхідних сигналів на матрицю  $W$  – матриця вагових коефіцієнтів, тобто [10]:

$$L = XW, \quad (17)$$

де  $\vec{L}$  – матриця-рядок.

Багатошарові НМ мають значно більше можливостей при розв'язуванні практичних і прикладних задач, вони являють собою набір шарів, таких, що вихід з одного шару буде входом до наступного шару, а збільшення обчислюваних можливостей (потужно-

стей) у порівнянні з одношаровою НМ, можливе лише за наявності нелінійної функції активації між шарами.

Якщо в багатошарових НМ відсутня нелінійна функція активації, то обчислення числового значення вихідного шару знаходять як добуток вихідного вектора  $X$  на першу вагову матрицю  $W_1$ , потім на наступну вагову матрицю  $W_2$ . Тобто

$$OVT = (\hat{X}W_1)W_2, \quad (18)$$

а в результаті того, що добуток матриць асоціативний, тоді

$$OVT = (XW_1)W_2 = X(W_1W_2). \quad (19)$$

Тобто, по суті, здійснений перехід від багатошарової НМ до одношарової НМ, тобто двошарова НМ еквівалентна одному прихованому шару з ваговою матрицею, що дорівнює добутку двох вагових матриць ( $W_{zag} = W_1W_2$ ).

Тоді

$$OVT = (XW_1)W_2 = X(W_1W_2) = X(W_{zag}). \quad (20)$$

Отже, будь-яка багатошарова НМ із лінійною функцією активації може бути замінена на еквівалентну одношарову НМ із ваговою матрицею:

$$W_{zag} = W_1W_2. \quad (21)$$

НМ, які розглядалися раніше, називають прямого поширення вхідного сигналу або мережі з прямими зв'язками, тобто від вхідного шару до шару виходу сигналу із НМ, тобто від попереднього шару до наступного і по порядку. Але можливості таких НМ обмежені, у них відсутня пам'ять, тобто їх вихід повністю визначається значеннями вхідних векторів і значеннями вагових коефіцієнтів. Такі мережі ще називають НМ без зворотних зв'язків.

НМ, які мають зв'язки від вихідних шарів до вхідних, називають мережами з обмеженим зв'язком. У деяких НМ із обмеженими зв'язками значення виходу з мережі повертається на вхідні шари, тобто вихід буде як вхід. Тому НМ з оберненими зв'язками мають властивість, схожу на короткотермінову людську пам'ять.

Алгоритм зворотного поширення сигналу у НМ складається з напрямків поширення сигналу [11]:

- 1) прямий напрямок поширення сигналу від нульового шару до вихідного шару;
- 2) зворотний напрямок поширення сигналу від вихідного шару до вхідного, передаючи значення похибки від вихідного шару до вхідного (першого) шару, що і визначає на яку величину потрібно корегувати вагові коефіцієнти у процесі навчання ШНМ, яке застосовується для того, щоб ШНМ змогла виконувати поставлену перед нею задачу за даними, які до неї надходять.

За допомогою програми «Statistica» було побудовано графіки електроспоживання для прогнозування електроспоживання із загальної мережі ПАТ Полтавський ГОК на 1 січня 2017 року з використанням нейронних мереж [12]. Результат прогнозування в порівнянні з реальними даними має незначне відхилення (рис. 3).

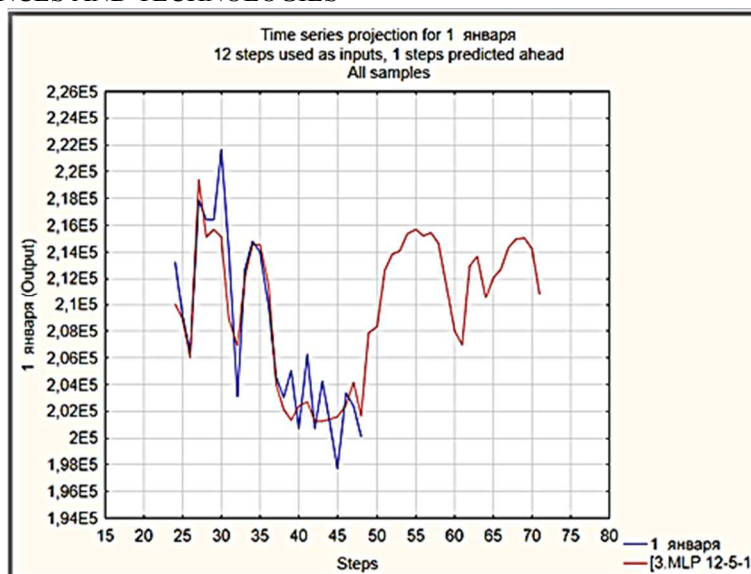


Рис. 3. Короткостроковий (добовий) прогноз електроспоживання із загальної мережі ПАТ Полтавський ГОК на 1 січня 2017 року з використанням нейронних мереж

**Висновки відповідно до статті.** Для прогнозування, з достатнім рівнем ймовірності, електроенергоспоживання залізрудними підприємствами необхідно вирішити багатокритеріальну задачу з обов'язковим попереднім визначенням всіх факторів, що впливають та визначають рівні енергоспоживання конкретного підприємства.

Застосування нейронних мереж у системах прогнозування електроенергетичних параметрів джерел розосередженої генерації дозволить забезпечити багатфакторне прогнозування, що дозволить покращити прогнозованість згенерованої електроенергії розосередженою генерацією в часі, в умовах залізрудних підприємств.

#### Список використаних джерел

1. Синчук О. Н., Бойко С. М. Нейронні мережі та управління процесом управління електропостачанням об'єктів від комбінованих електричних мереж. *Технічна електродінаміка*. 2014. № 5. С. 53-55.
2. Головкин В. А. Нейронные сети. Обучение, организация и применение. Книга 4. Москва: ИПРЖР, 2001. 256 с.
3. Клепиков В. Б., Махота К. В., Сергеев С. А. Застосування методів нейронних мереж і генетичних алгоритмів у вирішенні завдань управління електроприводами. *Електротехніка*. 1999. № 5. С. 2-6.
4. Руденко О. Г., Бодяньський Є. В. Основи теорії штучних нейронних мереж. Харків: ТЕЛТЕХ, 2002. 317 с.
5. Ліла В. Б. Алгоритм і програмна реалізація адаптивного методу навчання штучних нейронних мереж. *Інженерний вісник Дона*. 2012. Т. 19, № 1. С. 55-59.
6. Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit / Denisov Y., Gorodny A., Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O., Prokhorova A. *International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE*. 2016. P. 327-332.
7. Impact of Supply Voltage Change on the Energy Performance of Boost Quasi-Resonant Converter for Radioelectronic Equipment Power Supplies / Gorodniy O., Gordienko V., Stepenko S., Boyko S., Sereda O. *Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017. P. 232-235.
8. Buchholz B., Styczynski Z. *Smart Grids Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*. Springer 2014. 396 p.
9. Shumilova G. P., Gotman N. E., Startceva T. B. Electrical load forecasting using an artificial intelligent methods. *RNSPE, 10-14 September, 2001*. Proceedings. Kazan: Kazan State Power Eng. University, 2001. Vol. I. P. 440-442.

10. Bayir R., Bay O. F. Kohonen Network based fault diagnosis and condition monitoring of serial wound starter motors. *IJSIT Lecture Note of International Conferense on Intelligent Knowledge Systems*. 2004. Vol. 1, № 1.

11. Charytoniuk W., Chen M. S. Short-term Forecasting in Power Systems Using a General Regression Neural Network. *IEEE Trans. on Power Systems*. 1995. Vol. 7, № 1.

12. Boiko S. The operative prognosis to the conditions of the electrical supply complex – electric consumption of mining companies. *Авіація, промисловість, суспільство: збірник тез доповідей I Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів (27 квітня 2018 р., м. Кременчук)*. Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2018. С. 30.

### References

1. Sinchuk, O. N., Boiko, S. N. (2014). Neironnye seti i upravlenie protsessom upravleniia elektro-snabzheniem obektov ot kombinirovannykh elektricheskikh setei [Neural networks and management of the process of power supply control of facilities from combined electric networks]. *Tekhnichna elektrodinamika – Technical electrodynamics*, 5, 53-55 [in Russian].

2. Golovko, V. A. (2001). *Neironnye seti: obuchenie, organizatsiia i primenenie. Kniga 4 [Neural networks: training, organization and application. Book 4]*. Moscow: In IPRZhR [in Russian].

3. Klepikov, V. B., Mahotilo, K. V., Sergeev, C. A. (1999). Primenenie metodov neironnyhsetei i geneticheskikh algoritmov v reshenii zadach upravlenisa elektroprivodami [Application of methods of neural networks and genetic algorithms in solving problems of control of electric drives]. *Elektrotehnika – Electrical Engineering*, 5, 2-6 [in Russian].

4. Rudenko, O. G. (2002). *Osnovy teorii iskusstvennyh neyronnyh setej [Fundamentals of the theory of artificial neural networks]*. Kharkiv: In TELETEH [in Russian].

5. Lila, V. B. (2012). Algoritm i programmajna realizacija adaptivnogo metoda obucheniija iskusstvennyh neyronnyh setej [Algorithm and software implementation of the adaptive method of learning artificial neural networks]. *Inzhenernyj vestnik Dona – The engineer's messenger of the Don*, 1, 55-59 [in Russian].

6. Denisov, Y., Gorodny, A., Gordienko, V., Yershov, R., Stepenko, S., Kostyrieva, O., Prokhorova, A. (2016). Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit. *International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO): Thirty-Fourth Annual IEEE* (pp. 327-332).

7. Gorodniy, O., Gordienko, V., Stepenko, S., Boyko, S., Sereda, O. (2017). Impact of Supply Voltage Change on the Energy Performance of Boost Quasi-Resonant Converter for Radioelectronic Equipment Power Supplies. *Modern Electrical and Energy Systems (MEES)* (pp. 232-235).

8. Buchholz, B., Styczynski, Z. (Springer 2014). *Smart Grids Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*.

9. Shumilova, G. P., Gotman, N. E., Startceva, T. B. (2001). Electrical load forecasting using an artificial intelligent methods. *RNSPE, 10-14 September, 2001* (vol. I, pp. 440-442). Kazan: Kazan State Power Eng. University.

10. Bayir R., Bay O. F. (2004). Kohonen Network based fault diagnosis and condition monitoring of serial wound starter motors. *IJSIT Lecture Note of International Conferense on Intelligent Knowledge Systems*, 1(1).

11. Charytoniuk, W., Chen, M. S. (1995). Short-term Forecasting in Power Systems Using a General Regression Neural Network. *IEEE Trans. on Power Systems*, 7 (1).

12. Boiko S. (2018). The operative prognosis to the conditions of the electrical supply complex – electric consumption of mining companies. *Авіація, промисловість, суспільство: збірник тез доповідей I Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів – Aviation, Industry, Society: Proceedings of the First All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Cadets and Students (April 27, 2018, Kremenchuk)* (pp. 30). Kremenchuk, PP Shcherbatykh O. V.

*Serhii Boiko, Andrey Nekrasov, Oleksiy Gorodny,  
Alona Khebda, Artem Dmitrenko, Maryna Nozhnova*

## FORECASTING ELECTRICITY PROCESSING OF SIDE-BASED EQUIPMENT IN THE IMPLEMENTATION OF THEIR DISPOSABLE GENERATION ELECTRICAL SUPPLY SYSTEM

**Urgency of the research.** Iron ore are one of the largest consumers of fuel and energy resources in Ukraine. At the same time, the analysis of the distribution of electricity consumption flows shows that a large share of electric energy belongs to local energy objects, which, in general, determines the relevance of the study of the issue of the features of prediction of electricity consumption from the network in the conditions of enterprises and the relevance of the use of this combined approach, especially when implementing the electricity supply structure of these dispersed generation enterprises.

**Target setting.** The problematic robots  $\epsilon$  synthesis of peculiarities of the prediction of the electrical supply of households when they are supplied to the system of electrical distribution of the redundant generation.

**Actual scientific researches and issues analysis.** In previous studies, the authors substantiate the positive effect of the introduction of distributed generation sources in the conditions of industrial enterprises, namely modularity, reliability, local control, reduction of negative impact on the environment and small start-up period. These facilities, which are hundreds of hectares in the scale of Ukraine, can and should, in all their parameters, become a landfill for the dissemination of complex sources of dispersed generation, which in essence should become mini- or micro-power plants in the structure of power supply systems of Ukrainian enterprises, including iron ore enterprises.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** In the conditions of iron ore enterprise, which has a very complex and branched structure, and technological processes are very complex and depend on many factors, forecasting is a difficult and difficult task, provided that a forecast error not exceeding 4% is obtained. Therefore, in the conditions of the iron ore enterprise it is advisable to use artificial neural networks to predict the power consumption, which imply the presence of significant connections between individual factors.

**The research objective.** Thus, an urgent scientific and practical task is to study the features and mechanism of forecasting power consumption of iron ore enterprises when using sources of dispersed generation in the composition of their power supply.

**The statement of basic materials.** As a result of the analysis of the possibility of introducing dispersed generation in the energy systems of iron ore enterprises, it was found that the sources of dispersed generation affect the distribution networks of these enterprises and turn them into active elements. This leads to the necessity of changes in the strategy of management of the distribution networks of the enterprise and planning of the structure and regimes of local energy systems. The article proposes the use of artificial neural networks for the prediction of electric power consumption, especially when introducing sources of dispersed generation in the complex of power supply. Statistica program has been used to construct power consumption graphs from the general network of PJSC Poltava GOK using neural networks. The prediction result compared to the actual data has a slight deviation, which is acceptable.

**Conclusions.** To predict, with a sufficient degree of probability, the electricity consumption of the iron ore enterprises it is necessary to solve a multicriteria task with the obligatory preliminary determination of all factors influencing and determining the levels of energy consumption of a particular enterprise.

The application of neural networks in prediction systems of power parameters of distributed generation sources will allow for multifactor prognostication, which will improve the predictability of generated electricity by a rotational generation in time, in the conditions of iron ore enterprises.

**Keywords:** dispersed generation; electrical supply of enterprises; forecasting of electro-consumption; artificial neurons networks.

Fig.: 3. Bibl.: 12.

**Бойко Сергій Миколайович** – кандидат технічних наук, завідувач кафедри енергозабезпечення і систем управління, викладач кафедри енергозабезпечення і систем управління, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна).

**Boiko Serhii** – PhD in Technical Sciences, head of the department of energy supply and management systems, teacher of the department of energy supply and management systems, Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs (17/6 Peremohy Str., 39605 Kremenchuk, Ukraine).

**E-mail:** bsn1987@i.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-9778-2202>

**Scopus ID:** 56417478200

**Некрасов Андрій Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського (вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна).

**Nekrasov Andrey** – PhD in Technical Sciences, Kremenchuk National University of Michaylo Jstrogradskiy (17/6 Perchotravneva Str., 39600 Kremenchuk, Ukraine).

**E-mail:** boikosn2017@gmail.com

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3507-1987>

**Городній Олексій Миколайович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри промислової електроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна).

**Gorodny Oleksiy** – PhD in Technical Sciences, senior lecturer of the Industrial Electronics Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** aleksey.gorodny@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5303-9564>

**Web of Science:** H-1425-2016

**Scopus ID:** 55327980200; 56338229500; 57191829796

**Хебда Альона Сергіївна** – спеціаліст I категорії, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна).

**Khebda Alona** – specialist category I, Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs (17/6 Peremohy Str., 39605 Kremenchuk, Ukraine).

**E-mail:** alenahebda@gmail.com.

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1917-9509>

**Дмитренко Артем Юрійович** – аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського (вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна).

**Dmitrenko Artem** – Phd student, Kremenchuk National University of Michaylo Jstrogradskiy (17/6 Perchotravneva Str., 39600 Kremenchuk, Ukraine).

**E-mail:** boikosn2017@gmail.com

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3507-1987>

**Ножнова Марина Олександрівна** – викладач, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ (вул. Перемоги, 17/6, м. Кременчук, 39605, Україна).

**Nozhnova Maryna** – lecturer, Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs (17/6 Peremohy Str., 39605 Kremenchuk, Ukraine).

**E-mail:** marina.nozhnova@yahoo.com



*Viktor Kovalenko, Serhii Levchenko, Mykola Tryputen, Vitaliy Kuznetsov, Maksym Tryputen, Oleksiy Gorodny, Alisa Kuznetsova, Yevheniia Kuznetsova*

## CHARACTERISTIC LAYOUTS OF DISTRIBUTION NETWORKS WITH THE ANALYSIS OF VOLTAGE DEVIATIONS AND EXPEDIENCY OF ITS CONTROL

**Urgency of the research.** It is well-known that electric energy characteristics are the levels of electromagnetic compatibility of electric grid providing adequate performance of any electrical means connected to the grid if the electric energy characteristics do not exceed permitted values. In the context of general idea of electromagnetic compatibility of consumers within power supply grids, power quality is the topical problem of modern electric-power supply industry.

**Target setting.** The issue of assessing the possibility of ensuring the quality of electricity in terms of voltage deviation by consumers is very important. The problem of voltage fluctuations is relevant, so that voltage deviation have a negative impact on functioning electrical equipment

**Actual scientific researches and issues analysis.** Papers [2-11] are devoted the effective management methods of electrical energy consumption. The articles [6-8] shows that under present conditions only system approach ensures accurate identification and prediction of electric power losses in distribution networks that are characterized by considerable ambiguity.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Generalized diagram of the voltage modes characterizes the state for the entire distribution network connected to the main substation; it consists of the branched 10 kV network, all the distribution transformers, and all the 0.4 kV networks connected to those transformers. Along with the generalized diagram, values of the available voltage losses have been obtained; those values occur within 10 kV and 0.4 kV networks in terms of the favourable conditions of voltage control and the initial values of the admissible voltage deviations of electrical receivers. Moreover, that is the basis to determine operating position of control tapplings of distribution transformers.

**The research objective.** Since one of the important characteristics of electrical energy is the deviation of the voltage in the network, it is advisable to carry out its analysis in the urban distribution networks in terms of Levanevska substation, town of Zaporizhzhia. To simplify practical representation of possible voltage modes on the main substation buses and within the whole distribution networks, it is expedient to use graphic representation – so-called generalized diagram of voltage modes. That diagram helps make the analysis of voltage modes more demonstrative than analytical calculation; besides, the diagram gives great possibilities for further study.

**The statement of basic materials.** While analyzing voltage mode in the distribution networks and determining the required law of voltage control in the main substation (MS), one should take into consideration great amount of factors effecting and complicating that study. Those factors include the following: changes in the operating mode of the network, differences in the points of connections of electrical receivers (ER) to the distribution network, differences in possible operating positions of the control tapplings in the distribution transformers (DT), differences in the points of DT connections to 10 kV network, available dead zones of automatic voltage controller etc. Owing to that fact, it is required to perform generalized analysis of the voltage mode and conditions of its control within 10 kV and 0.4 kV distribution networks and on main substation buses. To do that, one should apply probabilistic calculation methods. At the same time, it is expedient to use graphic depiction (so-called generalized diagram (GD) of the voltage modes) to simplify representation of possible voltage modes on MS buses and within the whole distribution network. That diagram will help make the analysis of the voltage modes more clearly arranged than analytic calculations; moreover, it gives great opportunities for further study.

**Conclusions.** Voltage deviation in the distribution networks has been performed and expediency of the voltage deviation control for electrically closest and farthest consumers have been analyzed in terms of Levanevska substation, town of Zaporizhzhia. Expediency of practical application of generalized diagrams for that purpose has been demonstrated. It has been defined that in the modes of maximum and minimum loads, voltage exceeds the admissible deviation norms of  $\pm 5\%$ . Conclusion has been made on the expediency of more careful voltage control. Generalized diagram for 0-1 and 9-10 hours with the maximum voltage deviations has been constructed. Graph of dependences has been developed; formula of voltage deviations in the main substation, due to the voltage passing along that line, has been defined. According to the voltage data before and after the implementation of control, graphs of voltage deviations on the distribution transformer and in terms of the farthest consumer have been constructed.

**Keywords:** distribution networks; main substation; voltage deviation; transformer load; transformer voltage control (TVC); generalized diagram.

Table: 4. Fig.: 7. References: 11.

**Urgency of the research.** It is common knowledge that electric energy characteristics are the levels of electromagnetic compatibility of electric grid providing adequate performance of any electrical means connected to the grid if the electric energy characteristics do not exceed permitted values. In the context of general idea of electromagnetic compatibility of consumers within power supply grids, power quality is the topical problem of modern electric-power supply industry.

**Target setting.** The issue of assessing the possibility of ensuring the quality of electricity in terms of voltage deviation by consumers is very important. The problem of voltage fluctuations is relevant, so that voltage deviation have a negative impact on functioning electrical equipment.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Papers [2-11] are devoted the effective management methods of electrical energy consumption. The articles [6-8] shows that under present conditions only system approach ensures accurate identification and prediction of electric power losses in distribution networks that are characterized by considerable ambiguity.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Generalized diagram of the voltage modes characterizes the state for the entire distribution network connected to the main substation; it consists of the branched 10 kV network, all the distribution transformers, and all the 0.4 kV networks connected to those transformers. Along with the generalized diagram, values of the available voltage losses have been obtained; those values occur within 10 kV and 0.4 kV networks in terms of the favourable conditions of voltage control and the initial values of the admissible voltage deviations of electrical receivers. Moreover, that is the basis to determine operating position of control tapplings of distribution transformers.

**The research objective.** Since one of the important characteristics of electrical energy is the deviation of the voltage in the network, it is advisable to carry out its analysis in the urban distribution networks in terms of Levanevska substation, town of Zaporizhzhia. To simplify practical representation of possible voltage modes on the main substation buses and within the whole distribution networks, it is expedient to use graphic representation – so-called generalized diagram of voltage modes. That diagram helps make the analysis of voltage modes more demonstrative than analytical calculation; besides, the diagram gives great possibilities for further study.

**The statement of basic materials.** While analyzing voltage mode in the distribution networks and determining the required law of voltage control in the main substation (MS), one should take into consideration great amount of factors effecting and complicating that study. Those factors include the following: changes in the operating mode of the network, differences in the points of connections of electrical receivers (ER) to the distribution network, differences in possible operating positions of the control tapplings in the distribution transformers (DT), differences in the points of DT connections to 10 kV network, available dead zones of automatic voltage controller etc. Owing to that fact, it is required to perform generalized analysis of the voltage mode and conditions of its control within 10 kV and 0.4 kV distribution networks and on main substation buses.

To do that, one should apply probabilistic calculation methods. At the same time, it is expedient to use graphic depiction (so-called generalized diagram (GD) of the voltage modes) to simplify representation of possible voltage modes on MS buses and within the whole distribution network. That diagram will help make the analysis of the voltage modes more clearly arranged than analytic calculations; moreover, it gives great opportunities for further study.

Generalized diagram of the voltage modes characterizes the situation for the entire distribution network connected to MS; the diagram consists of the branched 10 kV network, all the DTs, and all the 0.4 kV networks connected to those transformers. Fig. 1 demonstrates principal diagram of the mentioned distribution network. In this context, it means that DT may be switched on at any point of 0.4 kV network, and ER may be connected at any point of 0.4 kV distribution network.

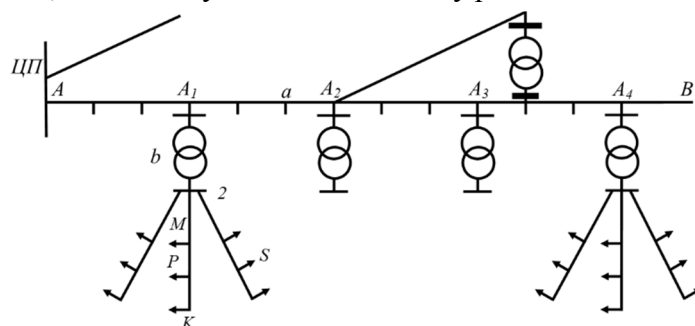


Fig. 1. Principle diagram of 10 kV and 0.4 kV distribution network:  
*a* – 10 kV network; *b* – distribution transformers (DT); *c* – 0.4 kV network; *d* – electrical receivers (ER)

GD is the basis to determine conditions of voltage control on MS buses in terms of which deviations from nominal voltage on ER clamps connected to the mentioned distribution networks are within the admissible limits. Along with GD, values of the available voltage losses may be obtained; those losses may be observed within 10 kV and 0.4 kV networks in terms of the adopted conditions of voltage control in MS and the initial values of the admissible voltage deviations in ER. Moreover, that is the basis to define operating position of DT control tappings.

While constructing generalized diagram of voltage modes, assumption is made on the fact that all the values of voltage losses from MS to each network point and from each network point to any ER are changing in a mutually proportional way. That assumption simplifies to certain extent graphic representation of the aforementioned values and construction of the generalized diagram on the whole. However, it meets the condition of homogeneity of all the connected power consumers in terms of the convergence (with practically adopted degree of accuracy) of their load diagrams.

In terms of urban networks, that condition is true to some extent only for public utility loads. Other consumers (educational institutions, trade organizations, industrial and tractive facilities) may differ considerably in their load diagrams.

Following condition is taken as the validation criterion to solve the problem of voltage control in MS: voltage deviation from the nominal value for all ERs connected to the network should not be beyond the limits of the admissible values [1]. In this context, all the network sites and all the loads are considered to be three-phase and symmetric. As it has been already mentioned, that condition is somehow idealized. Available three-phase loads, tappings, and differences in the phase properties within certain sections of a three-phase network result in asymmetric voltages and increased actual voltage deviations in ER comparing to the calculated values obtained for the mentioned idealized conditions. In practice, voltage loss on zero wire may be up to 25 % (sometimes, up to 50 %) of the voltage loss in phase wires. Thus, calculation values of the admissible voltage losses should be reduced by not less than 0.5-1 %, i.e. they should be taken within the range of  $\pm 4.5-4\%$  instead of  $\pm 5\%$  of the nominal voltage. Nevertheless, that will result practically in the unjustified cost rising of 10 kV network since the actual situation cannot be determined by the simplified calculation.

In terms of simplified analysis of voltage modes, two boundary operating modes are considered: maximum and minimum loads. In the context of the favourable initial conditions, all other possible operating modes of the network are intermediate. Voltage deviations from the nominal value in the maximum-load mode at the network point are marked as  $V'$ ; in terms of minimum-load mode, they are identified as  $V''$  (Fig. 2).

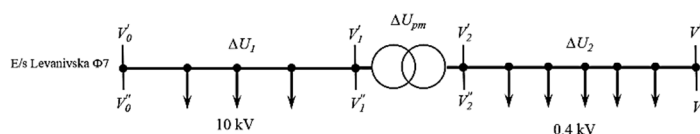


Fig. 2. Diagram of substitution of the distribution network

Tables 1 and 2 represent parameters of electrically closest and farthest points of 0.4 kV and 10 kV feeder Φ-7 of *Levanevska* electric substation, town of Zaporizhzhia.

While constructing diagrams, relative (in percentage form) values  $V''$  are laid along the abscissa axis, and values  $V'$  are laid along the ordinates axis. According to the condition taken before, ER voltage should not go beyond the admissible limits of  $\pm 5\%$  of the nominal one; thus, it is possible to imagine corresponding range of admissible conditions of ER operation in the form of a square with the side of 10 % and the center at the origin of coordinates. In terms of the adopted coordinate axes, voltage modes at each point of the network are characterized by certain point on the diagram, which coordinates define maximum and minimum voltage deviations.

*Parameters of 0.4 kV network*

Time, hour	Voltage of the closest point, V	Deviations from the nominal value, %	Voltage of the farthest point, V	Deviations from the nominal value, %
1	2	3	4	5
0	418	10.1	411	8.1
1	418	10.1	411	8.1
2	415	9.1	407	7.2
3	415	9.1	407	7.2
4	411	8.1	403	6.1
5	405	6.7	397	4.4
6	400	5.2	389	2.3
7	389	2.4	374	-1.5
8	370	-2.7	345	-9.2
9	377	-0.9	354	-6.8
10	374	-1.6	350	-8.0
11	386	1.5	369	-3.0
12	383	0.7	364	-4.2
13	377	-0.9	354	-6.8
14	379	-0.2	357	-6.1
15	392	3.3	371	-2.3
16	393	3.3	380	-0.1
17	395	4.0	383	0.8
18	391	3.0	378	-0.5
19	402	5.9	392	3.1
20	404	6.4	394	3.8
21	408	7.4	398	4.7
22	412	8.5	406	7.0
23	418	10.0	410	7.8

Table 2

*Parameters of 10 kV network*

Time, hour	Voltage of the closest point, V	Deviations from the nominal value, %	Voltage of the farthest point, V	Deviations from the nominal value, %
0	10.7	7	10.2	2
1	10.7	7	10.2	2
2	10.6	6	10.1	1
3	10.6	6	10.1	1
4	10.6	6	10	0
5	10.6	6	9.9	-1
6	10.6	6	9.8	-2
7	10.6	6	9.6	-4
8	10.3	3	9.25	-7.5
9	10.4	4	9.4	-6
10	10.3	3	9.35	-6.5
11	10.3	3	9.55	-4.5
12	10.4	4	9.5	-5
13	10.4	4	9.4	-6
14	10.4	4	9.45	-5.5
15	10.5	5	9.65	-3.5
16	10.5	5	9.65	-3.5
17	10.6	6	9.7	-3
18	10.6	6	9.62	-3.8
19	10.6	6	9.85	-1.5
20	10.6	6	9.9	-1
21	10.6	6	10	0
22	10.6	6	10.1	1
23	10.6	6	10.2	2

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Difference in ordinates of any two points along the straight line determines voltage loss between the corresponding line points in the mode of maximum loads; difference in abscissas defines the same but in terms of the mode of minimum loads.

Voltage deviations from the nominal values have been analyzed. It has been identified that in terms of the modes of maximum and minimum loads, voltage exceeds the admissible deviation norms of  $\pm 5\%$ . Conclusion has been made on the expediency of better voltage control. Generalized diagram for 0-1 and 9-10 hours, having the greatest voltage deviations, has been constructed (Fig. 3, 4).

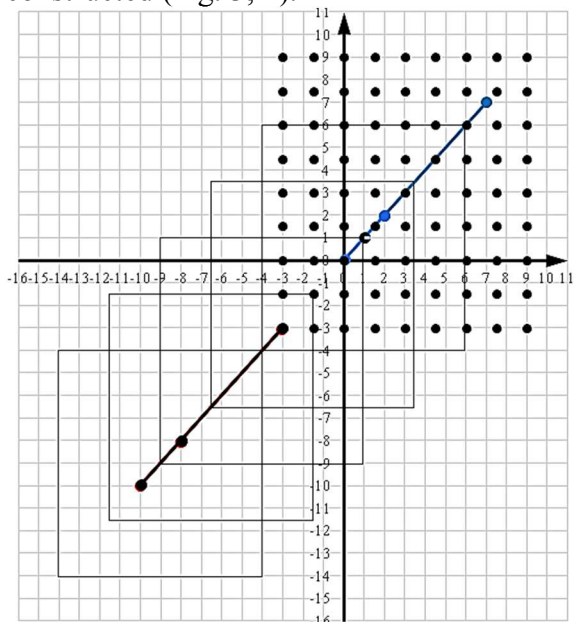


Fig. 3. Generalized diagrams for 0-1 hours

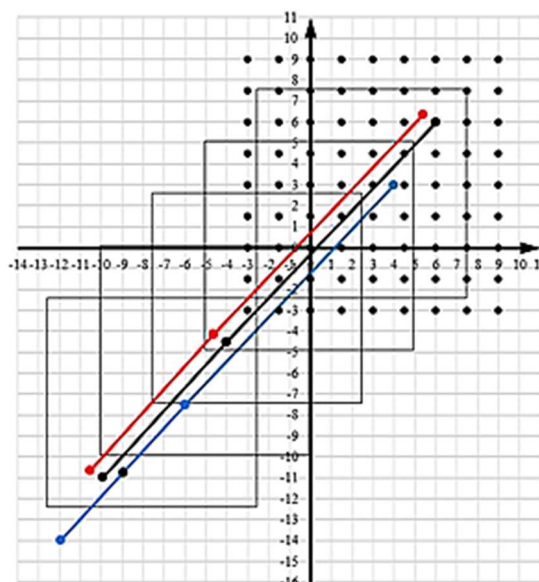


Fig. 4. Generalized diagrams for 9-10 hours

Possible variants of control highlighted in black dots are at the distance of 1.5 % from each other according to the control step of the transformer voltage control in the main substation, i.e. at *Levanevska* substation. Blue colour shows operating modes of 10 kV and 0.4 kV networks for that system. Normal operating mode requires displacement of the system so that the center of 0.4 kV network will coincide with the center of squares (it is represented in the red line) which shows tapplings of distribution transformers. Since TVC allows controlling only in a step-like mode, then we use the closest control point for the main substation (black line).

Values of voltage deviation in the main substation with the closest TVC steps have been determined for each hour and represented in Table 3.

Table 3

Controle mode

Time, hour	Voltage deviation in MS, %	TVC position	Power, kV·A
1	2	3	4
0	-3.05	-3	37
1	-3.05	-3	37
2	-3.08	-3	37
3	-3.08	-3	37
4	-2.07	-1.5	37
5	-0.68	0	44
6	0.87	1.5	54
7	2.70	3	69
8	6.35	6	100
9	5.39	6	94
10	5.25	6	99
11	2.40	3	77

1	2	3	4
12	3.61	3	83
13	5.39	6	94
14	4.63	4.5	90
15	1.64	1.5	63
16	1.80	1.5	62
17	1.70	1.5	58
18	2.35	3	63
19	0.18	0	51
20	-0.39	0	50
21	-1.37	0	50
22	-2.30	-3	48
23	-3.12	-3	40

According to the table data, diagram of dependences of voltage deviations in the main substation upon the power flowing through that line has been constructed (Fig. 5).

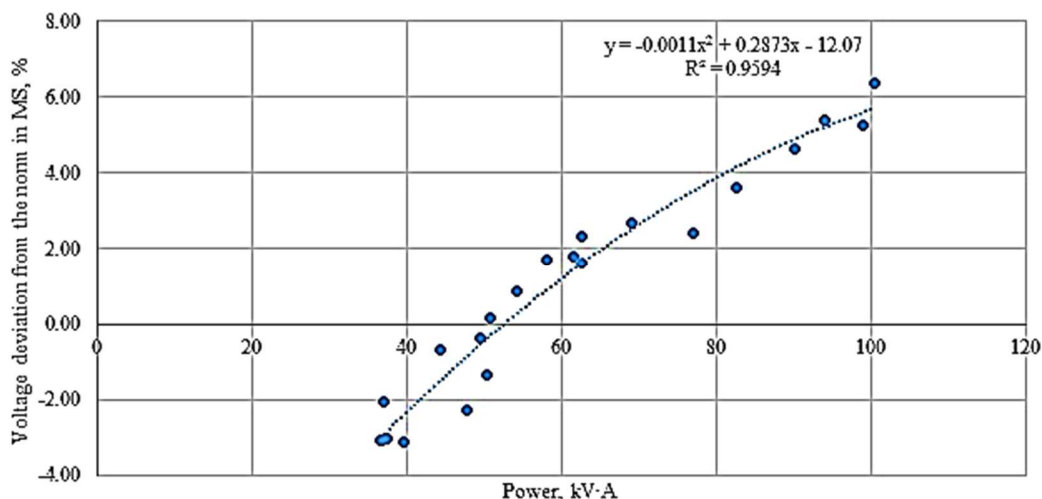


Fig. 5. Control mode for the network

With the help of approximation, maximally accurate dependence has been determined, i.e. polynomial one being represented in formula:

$$V_0(S) = -0.0011S^2 + 0.2873S - 12.07 . \quad (1)$$

According to the data before and after the implementation of control, graphs of voltage deviations within the distribution transformer in terms of the farthest consumer has been constructed (Fig. 6, 7). Red lines display deviation norms being equal to  $\pm 5\%$ .

Knowing the line parameters ( $r = 0.64$  Ohm/km,  $l = 0.95$  km), voltage losses before and after the implementation of energy-saving measures have been calculated and added to Table 4.

Thus, apart from the improved voltage quality, one can observe decreased losses in the network as well. According to the electricity tariff, daily effect from the voltage control is 9.17 kW·h that is UAH 18.1 per day or UAH 6.501 thous. per year.

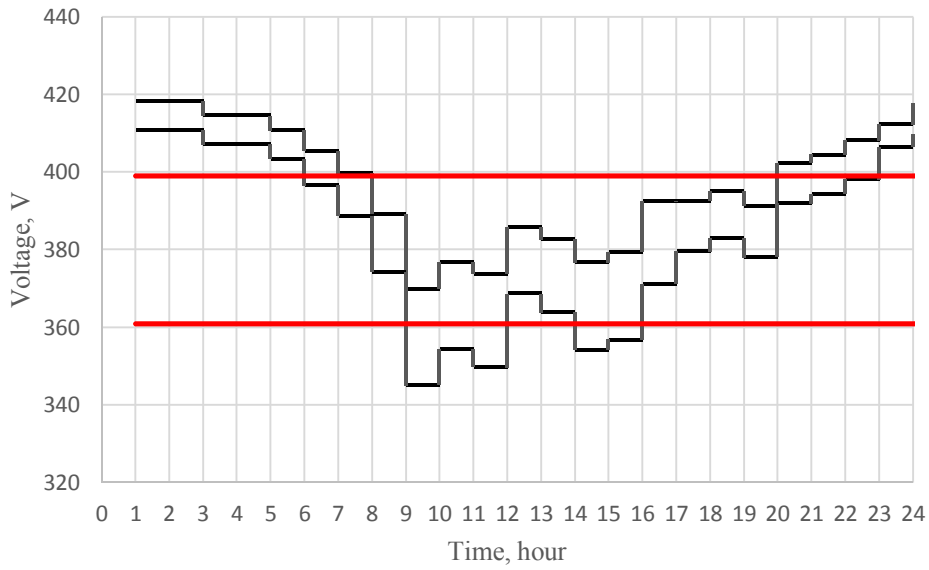


Fig. 6. Voltage deviations before the implementation of control

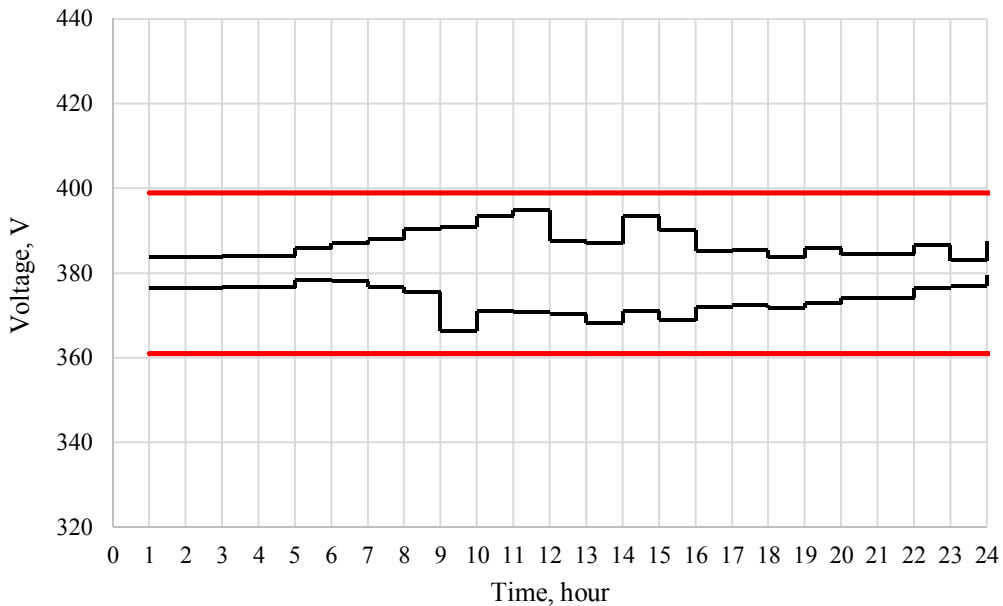


Fig. 7. Voltage deviations after the implementation of control

Table 4

Effect from the implementation of control mode

ime, hour	Before the implementation of control mode			After the implementation of control mode			Effect, kW
	Voltage U, V	Current I, A	Voltage losses P, kW	Voltage U, B	Current I, A	Voltage losses P, kW	
1	2	3	4	5	6	7	8
0	411	91.2	5.06	376	99.5	6.02	-0.96
1	411	90.5	4.98	376	98.8	5.93	-0.95
2	407	90.7	5	377	98.0	5.84	-0.84
3	407	90.1	4.94	377	97.5	5.78	-0.84
4	403	91.7	5.11	378	97.7	5.81	-0.7
5	397	111.8	7.6	378	117.3	8.36	-0.76
6	389	139.7	11.86	377	144.0	12.61	-0.75

1	2	3	4	5	6	7	8
7	374	184.5	20.7	375	184.0	20.58	0.12
8	345	291.1	51.52	366	274.2	45.71	5.81
90	354	265.1	42.73	371	253.1	38.94	3.78
10	350	283.2	48.75	371	267.0	43.35	5.4
11	369	208.9	26.53	370	207.8	26.27	0.27
12	364	226.9	31.29	368	224.2	30.57	0.73
13	354	265.4	42.84	371	253.4	39.04	3.8
14	357	252.9	38.88	369	244.6	36.39	2.49
15	371	168.6	17.29	372	168.2	17.21	0.08
16	380	162.3	16.02	372	165.5	16.65	-0.63
17	383	151.8	14.01	372	156.4	14.88	-0.87
18	378	165.8	16.71	373	168.1	17.18	-0.47
19	392	129.8	10.25	374	136.0	11.25	-1
20	394	125.8	9.62	374	132.6	10.68	-1.06
21	398	126.6	9.75	376	133.9	10.9	-1.15
22	406	117.6	8.41	377	126.8	9.78	-1.37
23	410	96.7	5.69	380	104.4	6.63	-0.94
			$\Sigma 455.54$			$\Sigma 446.37$	$\Sigma 9.17$

**Conclusions.** Voltage deviation in the distribution networks has been performed and expediency of the voltage deviation control for electrically closest and farthest consumers have been analyzed in terms of *Levanevska* substation, town of Zaporizhzhia. Expediency of practical application of generalized diagrams for that purpose has been demonstrated.

It has been defined that in the modes of maximum and minimum loads, voltage exceeds the admissible deviation norms of  $\pm 5\%$ . Conclusion has been made on the expediency of more careful voltage control. Generalized diagram for 0-1 and 9-10 hours with the maximum voltage deviations has been constructed. Graph of dependences has been developed; formula of voltage deviations in the main substation, due to the voltage passing along that line, has been defined.

According to the voltage data before and after the implementation of control, graphs of voltage deviations on the distribution transformer and in terms of the farthest consumer have been constructed.

### References

1. GOST 13109-97. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniia obshchego naznacheniiia [Quality standards of electric energy in general-purpose electric power supply systems]. [in English].
2. Vorotnitskii, V. E. (2006). *Poteri elektroenergii v elektricheskikh setiakh analiz i opyt snizheniia* [Energy losses in electric networks: analysis and practice of its reduction]. Moscow: NTF Enrgoprogress [in Russian].
3. Zhelezko, Yu. S., Artemiev, A. V. & Savchenko, O. V. (2002). *Raschet analiz i normirovanie poter elektroenergii v elektricheskikh setiakh* [Calculation, analysis, and standardization of energy losses in electric networks]. Moscow: Izd-vo NTS ENAS [in Russian].
4. I 34-70-028-86. *Instruktsiia po snizheniiu tekhnologicheskogo raskhoda elektricheskoi energii na peredachu po elektricheskim setiam energosistem i obieedinenii* [Instruction to reduce technological consumption of electric power for the transmission through electric networks of electric systems and interconnections] (1987). Moscow: SPO Soiuztekhenergo [in Russian].
5. I 34-70-030-87. *Instruktsiia po raschetu i analizu tekhnologicheskogo raskhoda elektricheskoi energii na peredachu po elektricheskim setiam energosistem i energoobieedinenii* [Instruction to calculate and analyze technological consumption of electric power for the transmission through electric networks of electric systems and power interconnections] (1987). Moscow: SPO Soiuztekhenergo [in Russian].
6. Zgurovets, O. V. & Kostenko, G. P. (2007). Effektivnye metody upravleniia potrebleniem elektricheskoi energii [Efficient methods to control electric energy consumption]. *Problemy zahalnoi enerhetyky – Problems of general energetics*, 16, 75–80 [in Russian].



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

7. Zhelezko, Yu. S., Artemiev, A. V. & Savchenko, O. V. (2002). Raschet normativnykh kharakteristik tekhnicheskikh poter elektroenergii [Calculating normative characteristics of technical power losses]. *Elektricheskie stantsii – Power stations*, 2, 45–51 [in Russian].

8. Derzkii, V. G. & Tokalin, O. A. (2001). Sistemnyi podkhod k vyboru meropriiatiu posnizheniiu poter energii v raspredelitelnykh setiakh [System approach to select measures for power loss reduction in the distribution networks]. *Energetika i elektrifikatsiia – Energetics and electrification*, 10, 41–43 [in Russian].

9. Derzkii, V. G. (2002). Ekspertiza struktury poter elektroenergii vraspredelitelnykh setiakh Mintopenergo [Expert evaluation of the structure of power loss in the distribution networks of Mintopenergo]. *Energetika i elektrifikatsiia – Energetics and electrification*, 4, 18–22 [in Russian].

10. Derzkii, V. G. (2005). Rozrakhunok vtratelektroenerhii v rozpodilnykhmerezakh 0,38 kV [Calculating power losses in 0.38 kV distribution networks]. *Enerhetyka ta elektryfikatsiia – Energetics and electrification*, 9, 32–40 [in Ukrainian].

11. Melnichuk, L. M. (2006). Vyznachennia ta rozpodilennia vtrat elektrychnoi enerhii mizh spozhyvachamy z urakhuvanniam yikh hrafikiv navantazhen [Determining and distributing power losses among the consumers taking into account the load diagrams]. *Enerhetyka ta elektryfikatsiia – Energetics and electrification*, 5, 19–21 [in Ukrainian].

УДК 621.396

*Віктор Коваленко, Сергій Левченко, Микола Трипутень, Віталій Кузнецов,  
Максим Трипутень, Олексій Городній, Аліса Кузнецова, Євгенія Кузнецова*

### РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ РОБОТИ ХАРАКТЕРНИХ СХЕМ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ З АНАЛІЗОМ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ Й ДОЦІЛЬНОСТІ ЇЇ РЕГУЛЮВАННЯ

*Актуальність теми дослідження.* Загальновідомо, що характеристики електричної енергії – це рівні електромагнітної сумісності електричної мережі, що забезпечують адекватну продуктивність будь-яких електричних засобів, підключених до мережі, якщо характеристики електричної енергії не перевищують дозволених значень. Якість електроенергії в контексті загальної ідеї електромагнітної сумісності споживачів в електромережах є актуальною проблемою сучасної галузі електропостачання.

*Постановка проблеми.* Питання оцінки можливості забезпечення якості електроенергії в умовах відхилення напруги споживачами є дуже важливим. Проблема коливань напруги є актуальною, оскільки остання негативно впливає на функціонування електричного обладнання.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Роботи авторів [2-11] присвячені ефективним методам управління споживанням електричної енергії. Зокрема статті [6-8] доводять, що в нинішніх умовах лише системний підхід забезпечує точну ідентифікацію та прогнозування втрат електроенергії в розподільних мережах, які характеризуються значною неоднозначністю.

*Виділення недосліджених частин загальної проблеми.* Узагальнена діаграма (УД) режиму напруг характеризує стан одночасно для всієї розподільної мережі, приєднаної до центру живлення (ЦЖ) і складається з розгалуженої мережі 10 кВ, усіх розподільних трансформаторів і всіх мереж 0,4 кВ, приєднаних до цих трансформаторів. Одночасно з узагальненою діаграмою отримано значення наявних величин втрат напруги, які при прийнятих умовах регулювання напруги в ЦЖ і вихідних значеннях допустимих відхилень напруги у електроприймачів можуть мати місце в розподільних мережах 10 кВ і 0,4 кВ. Крім того, звідси ж визначено робоче положення регулювальних відгалужень розподільного трансформатора.

*Постановка завдання.* Оскільки однією з важливих характеристик електричної енергії є відхилення напруги в мережі, доцільно провести її аналіз у міських розподільних мережах на території підстанції Лєваневська, м. Запоріжжя. Для спрощеного практичного уявлення про можливі режими напруги на шинах центру живлення ЦЖ і у всій розподільній мережі загалом доцільно використовувати графічну побудову – так звану узагальнену діаграму режиму напруг. Аналіз режиму напруг за допомогою цієї діаграми є більш наочним, ніж аналітичний розрахунок, і надає великі можливості.

*Виклад основного матеріалу.* Під час аналізу режиму напруги в розподільних мережах і у процесі визначення, зокрема, необхідного закону регулювання напруги в центрі живлення ЦЖ доводиться враховувати велику кількість факторів, що впливають і великою мірою ускладнюють дослідження. До числа цих факторів відносяться: зміна режиму роботи мережі, відмінність місць приєднання електроприймачів ЕП до розподільної мережі, відмінність можливих робочих положень регулювальних відгалужень у розподільних трансформаторах РТ, відмінність місць приєднання РТ до мережі 10 кВ, наявність зони нечутливості у автоматичного регулятора напруги і т. ін. У зв'язку з цим доводиться проводити узагальнений аналіз режиму напруги й умов її регулювання в розподільних мережах 10 кВ і 0,4 кВ та на шинах ЦЖ спільно.

Для цієї мети слід застосовувати ймовірнісні методи розрахунків. У той же час для спрощеного практичного уявлення про можливі режими напруги на шинах ЦЖ і у всій розподільній мережі в цілому доцільно використовувати графічну побудову – так звану узагальнену діаграму УД режиму напруг. Аналіз режиму напруг за допомогою цієї діаграми є більш наочним, ніж аналітичний розрахунок, і надає великі можливості.

*Висновки відповідно до статті.* Проведено аналіз відхилення напруги в розподільних мережах і доцільності його регулювання для електрично найближчого та найвіддаленішого споживача на прикладі підстанції «Лєваневська», м. Запоріжжя. Показано доцільність практичного застосування для цього узагальнених діаграм.

Виявлено, що в режимах максимуму та мінімуму навантажень напруга перевищує допустимі норми відхилень  $\pm 5\%$ . Зроблено висновок про доцільність більш ретельного регулювання напруги. Побудовано узагальнену діаграму для 0-1 та 9-10 годин, які мають найбільші відхилення напруги.

Побудовано графік залежності та знайдено формулу відхилення напруги в центрі живлення від потужності, що проходить по цій лінії.

За даними напруги до і після впровадження регулювання, побудовано графіки відхилення напруги на розподільчому трансформаторі й у найвіддаленішого споживача.

**Ключові слова:** розподільчі мережі; центр живлення; відхилення напруги; навантаження трансформатора; регулювання напруги трансформатора РПН; узагальнена діаграма.

Табл.: 4. Рис.: 7. Бібл.: 11.

**Kovalenko Viktor** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Electrical Engineering and Energy Efficiency, Zaporizhzhya National University (66 Zhukovsky Str., 69600 Zaporizhzhya, Ukraine).

**Коваленко Віктор Леонідович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехніки та енергоефективності, Запорізький національний університет (вул. Жуковського, 66, м. Запоріжжя, 69600, Україна).

**E-mail:** kovalenko\_v\_l@i.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5950-4412>

**Levchenko Serhii** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Energy Efficiency, Zaporizhzhya State Engineering Academy (226 Sobornyi Av., 69006 Zaporizhzhya, Ukraine).

**Левченко Сергій Андрійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Електротехніка та енергоефективність», Запорізька державна інженерна академія (просп. Соборний, 226, м. Запоріжжя, 69006, Україна).

**E-mail:** levchenko\_s@rambler.ru.

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-4355-5065>

**Tryputen Mykola** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Computer Systems, Dnipro University of Technology (19 Dmytriy Yavornitskyi Av., 49000 Dnipro, Ukraine).

**Трипутень Микола Мусійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерних систем, Національний ТУ «Дніпровська політехніка» (просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49000, Україна).

**E-mail:** nikolay.triputen@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-4523-927X>

**Scopus ID:** 57209004713

**Kuznetsov Vitaliy** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of the Electrical Engineering and Electromechanic, National Metallurgical Academy of Ukraine (4 Gagarin Av., 49000 Dnipro, Ukraine).

**Кузнецов Віталій Вадимович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехніки та електропривода, Національна металургійна академія України (просп. Гагаріна, 4, м. Дніпро, 49000, Україна).

**E-mail:** wit1975@i.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-8169-4598>

**Scopus ID:** 57188644610

**Tryputen Maksym** – student, Oles Honchar Dnipro National University (35 D. Yavornitsky Av., 49000 Dnipro, Ukraine).

**Трипутень Максим Миколайович** – студент кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара (просп. Д. Яворницького, 35, м. Дніпро, 49000, Україна).

**E-mail:** triputen2014@i.ua

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6915-8162>

**Gorodny Oleksiy** – PhD in Technical Sciences, senior lecturer of the Industrial Electronics Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**Городній Олексій Миколайович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри промислової електроніки, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**E-mail:** aleksey.gorodny@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5303-9564>

**Web of Science:** H-1425-2016

**Scopus ID:** 55327980200; 56338229500; 57191829796

**Kuznetsova Alisa** – student, Oles Honchar Dnipro National University (35 D. Yavornitsky Av., 49000 Dnipro, Ukraine).

**Кузнецова Аліса Віталіївна** – студентка, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара (просп. Д. Яворницького, 35, м. Дніпро, 49000, Україна).

**E-mail:** alisa20002014@i.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-4772-683X>

**Scopus ID:** 57211399983

**Kuznetsova Yevheniia** – senior lecturer of the Department of humanitarian, fundamental and general engineering disciplines, National metallurgical academy of Ukraine (4 Gagarin Av., 49000 Dnipro, Ukraine).

**Кузнецова Євгенія Валеріївна** – старший викладач кафедри гуманітарних, фундаментальних та загальноінженерних дисциплін, Національна металургійна академія України (просп. Гагаріна, 4, м. Дніпро, 49000, Україна).

**E-mail:** wit\_jane2000@i.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-2224-8747>

**Scopus ID:** 57205606244

## РОЗДІЛ IV. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 637.03

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-219-225

Наталія Болгова, Катерина Кревсун

### ВИКОРИСТАННЯ ЕКСТРАКТУ ЛИСТЯ ВОЛОСЬКОГО ГОРІХА В ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАВЛЕНИХ СИРІВ

**Актуальність теми дослідження.** Сучасна харчова промисловість має вирішувати не лише завдання безпечності продукту, а й питання ролі продуктів харчування у профілактиці дефіциту йоду. Популяризація ролі харчування у профілактиці захворювань аліментарного характеру має своє відображення у стійкій тенденції збільшення об'ємів та розширенні асортименту харчових продуктів, збагачених біологічно активними добавками, зокрема йодом. Особливий інтерес і у виробників, і у споживачів викликають рослинні добавки.

**Постановка проблеми.** Незважаючи на широту асортименту плавлених сирів, відбувається постійне його оновлення. Це зумовлено необхідністю задовольнити вимоги науки, зміною споживчого попиту, наявністю сировини, рентабельністю того чи іншого виду сиру. Підвищена зацікавленість до цієї продукції викликана її здатністю добре зберігати свої якості під час тривалого зберігання, можливістю поєднувати різні компоненти, зокрема немолочного походження, а в результаті отримати продукт високої харчової і біологічної цінності. Враховуючи наведені вище факти зауважимо, що розробка плавлених сирів із листям волоського горіха набуває важливого значення і є актуальною науково-практичною темою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Були розглянуті сучасні публікації українських та закордонних науковців щодо шляхів вирішення проблеми дефіциту йоду шляхом введення в рецептуру продукту рослинної добавки.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Отже, для організації профілактики захворювань необхідне подальше вивчення та більш глибоке дослідження технологій харчових продуктів функціонального напрямлення. Враховуючи той факт, що плавлені сири є досить доступним продуктом для більшості населення України, вважаємо за доцільне розширити їх асортимент саме за рахунок внесення в рецептуру екстракту листя волоського горіха.

**Постановка завдання.** Метою роботи була розробка рецептури та обґрунтування технології виробництва функціонального плавленого сиру з додаванням екстракту листя волоського горіха ТОВ «НВК Віларус», а також обґрунтування розширення асортименту плавлених сирів функціонального напрямлення.

**Виклад основного матеріалу.** Розроблено рецептуру та обґрунтовано технологію виробництва плавлених сирів з рослинним компонентом. Експериментально досліджена якість та органолептичні характеристики. Розрахунковим методом встановлено кількість йоду, що буде містити розроблений продукт.

**Висновки відповідно до статті.** Отримані результати органолептичних, фізико-хімічних та структурно-механічних досліджень дозволяють констатувати, що плавлений сир із додаванням 5% екстракту листя волоського горіха ТОВ «НВК Віларус» є продуктом із бажаними споживчими характеристиками та підвищеним вмістом йоду. Це дозволить не лише розширити асортимент функціональних продуктів харчування, а й дасть змогу проводити профілактику дефіциту йоду.

**Ключові слова:** плавлений сир; йод; профілактика йододефіциту; екстракт листя волоського горіха; органолептика; структурно-механічні властивості.

Рис.: 1. Табл.: 2. Бібл.: 15.

**Актуальність теми дослідження.** Здоров'я нації безпосередньо залежить від якості та безпечності харчових продуктів. Нераціональне та неповноцінне харчування негативно впливає на якість нашого життя. Досить гостро постало питання дефіциту йоду в раціоні населення. Такий стан речей провокує збільшення щитовидної залози, появу ендемічного зоба, зниження інтелектуальних здібностей та фізичної активності, затримку розвитку дітей та ін. [1]. Популяризація ролі харчування у профілактиці захворювань аліментарного характеру має своє відображення у стійкій тенденції збільшення об'ємів та розширенні асортименту харчових продуктів збагачених біологічно активними добавками, зокрема йодом. Особливий інтерес і у виробників, і у споживачів викликають рослинні добавки.

**Постановка проблеми.** Найбільш ефективним методом ліквідації та профілактики дефіциту йоду є розробка нових продуктів функціонального напрямлення. Поряд зі здобутими властивостями вони мають бути безпечні та забезпечувати організм необхідними поживними речовинами. Вирішення цього завдання знайшли через широке використання йодовмісної рослинної сировини, в якій йод перебуває в біологічно доступному стані [2].

Незважаючи на широту асортименту плавлених сирів, відбувається постійне його оновлення. Це зумовлено необхідністю задовольнити вимоги науки, зміною споживчого попиту, наявністю сировини, рентабельністю того чи іншого виду сиру. Підвищена зацікавленість до цієї продукції викликана її здатністю добре зберігати свої якості під час тривалого зберігання, можливістю поєднувати різні компоненти, зокрема немолочного походження, а в результаті отримати продукт високої харчової і біологічної цінності [3].

Враховуючи наведені вище факти зауважимо, що розробка плавлених сирів з екстрактом листя волоського горіха набуває важливого значення і є актуальною науково-практичною темою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В Україні проблема дефіциту йоду все ще залишається досить гострою, як і в інших країнах світу. ВООЗ рекомендує вести профілактику йододефіцитних станів через йодування солі, хліба, масла, БАД та ін., що знайшло відображення в наукових роботах українських та закордонних науковців [4-7].

Єдиною умовою ефективності таких заходів залишається біологічна доступність введеного елемента. Такою природною основою характеризується екстракт листя волоського горіха.

Спираючись на дослідження, проведені О. Ю. Орловою, Л. А. Оганесянц та іншими, встановлено, що листя волоського горіха, зібрані на початку вегетації у травні, мають високий вміст йоду – 11,2 мг, що перевищує кількість його в листі, зібраному в червні й липні: 8,76 і 7,14 мг відповідно. Листя сушать у темному, добре провітрюваному приміщенні при температурі повітря 22-25 °С та відносній вологості 50-60 %. Порошок із висушеного й подрібненого листя волоського горіха сипучий, коричневого кольору. Він містить білок, клітковину, мінеральні речовини (калій, кальцій, магній, залізо, цинк) у кількості 7,8; 28,63; 8,54 % відповідно. Крім того, у ньому наявні водо- і жиророзчинні вітаміни Р, В1, В6, А, С; дубильні речовини і ефірне масло (3-4 і 0,03 % відповідно); елагова, галусова і кавова кислоти; барвник юглон, що проявляє бактерицидні та фунгістатичні властивості; флавоноїди - кверцетин і кемпферол. У листі, зібраному в травні, відзначили високий вміст аскорбінової кислоти, каротину і фосфору: 1300 мг%, понад 30 мг% і 564 мг відповідно [6; 8].

Необхідно зауважити, що питання технології плавлених сирів функціонального напрямлення досліджували багато науковців як в Україні, так і у світі [3; 9], у тому числі приділено увагу й питанням використання в рецептурі рослинних компонентів [10-12].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Враховуючи проведений аналіз літературних джерел можна зауважити, що проблема дефіциту йоду на території України не вирішена. Отже, для організації профілактики захворювань необхідне подальше вивчення та більш глибоке дослідження технологій харчових продуктів функціонального напрямлення. Враховуючи той факт, що плавлені сири є досить доступним продуктом для більшості населення України, вважаємо за доцільне розширити їх асортимент саме за рахунок внесення в рецептуру екстракту листя волоського горіха.

**Мета статті.** Метою роботи була розробка рецептури та обґрунтування технології виробництва плавленого сиру з додаванням екстракту листя волоського горіха ТОВ «НВК Віларус», а також обґрунтування розширення асортименту плавлених сирів функціонального напрямлення.

**Виклад основного матеріалу.** Для вирішення поставлених завдань у технології було обрано спосіб виробництва пастоподібного плавленого сиру. До рецептури увійшли такі інгредієнти: сир кисломолочний 9,5 %, масло солодковершкове 72,5 %, сіль кухонна, сода, яйця курячі, екстракт листя волоського горіха виробництва ТОВ «НВК Віларус». Для підвищення економічної ефективності виробництва в рецептуру для плавлення було обрано сир кисломолочний, що зумовлено його нижчою собівартістю на ринку, порівняно з твердими сирами. Як функціональний рослинний інгредієнт вносили

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

екстракт сухого листя волоського горіха ТОВ «НВК Віларус». Сировинні компоненти готують до плавлення і вносять у котел, а при температурі  $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$  додають суху суміш структуроутворювача із сіллю-плавителем і воду. Сирну масу плавлять при температурі  $(85 \pm 2)^\circ\text{C}$  з витримкою 15 хвилин. За 1-2 хвилини до закінчення плавлення вносять сухий харчовий екстракт листя волоського горіха ТОВ «НВК Віларус». Продукт охолоджують до  $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$  і направляють на фасування.

Для дослідження було обрано три зразки плавленого сиру з різним відсотком рослинної добавки: 1-й зразок – 3 %, 2-й – 5 %, 3-й – 7 % від маси сировини. Для визначення оптимальної кількості внесення екстракту листя волоського горіха, порівнювали досліджувані зразки з аналогом та між собою.

Враховуючи, що для споживачів важливе значення має зовнішній вигляд та запах продукту, групою із п'яти осіб була проведена дегустаційна оцінка представлених зразків. Кожний із показників оцінювали за 5-бальною системою. Результати представлено на рис. 1.

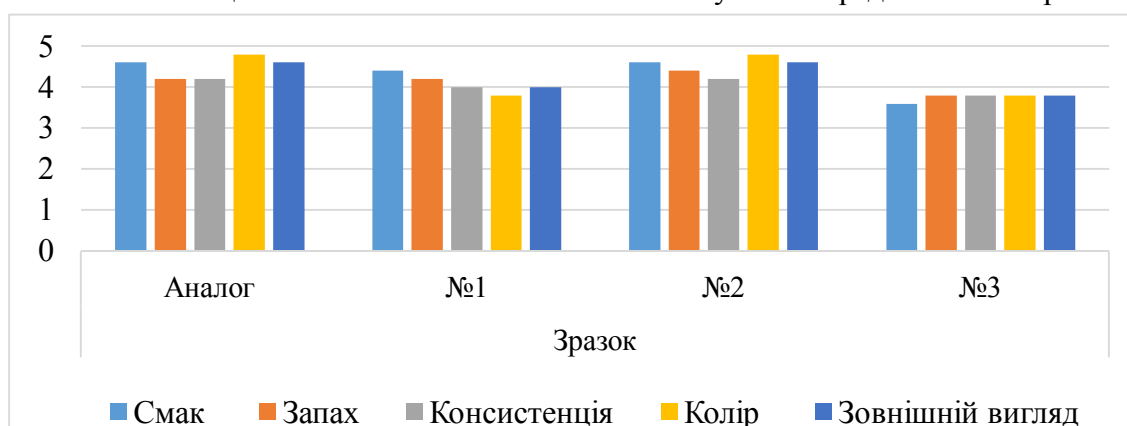


Рис. 1. Органолептична оцінка досліджуваних зразків, бал

Враховуючи отримані дані, треба зазначити, що аналог та зразок під номером 2 отримали найбільше балів: 22,4 та 22,6 відповідно. Перший зразок поступився відповідно на 2 і 2,2 бали. Середні показники органолептичної оцінки зразка під номером 3 становили 3,8 бали. Усі розрахунки були достовірні з вірогідністю  $p > 0,99$ .

Зважаючи на отримані результати, зауважимо, що введення в рецептуру плавленого сиру екстракту листя волоського горіха ТОВ «НВК Віларус» у кількості 5 % дозволило отримати, за результатами органолептичної оцінки, більш високі результати. Внесена добавка рівномірно розподіляється по всій масі, не чинить негативного впливу на смакові якості та консистенцію.

З метою комплексної оцінки розробленого продукту були проведені дослідження фізико-хімічних показників (табл. 1).

Таблиця 1

Фізико-хімічні показники дослідних зразків ( $M \pm m$ )

Найменування	Зразок			
	Аналог	№ 1	№ 2	№ 3
Масова частка вологи, %	60,10 $\pm$ 1,18	57,43 $\pm$ 1,12	52,73 $\pm$ 0,86	50,10 $\pm$ 0,65
Йоду, мг/100 г	-	0,07	0,11	0,19
Активна кислотність, рН	5,61 $\pm$ 0,16	5,71 $\pm$ 0,06	5,75 $\pm$ 0,17	5,78 $\pm$ 0,04
Кислотне число, мг/г:				
1-а доба	2,40 $\pm$ 0,11	2,65 $\pm$ 0,11	2,65 $\pm$ 0,04	3,15 $\pm$ 0,04
6-а доба	2,85 $\pm$ 0,35	2,69 $\pm$ 0,31	2,79 $\pm$ 0,14	3,29 $\pm$ 0,42
15-а доба	4,48 $\pm$ 0,24	4,23 $\pm$ 0,53	4,59 $\pm$ 0,55	4,82 $\pm$ 0,46

Як бачимо з даних табл. 1, усі фізико-хімічні показники плавленого сиру були в межах нормативної документації [13]. Значення масової частки вологи, зокрема, колива-

лося від 60,1 до 50,1 %, знижуючись зі збільшенням відсотка внесеної добавки екстракту листя волоського горіха. Аналогічна ситуація спостерігається із показником рН. Він був у межах норми – від 5,61 до 5,78. Значення активної кислотності нижче або вище 5,6-5,8 можуть призвести до появи вад: пухка, клейка, липка консистенція [3; 14]. Кислотне число є одним з якісних показників, залежить від якості сировини, способу отримання, умов зберігання та інших факторів. Його значення характеризує якість готового продукту. У разі недотримання умов і термінів зберігання кислотне число збільшується, що пов'язано здебільшого з гідролізом тригліцеридів [15]. Аналізуючи отримані результати бачимо, що всі зразки на п'ятнадцяту добу відповідали нормативному показнику і не перевищували 5 мг/г. Через 6 днів найбільше підвищився показник аналога на 0,45, а інші зразки – на 0,1 мг/г. Дещо вищі значення досліджуваного показника у третьому зразку. Найвірогідніше це пов'язано з добавкою екстракту листя волоського горіха. Вміст йоду в досліджуваних зразках визначали розрахунковим методом і його показник перебувають у прямій залежності від кількості екстракту листя волоського горіха ТОВ «НВК Віларус». Враховуючи представлену вище інформацію, вважаємо, що другий зразок розробленого плавленого сиру має найбільш бажані значення досліджуваних показників.

Треба зауважити, що оцінка розробленого продукту була б не повною без дослідження структурно-механічних показників (табл. 2).

Таблиця 2

Структурно-механічні показники ( $M \pm m$ )

Показник	Зразок		
	№ 1	№ 2	№ 3
Зусилля пентрації, кН/м <sup>2</sup>	8,78±1,004	8,70±1,054	15,06±1,046
Пружність, кН/м <sup>2</sup>	7,06±0,148	11,99±2,588	14,54±1,725
Робота різання, Дж	55,01±7,071	50,01±0,017	55,01±7,071
Зусилля зрізу, кН/м <sup>2</sup>	3,53±0,551	3,15±0,015	3,96±1,202

Аналізуючи отримані результати бачимо, що зі збільшенням у зразках плавлених сирів відсотка екстракту листя волоського горіха всі показники підвищуються за винятком другого зразка. Необхідно звернути увагу, що показник пенетрації, який характеризує щільність консистенції у зразку № 2, був нижчим порівняно з першим та третім зразками відповідно на 0,08 і 6,36. Показник пружності, що характеризує еластичність, збільшувався пропорційно відсотку рослинного компоненту. Значення показників роботи різанням та зусилля зрізу другого зразка дещо поступалися першому та третьому. Так, робота різанням у першому та третьому зразках мала однакові значення, що перевищує на 5 Дж значення другого зразка. Значення показника зрізу зразка № 2 поступалися першому на 0,38, а третьому – на 0,81 кН/м<sup>2</sup>.

Враховуючи отримані результати структурно-механічних досліджень можемо зробити висновок, що оптимальні значення має зразок № 2 до рецептури якого внесено 5% екстракту листя волоського горіха ТОВ «НВК Віларус».

**Висновки відповідно до статті.** Отримані результати органолептичних, фізико-хімічних та структурно-механічних досліджень дозволяють констатувати, що плавлений сир із додаванням 5 % екстракту листя волоського горіха ТОВ «НВК Віларус» є продуктом з бажаними споживчими характеристиками та підвищеним вмістом йоду. Це дозволить не лише розширити асортимент функціональних продуктів харчування, а й дозволить проводити профілактику дефіциту йоду.

#### Список використаних джерел

1. Платонова Н. М. Йодный дефицит: современное состояние проблемы. *Клиническая и экспериментальная тиреология*. 2015. Вып. 11, № 1. С. 12-21. DOI: 10.14341/ket2015112\_21.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

2. Паламарек К. Використання розроблених овочевих паст із йодовмісною сировиною в технології рулетів з овочевими начинками. *Технічні науки та технології*. 2019. № 1 (15). С. 235–245. DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-235-245.
3. Лупинская С. М., Ганцева А. Н. Изучение процесса плавления творожного сыра при производстве плавленых сыров. *Техника и технология пищевых производств*. 2017. Т. 46, № 3. С. 43-49.
4. Хворостина Е. Н., Калманович С. А., Верещагина А. П., Вербицкая Е. А. Перспективные направления использования добавок растительного происхождения в производстве плавленых сыров и плавленых сырных продуктов. *Новые технологии*. 2011. № 4. С. 103-106.
5. Соболева О. А., Дубинина Е. В., Головина Т. А. Влияние экстракта листьев грецкого ореха на качество безалкогольных напитков. *Пиво и напитки*. 2017. № 3. С. 44-48.
6. Орлова О. Ю., Пилипенко Т. В., Нилова Л. П., Никулина М. В. Традиционные и перспективные растительные источники йода для обогащения пищевых продуктов. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2015. № 4. С. 26-34.
7. Пилипенко Т. В., Рогинская Е. О. Разработка молочного десерта, обогащенного функциональными растительными добавками. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2018. Вып. 6. № 1. С. 40-48. DOI: 10.14529/food180105.
8. Оганесянц Л. А., Песчанская В. А., Дубинина Е. В. Исследование физико-химического состава водно-спиртовых экстрактов листьев грецкого ореха. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2016. № 11. С. 14-17.
9. Коваль О. А. Сир плавлений безфосфатний. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2015. Вип. 1(2). С. 62-68.
10. Дерев'янюк Н. П., Баженова Е. О. Фізико-хімічні показники плавленого сиру з екстрактом алое. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій ім. Гжицького*. 2015. Т. 17, № 1(2). С. 260-263.
11. Шувалова Е. Г., Долгорукова М. В. Технология плавленого сыра из смеси коровьего и козьего молока. *Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки»*. 2017. Т. 3, № 2 (10). С. 58-62.
12. Болгова Н. В., Байдак М. О. Ламінарія у виробництві плавлених сирів. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Т. 29 (68), № 5, ч. 3. С. 5-9.
13. ДСТУ 4635:2006. Сири плавлені. Загальні технічні умови. [Чинний від 01.07.2007]. Київ, 2007. 18 с.
14. Бовкун А. А. Производство плавленых сыров на основе творога. *Продукты & ингредиенты*. 2011. № 1 (76). С. 40-41.
15. Антипова Л. В., Глотова И. А., Рогов И. А. Методы исследования мяса и мясных продуктов. Москва: Колос, 2001. 376 с.

**References**

1. Platonova, N. M. (2015). Iodnyi defitsit: sovremennoe sostoianie problemy [Iodine deficiency: the current state of the problem]. *Klinicheskaiia i eksperimentalnaia tireoidologiiia – Clinical and experimental thyroidology*, 11 (1), 12-21. DOI: 10.14341/ket2015112\_21.
2. Palamarek, K. (2019). Vykorystannia rozroblynykh ovochevykh past iz yodovmisnoiui syrovynoiui v tekhnolohii ruletiv z ovochevymy nachynkamy [The use of developed vegetable pastes with iodine-containing raw materials in the technology of rolls with vegetable stuffing]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 1 (15), 235–245. DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-235-245.
3. Lupinskaia, S. M., Gantseva, A. N. (2017). Izuchenie protsesssa plavlennia tvorozhnoho syria pri proizvodstve plavlennykh syrov [The study of the melting process of curd cheese in the production of processed cheese]. *Tekhnika i tekhnologiiia pishchevykh proizvodstv – Technique and technology of food production*, 46 (3), 43-49 [in Russian].
4. Khvorostina, E. N., Kalmanovich, S. A., Vereshchagina, A. P., Verbitskaia, E. A. (2011). Perspektivnye napravleniia ispolzovaniia dobavok rastitelnoho proiskhozhdeniia v proizvodstve plavlennykh syrov i plavlennykh syrnykh produktov [Promising areas for the use of herbal additives in

the production of processed cheeses and processed cheese products]. *Novye tekhnologii – New technologies*, 4, 103-106 [in Russian].

5. Soboleva, O. A., Dubinina, E. V., Golovina, T. A. (2017). Vliianie ekstrakta listev gretskogo orekha na kachestvo bezalkoholnykh napitkov [The effect of walnut leaf extract on the quality of soft drinks]. *Pivo i napitki – Beer and drinks*, 3, 44-48 [in Russian].

6. Orlova, O. Yu., Pilipenko, T. V., Nilova, L. P., Nikulina, M. V. (2015). Traditsionnye i perspektivnye rastitelnye istochniki ioda dlia obogashcheniia pishchevykh produktov [Traditional and promising plant sources of iodine for food fortification]. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv» – Scientific journal NRU ITMO. Series «Processes and Food Production Equipment»*, 4, 26-34 [in Russian].

7. Pilipenko, T. V., Roginskaia, E. O. (2018). Razrabotka molochnogo deserta, obogashchenoho funktsionalnymi rastitelnyimi dobavkami [Development of a milk dessert enriched with functional herbal supplements]. *Vestnik Iuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pishchevye i biotekhnologii – Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*, 6 (1), 40-48. DOI: 10.14529/food180105.

8. Oganesiants, L. A., Peschanskaia, V. A., Dubinina, E. V. (2016). Issledovanie fiziko-khimicheskogo sostava vodno-spirovnykh ekstraktov listev gretskogo orekha [A study of the physico-chemical composition of water-alcohol extracts of walnut leaves]. *Khrenenie i pererabotka selkhozsiyria – Storage and processing of agricultural raw materials*, 11, 14-17 [in Russian].

9. Koval, O. A. (2015). Syr plavlenyi bezfosfatnyi [Cheese, processed, phosphate-free]. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnogo ahrarnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Collection of scientific works of Vinnytsia National Agrarian University. Series: Technical Sciences*, 1(2), 62-68 [in Ukrainian].

10. Derevianko, N. P., Bazhenova, E. O. (2015). Fyzyko-khimichni pokaznyky plavlenoho syru z ekstraktom aloe [Physico-chemical properties of processed cheese with aloe extract]. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnogo universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnolohii im. Gzhytskoho – Scientific Bulletin of the Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnology named after Zhytsky*, 17 (1(2)), 260-263 [in Ukrainian].

11. Shuvalova, E. G., Dolgorukova, M. V. (2017). Tekhnologiya plavlenoho syra iz smesi korovego i kozego moloka [Technology of processed cheese from a mixture of cow and goat milk]. *Vestnik Mariiskogo gosudarstvennogo unyversiteta. Seriya «Selskokhoziaistvennye nauki. Ekonomicheskije nauky» – Bulletin of Mari State University. Series «Agricultural sciences. Economic sciences»*, 3 (2 (10)), 58-62 [in Russian].

12. Bolhova, N. V., Baidak, M. O. (2018). Laminariia u vyrobnytstvi plavlenykh syriv [Kelp in the production of processed cheeses]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific notes of VN Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences*, 29 (68) (5 (3)), 5-9 [in Ukrainian].

13. DSTU 4635:2006. Syry plavleni. Zahalni tekhnichni umovy [Cream cheeses. General specifications] (2007). Kyiv [in Ukrainian].

14. Bovkun, A. A. (2011). Proizvodstvo plavlenykh syrov na osnove tvoroga [Production of processed cheese based on cottage cheese]. *Produkty & inhredienty – Products & Ingredients*, 1 (76), 40-41 [in Russian].

15. Antipova, L. V., Glotova, I. A., Rogov, I. A. (2001). *Metody issledovaniia miasa i miasnykh produktov [Research methods for meat and meat products]*. Moscow: Kolos [in Russian].

UDC 637.03

Natalia Bolgova, Katerina Krevsun

## USE OF HAWBERRY LEAST EXTRACT IN MOLDED CHEESE TECHNOLOGY

**Urgency of the research.** The modern food industry must address not only the safety of the product, but also the role of food in the prevention of iodine deficiency. The promotion of the role of nutrition in the prevention of alimentary diseases is reflected in the steady trend of increasing volumes and expanding the range of foods enriched with dietary supplements, including iodine. Of particular interest to manufacturers and consumers are herbal supplements.

**Target setting.** Despite the breadth of the range of processed cheeses, it is constantly updated. This is due to the need to meet the requirements of science, changing consumer demand, availability of raw materials, the profitability of a particular type of cheese. Increased interest in these products is caused by its ability to retain its qualities well during long-term sto-



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

rage, the ability to combine various components, including non-dairy origin, and as a result to obtain a product of high nutritional and biological value. Considering the above facts, it should be noted that the development of processed cheeses with walnut leaves is of great importance and is a relevant scientific and practical topic.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Contemporary publications of Ukrainian and foreign scientists have been considered on ways to solve the problem of iodine deficiency by introducing a herbal supplement product into the recipe.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Therefore, the organization of disease prevention requires further study and a deeper study of functional food technology. Considering the fact that processed cheeses are a fairly affordable product for the majority of the population of Ukraine, we consider it expedient to expand their range precisely through the introduction of walnut leaves in the recipe.

**The research objective.** The purpose of the work was to develop a recipe and substantiation of the technology of production of functional melted cheese with the addition of walnut leaf extract of NVK Vilarus LLC, as well as to substantiate the expansion of the range of melted cheese in the functional direction.

**The statement of basic materials.** The recipe is developed and the technology of production of processed cheeses with vegetable component is substantiated. Quality and organoleptic characteristics were experimentally investigated. The calculation method determines the amount of iodine that will contain the developed product.

**Conclusions.** The obtained results of organoleptic, physicochemical and structural-mechanical studies allow to state that melted cheese with the addition of 5 % walnut leaf extract of NVK Vilarus LLC is a product with desirable consumer characteristics and high iodine content. This will not only expand the range of functional foods, but also prevent iodine deficiency.

**Keywords:** cream cheese; iodine; prevention of iodine deficiency; walnut leaf extract; organoleptic; structural and mechanical properties.

Fig.: 1. Table: 2. References: 15.

**Болгова Наталія Вікторівна** – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40021, Україна).

**Bolgova Natalia** – PhD of Agricultural Science, Associate Professor, Sumy National Agrarian University (160 Gerasyma Kondratyeva Str., 40021 Sumy, Ukraine).

**E-mail:** bolgova\_1981@i.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0201-0769>

**ResearcherID:** Q-2925-2016

**Кревсун Катерина Вікторівна** – студент, магістр кафедри технології молока і м'яса, Сумський національний аграрний університет (вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40021, Україна).

**Krevsun Katerina** – student, master of Department of Milk and Meat Technology, Sumy National Agrarian University (160 Gerasyma Kondratyeva Str., 40021 Sumy, Ukraine).

УДК 664.66.022.39

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-226-233

Наталія Буяльська, Олена Литвиненко, Наталя Денисова

## ВИКОРИСТАННЯ ПРОДУКТІВ ПЕРЕРОБКИ АМАРАНТУ У ВИРОБНИЦТВІ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ

**Актуальність теми дослідження.** Розробка хлібобулочних виробів із добавкою продуктів переробки амаранту, з огляду на його хімічний склад, є перспективним напрямом для розширення асортименту продуктів підвищеної харчової цінності, у тому числі в Україні.

**Постановка проблеми.** Незважаючи на результати попередніх досліджень, хлібобулочні вироби з добавками продуктів переробки амаранту потребують подальшої розробки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблемі використання продуктів переробки амаранту у виробництві продуктів харчування присвячені роботи багатьох вітчизняних та закордонних учених.

**Виділення не досліджених частин загальної проблеми.** Нині недостатньо вивченим залишається питання впливу продуктів переробки амаранту на основні показники якості різних хлібобулочних виробів.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження впливу добавки шроту насіння амаранту та подрібненого листя амаранту на органолептичні та фізико-хімічні показники якості хлібобулочних виробів.

**Виклад основного матеріалу.** Науково обґрунтовано та експериментально доведено доцільність застосування продуктів переробки амаранту в технології хлібобулочних виробів для підвищення їхньої якості та розширення асортименту продуктів підвищеної харчової цінності. Об'єктом дослідження були обрані роголики фруктові. Добавки (подрібнене листя амаранту та шрот насіння амаранту) вносили в кількостях 0,5; 1,0 та 2,0 % до маси борошна. Проаналізований вплив продуктів переробки амаранту на хлібопекарські властивості борошна пшеничного та дріжджів, а також на якість тіста та готових хлібобулочних виробів.

**Висновки відповідно до статті.** На основі проведених досліджень встановлені оптимальні дозування добавок до маси борошна: подрібнене листя амаранту – 2,0 %; шрот насіння амаранту – 2,0 %. Отримані дані можуть бути використанні для розробки і впровадження нових виробів підвищеної харчової цінності в масове виробництво.

**Ключові слова:** амарант; хлібобулочні вироби; роголики фруктові; органолептичні показники; фізико-хімічні показники.

Табл.: 8. Бібл.: 16.

**Актуальність теми дослідження.** Нині найважливішою проблемою є розширення асортименту хлібобулочних виробів підвищеної харчової цінності з використанням місцевих, а також нетрадиційних видів сировини; виробів, що мають імуномодельную, антиоксидантну й радіопротекторну дію на організм людини, збагачують його есенціальними речовинами.

Перспективною є розробка хлібобулочних виробів із добавкою продуктів переробки амаранту (загальна назва для рослин, що відносяться до роду *Amaranthus*), який є одним з найкращих джерел рослинних білків. Засвоюваність білків амаранту наближається до засвоюваності білків тваринного походження. За вмістом таких незамінних кислот, як лізин та метіонін, білок амаранту перевищує традиційні зернові культури [1]. Також ця рослина є джерелом клітковини, поліненасичених кислот, фітостеролів, фосфоліпідів, сквалену, вітамінів С, Е, РР, В<sub>2</sub>, В<sub>1</sub>, А, фолату, макро- та мікроелементів (натрію, магнію, калію, фосфору, кальцію, феруму, купруму), які необхідні для оптимального функціонування органів травлення, імунної та ендокринної систем тощо.

Завдяки своєму складу, екологічним особливостям, високій врожайності амарант розглядається як одна з культур, що в майбутньому буде забезпечувати продовольчу безпеку, особливо у країнах із найчисленнішим населенням [2].

Для України амарант – нова культура, але в останні роки її видовий склад урізноманітнюється внаслідок розширення торгових і економічних зв'язків з різними країнами світу. Унікальність рослини полягає ще й у тому, що на відміну від інших сільськогосподарських культур вона витрачає найменше води на утворення 1 г сухої речовини, що робить її перспективною для вирощування в зоні недостатнього та нестійкого зволоження, до якої належить і Лівобережжя України [3]. У зв'язку з цим використання амаранту у виробництві хлібобулочних виробів на території України є актуальним та своєчасним.

**Постановка проблеми.** Вивчення амаранту з метою його максимально ефективного використання на сьогодні не завершено. До теперішнього часу проводяться досліджен-

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

ня зі встановлення хімічного складу різних видів амаранту і впливу його компонентів на здоров'я людини [4–7].

Загалом перспективи збагачення хліба за рахунок добавок з амаранту відзначені досить давно [8]. Вони пов'язані з необхідністю усунення дефіциту в організмі окремих мікроелементів, наприклад феруму [9]. Борошно з амаранту придатне для виробництва безглютенових продуктів [10]. Використання амаранту є перспективним для приготування спеціальних функціональних продуктів харчування спортсменів [11].

Однак до теперішнього часу багато завдань, необхідних для широкого виробництва хлібобулочних виробів, збагачених рослинною сировиною, у тому числі продуктами переробки амаранту, вимагає проведення подальших досліджень. Одним із таких завдань є отримання готової продукції з оптимальними органолептичними та фізико-хімічними показниками.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішенню проблеми створення продуктів харчування підвищеної харчової цінності, а саме товарів масового споживання – хлібобулочних та кондитерських виробів із використанням продуктів переробки амаранту, присвячені роботи вітчизняних та закордонних учених. Відповідно до проведених досліджень додавання менше ніж 10 % борошна з амаранту істотно не впливає на якісні показники тіста та готових виробів [12; 13]. Вивчено реологічні властивості тіста із суміші пшеничного та амарантового борошна, отриманого з пророщеного насіння [14]. Встановлено, що внесення в пшеничне борошно подрібненого насіння амаранту, попередньо замоченого у воді, в кількості 5–15 % покращує якість хлібобулочних виробів [15]. Доведена можливість застосування амарантового борошна як покращувача при переробці пшеничного борошна зі зниженими хлібопекарськими властивостями [16].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** У промисловості використовують шрот насіння амаранту, амарант у вигляді подрібненого листя амаранту, олії з насіння амаранту, борошно з амаранту. Проте використання цих добавок для виробництва борошняних виробів вивчено недостатньо.

Незважаючи на численні дослідження, у літературних джерелах недостатньо даних щодо застосування продуктів переробки амаранту в технології виробництва хлібобулочних виробів. Недостатньо досліджено вплив добавок з амаранту на органолептичні та фізико-хімічні показники якості різних видів хлібобулочних виробів, що також перешкоджає широкому застосуванню рослин роду *Amaranthus* у виробництві хлібобулочних виробів.

**Метою статті** є дослідження впливу добавки шроту насіння амаранту та подрібненого листя амаранту на органолептичні та фізико-хімічні показники якості хлібобулочних виробів.

**Виклад основного матеріалу.** Як об'єкт дослідження було обрано рогалики фруктові. Дослідження виконували шляхом проведення пробної лабораторної випічки. Для виготовлення рогаликів фруктових використовувалась наступна сировина: борошно пшеничне першого гатунку, дріжджі хлібопекарські пресовані, сіль кухонна, цукор білий, маргарин вершковий, повидло фруктове, вода. Уся сировина за показниками безпечності та якості відповідає чинним нормам.

Уніфікована рецептура рогаликів фруктових: борошно пшеничне I гатунку 100 кг, дріжджі пресовані 5,0 кг, сіль кухонна 1,0 кг, цукор білий 4,0 кг, маргарин столовий 7,0 кг, повидло 5,0 кг.

Вивчали вплив продуктів переробки амаранту (шрот насіння амаранту та подрібнене листя амаранту) на якість рогаликів фруктових. Добавки попередньо подрібнювали до порошкоподібного стану та вносили в кількостях 0,5; 1,0 та 2,0 % до маси борошна.

Відбір проб і підготовку їх до досліджень проводили загальноприйнятими методами. Визначили фізико-хімічні показники сировини (борошно пшеничного, шроту насіння амаранту та подрібненого листя амаранту). Результати наведені в табл. 1.

*Фізико-хімічні показники зразків*

Найменування показників	Пшеничне борошно	Подрібнене листя амаранту	Шрот насіння амаранту
Вологість, %	14,2	10,0	11,9
Масова частка металодомішок, %	Відсутні	Відсутні	Відсутні
Сторонні домішки, %	Відсутні	Відсутні	Відсутні

Важливо було дослідити вплив добавки на хлібопекарські властивості борошна та дріжджів.

Основним фактором, який характеризує хлібопекарські властивості борошна, є білково-протеїназний склад, насамперед кількість та властивості клейковини. Вплив добавок на вихід сирової клейковини наведений в табл. 2.

Таблиця 2

*Вихід сирової клейковини*

Вид добавки	Вміст добавки, % до маси борошна		
	1,0	1,5	2,0
Подрібнене листя амаранту	26,9	27,5	27,8
Шрот насіння амаранту	26,8	27,4	27,7
Контроль	26,5		

При додаванні продуктів переробки амаранту вміст сирової клейковини збільшується в порівнянні з борошном пшеничним без добавок. Найкращий ефект спостерігається при внесенні добавки подрібненого листя та шроту насіння амаранту в кількості 2 % до маси борошна.

Показники розтяжності клейковини при внесенні добавок знаходяться в межах 14,0–15,1 см. Таким чином, за розтяжністю клейковина характеризується як середня (10–20 см). При додаванні більшої кількості добавки клейковина ставала менш розтяжною, тому за цим показником не рекомендується вносити більш високі концентрації продуктів переробки амаранту.

Також нами були проведені дослідження з визначення активності ліполітичних ферментів у продуктах переробки амаранту. Визначили активність ферменту ліпоксигенази та ліпази. Результати представлені в табл. 3.

Таблиця 3

*Активність ліполітичних ферментів*

Добавка	Активність ліпоксигенази, мкмоль/мг·хв	Активність ліпази, см <sup>3</sup> /г
Подрібнене листя амаранту	0,22	0,27
Шрот насіння амаранту	0,56	0,28

Ліпоксигеназа через утворення нею пероксидів насичених солей жирних кислот бере участь в окисненні SH-груп білка, що призводить до утворення дисульфідних зв'язків, а чим більше цих зв'язків, тим вище якість борошна.

Активність ліпази в добавках із продуктів переробки амаранту вища, ніж у борошні, а отже, при внесенні добавок клейковина буде укріплюватись, ставати більш пружною та еластичною.

Підйомну силу визначали експрес-методом, результати наведені в табл. 4.

Таблиця 4

*Підйомна сила дріжджів, активованих добавками продуктів переробки амаранту, хв*

Вид добавки	Вміст добавки, % до маси борошна		
	1,0	1,5	2,0
Подрібнене листя амаранту	53,65	50,56	49,53
Шрот насіння амаранту	52,93	49,96	48,65
Контроль	57,72		

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Продукти переробки амаранту незначно зменшують час підйому кульки, а отже, покращують підйомну силу тіста. Найкраща підйомна сила спостерігається при концентрації добавок продуктів переробки амаранту 2 %.

Для оцінки здатності дріжджів зброджувати вуглеводи тіста визначали їхню зимазну й мальтазну активність у разі внесення добавок продуктів переробки амаранту. Ферментативна здатність хлібопекарських дріжджів є одним із основних показників їхньої якості. Результати досліджень представлені в таблицях 5, 6.

Таблиця 5

*Результати визначення зимазної активності дріжджів*

Час, хв	Контроль	Листя амаранту			Шрот насіння амаранту		
		1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0
5	0,2	0,3	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5
10	0,6	1,4	1,6	1,8	1,5	1,9	1,9
15	1,0	4,6	5,2	6,8	2,5	3,6	5,4
<b>20</b>	1,3	6,2	7,4	<b>10,0</b>	3,9	5,8	6,7
<b>25</b>	2,9	8,1	8,9		4,5	7,1	<b>10,0</b>
<b>30</b>	3,7	9,8	<b>10,0</b>		6,8	9,1	
<b>35</b>	6,1	<b>10,0</b>			7,2	<b>10,0</b>	
<b>40</b>	8,1				<b>10,0</b>		
<b>45</b>	<b>10,0</b>						

Добавки продуктів переробки амаранту позитивно впливають на зимазну активність дріжджів: час виділення CO<sub>2</sub> зменшується майже в 2 рази. Найкращі результати виявлені в зразках із концентрацією листя амаранту 2,0 % (зимазна активність 20 хв, у той час як контроль – 45 хв).

При виробництві хлібобулочних виробів дуже важливим показником є також мальтазна активність, тому що зимазна активність обумовлює підйомом тіста протягом 50–85 хв, а на такий термін бродіння достатньо власних вуглеводів борошна. У виробництві тісто спочатку бродить добре, а потім, коли витрачаються моноцукри й сахароза борошна, бродіння уповільнюється. Результати визначення мальтазної активності наведені в табл. 6.

Таблиця 6

*Мальтазна активність дріжджів, активованих добавками амаранту*

Час	Контроль	Листя амаранту, %			Шрот насіння амаранту, %		
		1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0
5	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2
10	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4
15	0,3	0,4	0,5	0,7	0,5	0,6	0,9
20	0,6	0,6	0,6	3,3	0,8	1,3	1,9
25	1,2	1,1	2,0	6,1	1,2	2,4	2,6
30	2,8	2,0	2,9	9,1	2,2	3,4	3,9
35	5,2	4,2	4,0	<b>10,0</b>	3,5	5,6	5,6
40	7,6	6,9	7,5		5,3	7,8	7,2
45	8,9	8,6	<b>10,0</b>		8,1	<b>10,0</b>	<b>10,0</b>
50	<b>10,0</b>	<b>10,0</b>			<b>10,0</b>		

Таким чином, найкраща мальтазна активність (35 хв) спостерігається при внесенні добавок продуктів переробки амаранту (листя) в кількості 2,0 %.

При застосуванні пресованих дріжджів із високою мальтазною активністю скорочується тривалість бродіння опари, покращується якість хліба. Тому при високій мальтазній активності дріжджів можливо, зберігаючи звичайну тривалість бродіння, скоротити витрату дріжджів. При приготуванні тіста безопарним способом витрати дріжджів з високою мальтазною активністю можуть становити 1,2–1,4 % замість 2 %.

Для підтвердження підвищення харчової цінності виробів при внесенні продуктів переробки амаранту визначали вміст білків біуретовим методом у борошні пшенично-му, добавках листя подрібненого амаранту та шроту насіння амаранту. Результати представлені в табл. 7.

Таблиця 7

*Вміст білків*

Назва сировини	Вміст білків, на 100 г продукту
Борошно пшеничне I гатунку	11,9
Подрібнене листя амаранту	14,3
Шрот насіння амаранту	20,0

У шроті насіння амаранту вміст білка майже в 2 рази більший, ніж у борошні пшеничному.

Вивчали вплив продуктів переробки амаранту на властивості напівфабрикату. Тісто для рогаликів фруктових готувалося безопарним способом. Встановлено, що внесення добавок продуктів переробки амаранту на вологість тіста практично не впливає.

Добавка подрібненого листя амаранту та шроту насіння амаранту підвищує кислотність тіста в порівнянні з контрольним зразком без добавок. Це може прискорити процеси бродіння тіста, а отже, його дозрівання буде відбуватися швидше.

На органолептичні властивості готового виробу додавання добавки з продуктів переробки амаранту в досліджених концентраціях також не мають значного впливу. Незначний темний відтінок та ледь відчутний приємний трав'яний присмак мали вироби з додаванням подрібненого листя амаранту.

Фізико-хімічні показники виробів із добавкою продуктів переробки амаранту знаходились в межах норми (за ТУУ 15.8-05415042-002:2011). Вологість готових виробів дещо знижується при додаванні продуктів переробки амаранту, порівняно з контрольним зразком. Кислотність готових виробів із добавками порівняно з контролем збільшується. Це дає змогу позитивно вплинути на фізико-хімічні властивості та смак хліба, продовжити термін зберігання й зупинити розвиток патогенної мікрофлори.

У готових виробах за загальноприйнятими методиками був визначений вміст цукру та жиру. Внесення добавок із продуктів переробки амаранту не вплинуло на цей показник, масова частка цукру в контрольному зразку та збагачених виробах становила 7,24 %, а масова частка жиру – 5,01 %. Зведені дані проведених досліджень якості готових виробів із додаванням продуктів переробки амаранту представлені в табл. 8.

Таблиця 8

*Показники якості готових виробів із додаванням продуктів переробки амаранту*

Показники	Контроль	Подрібнене листя амаранту	Шрот насіння амаранту
Концентрація добавки, %	–	2,0	2,0
Маса виробу, г	103,59	103,5	103,82
Маса виробу через годину випікання, г	99,96	99,7	100,2
Упікання, %	10,7	10,8	10,5
Усихання, %	3,5	3,6	3,5
Вологість м'якушки, %	35,0	34,1	33,5
Кислотність м'якушки, град	2,2	2,4	2,5
Органолептичні показники:	–	–	–
колір	світло-жовтий	світло-коричневий	світло-жовтий
смак	властивий цьому виробу	властивий виробу, з ледь відчутним трав'янистим присмаком	властивий цьому виробу
запах	властивий цьому виробу	властивий цьому виробу	властивий цьому виробу

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

**Висновки відповідно до статті.** За результатами проведених досліджень впливу добавок продуктів переробки амаранту на якість хлібобулочних виробів, а саме рогаликів фруктових встановлено, що:

- зі збільшенням кількості добавок до 2 % вихід сирої клейковини збільшується, при цьому вона стає менш розтяжною;
- за рахунок високої активності ліпази та ліпоксигенази добавок амаранту клейковина борошна укріплюється;
- внесення добавок підвищує зимазну та мальтазну активність дріжджів, що прискорює процес дозрівання тіста;
- покращується підйомна сила дріжджів;
- внесення добавок не впливає на вологість тіста; вологість готових виробів зменшується;
- кислотність готових виробів із використанням добавок підвищується;
- на органолептичні властивості добавки продуктів переробки амаранту не мають значного впливу, пористість виробів була однаковою, незначний темний відтінок та ледь відчутний трав'яний присмак мали вироби з додаванням подрібненого листя амаранту.

На основі проведених досліджень встановлені оптимальні дозування добавок до маси борошна: подрібнене листя амаранту – 2,0 %; шрот насіння амаранту – 2,0 %.

Отримані дані можуть бути використанні для розробки і впровадження нових виробів підвищеної харчової цінності в масове виробництво.

#### Список використаних джерел

1. Використання білкових гідролізатів у технологіях функціональних хлібобулочних виробів / Г. В. Дейниченко та ін. *Вісник Донецького національного університету економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського*. 2009. № 1 (41). С. 217–223.
2. Topwal M. Review on Amaranth: Nutraceutical and Virtual Plant for Providing Food Security and Nutrients. *Acta scientific agriculture*. 2019. Vol. 3. Iss. 1. P. 9–15.
3. Амарант: селекція, генетика та перспективи вирощування: монографія / Т. І. Гопцій та ін. Харків: ХНАУ, 2018. 362 с.
4. Amaranthus caudatus Production and Nutrition Contents for Food Security and Healthy Living in Menit Shasha, Menit Goldya and Maji Districts of Bench Maji Zone, South Western Ethiopia / G. Mekonnen et al. *Nutrition & Food Science International Journal*. 2018. Vol. 7. Iss. 3. URL: <https://juniperpublishers.com/nfsij/NFSIJ.MS.ID.555712.php>.
5. Nutritional functional value and therapeutic utilization of Amaranth / M. Soriano-García et al. *Journal of Analytical & Pharmaceutical Research*. 2018. Vol. 7, Iss. 5. P. 596–600.
6. Nutritional content and antioxidant properties of selected species of Amaranthus L. / W. Biel et al. *Italian Journal of Food Science*. 2017. Vol. 29. P. 728–740.
7. Antioxidant Activity and Phenolic Composition of Amaranth (Amaranthus caudatus) during Plant Growth / M. Karamać et al. *Antioxidants*. 2019. Vol. 8. Iss. 6. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3921/8/6/173>.
8. Nutrition value and use of grain amaranth: potential future application in bread making / S. G. Mlakar et al. *Agricultura*. 2009. Vol. 6. P. 43–53.
9. Bread Supplemented with Amaranth (Amaranthus cruentus): Effect of Phytates on In Vitro Iron Absorption / J. M. Sanz-Penella et al. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2012. Vol. 67. P. 50–56.
10. Кучерук З. І., Постнова О. М., Галич А. О. Дослідження властивостей знежиреного термічно обробленого борошна амаранту. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства та торгівлі*: зб. наук. пр. Харків, 2015. Вип. 1 (21). С. 275–283.
11. Биологически активные вещества амаранта и перспективы применения пищевых добавок на его основе в практике подготовки спортсменов / Л. М. Гунина та ін. *Український журнал медицини, біології та спорту*. 2018. Т. 3, № 7 (16). С. 267–277.
12. Emire Sh. A., Arega M. Value added product development and quality characterization of amaranth (Amaranthus caudatus L.) grown in East Africa. *African Journal of Food Science and Technology*. 2012. Vol. 3. No 6. P. 129–141.

13. Миколенко С. Ю., Царук Л. Ю., Чурсінов Ю. О. Вплив продуктів переробки амаранту і чаї на якість хліба. *Вісник Національного Технічного Університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2019. №5 (1330). С. 145–151.

14. Guardianelli L. M., Salinasa M. V., Puppo M. C. Hydration and rheological properties of amaranth-wheat flour dough: Influence of germination of amaranth seeds. *Food Hydrocolloids*. 2019. Vol. 97. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X18325347>.

15. Ружило Н. С. Использование семян амаранта в хлебобулочных изделиях. *Пищевая промышленность*. 2015. № 12. С. 56–58.

16. Шмалько Н. А., Смирнов С. О. Способ производства хлеба при добавлении амарантовой крупяной муки. *Ползуновский вестник*. 2018. № 1. С. 27–31.

### References

1. Deinychenko, H. V., Riabushko, V. I., Holub, M. O., Kramarenko, D. P., Svoievolina, H. V. (2009). Vykorystannia bilkovykh hidrolizativ u tekhnolohiiakh funktsionalnykh khlibobulochnykh vyrobiv [The use of protein hydrolysates in the technology of functional bakery products]. *Visnyk Donetskoho natsionalnoho universytetu ekonomiky i torhivli imeni Mykhaila Tuhan-Baranovskoho – Bulletin of the Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky*, 1 (41), 217–223 [in Ukrainian].

2. Topwal, M. (2019). Review on Amaranth: Nutraceutical and Virtual Plant for Providing Food Security and Nutrients. *Acta scientific agriculture*, 3 (1), 9–15.

3. Hoptsi, T. I., Voronkov, M. F., Bobro, M. A., Miroshnychenko, L. O., Lymanska, S. V. ... Duda, Yu. V. (2018). *Amarant: selektsiia, henetyka ta perspektyvy vyroshchuvannia [Amaranth: breeding, genetics and cultivation prospects]*. Kharkiv: KhNAU [in Ukrainian].

4. Mekonnen, G., Woldesenbet, M., Teshale, T., Biru, T. (2018). *Amaranthus caudatus* Production and Nutrition Contents for Food Security and Healthy Living in Menit Shasha, Menit Goldya and Maji Districts of Bench Maji Zone, South Western Ethiopia. *Nutrition & Food Science International Journal*, 7 (3). Retrieved from <https://juniperpublishers.com/nfsij/NFSIJ.MS.ID.555712.php>.

5. Soriano-García, M., Arias-Olguín, I. I., Carrillo-Montes, J. P., Rosas-Ramírez, D. G., Mendoza-Figueroa, J. S., Flores-Valverde, E., Valladares-Rodríguez, M. R. (2018). Nutritional functional value and therapeutic utilization of Amaranth. *Journal of Analytical & Pharmaceutical Research*, 7 (5), 596–600.

6. Biel, W., Jendrzeczak, E., Jaroszewska, A., Witkowicz, R., Piątkowska, E., Telesiński, A. (2017). Nutritional content and antioxidant properties of selected species of *Amaranthus* L. *Italian Journal of Food Science*, 29, 728–740.

7. Karamać, M., Gai, F., Longato, E., Meineri, G., Janiak, M. A., Amarowicz, R., Peiretti, P. G. (2019). Antioxidant Activity and Phenolic Composition of Amaranth (*Amaranthus caudatus*) during Plant Growth. *Antioxidants*, 8 (6). Retrieved from <https://www.mdpi.com/2076-3921/8/6/173>.

8. Mlakar, S. G., Turinek, M., Jakop, M., Bavec, M., Bavec, F. (2009). Nutrition value and use of grain amaranth: potential future application in bread making. *Agricultura*, 6, 43–53.

9. Sanz-Penella, J. M., Laparra, J. M., Sanz, Y., Haros, M. (2012). Bread Supplemented with Amaranth (*Amaranthus cruentus*): Effect of Phytates on In Vitro Iron Absorption. *Plant Foods for Human Nutrition*, 67, 50–56.

10. Kucheruk, Z. I., Postnova, O. M., Halych, A. O. (2015). Doslidzhennia vlastyvostei znezhyrenoho termichno obroblenoho boroshna amaranu [Investigation of properties of defatted heat-treated flour of amaranth]. In O. I. Cherevko (Ed.), *Prohresyvni tekhnika ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva ta torhivli – Progressive Machinery and Technologies for Food Production in the Restaurant Industry and Trade* (Vol. 1 (21), pp. 275–283). Kharkiv: KhDUKhT [in Ukrainian].

11. Gunina, L. M., Dmitriev, A. V., Shustov, E. B., Kholodkov, A. V., Golovashchenko, R. V. (2018). Biologicheski aktivnye veshchestva amaranta i perspektyvy primeneniia pishchevykh dobavok na ego osnove v praktike podgotovki sportsmenov [Prospects of Application of Diet Supplements Based on Amaranth in the Practice of Training Athletes]. *Ukrainskyi zhurnal medytsyny, biologii ta sportu – Ukrainian Journal of Medicine, Biology and Sport*, 3 (7), 267–277 [in Russian].

12. Emire, Sh. A., Arega, M. (2012). Value added product development and quality characterization of amaranth (*Amaranthus caudatus* L.) grown in East Africa. *African Journal of Food Science and Technology*, 3 (6), 129–141.



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

13. Mykolenko, S. Yu., Tsaruk, L. Yu., Chursinov, Yu. O. (2019). Vplyv produktiv pererobky amarantu i chia na yakist khliba [Effect of amaranth products and chia on bread quality]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Seriya: Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiiakh – Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». Series: New solutions in modern technology*, 5 (1330), 145–151 [in Ukrainian].

14. Guardianelli, L. M., Salinasa, M. V., Puppo, M. C. (2019). Hydration and rheological properties of amaranth-wheat flour dough: Influence of germination of amaranth seeds. *Food Hydrocolloids*, 97. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X18325347>.

15. Ruzhilo, N. S. (2015). Ispolzovanie semian amaranta v khlebobulochnykh izdeliakh [Use of seeds amaranth in bakery products]. *Pishchevaia promyshlennost – Food Industry*, 12, 56–58 [in Russian].

16. Shmalko, N. A., Smirnov, S. O. (2018). Sposob proizvodstva khleba pri dobavlenii amarantovoi krupianoï muki [Method for the production of bread by adding amaranth cereal flour]. *Polzunovskii vestnik – Polzunovsky vestnik*, 1, 27–31 [in Russian].

UDC 664.66.022.39

Nataliia Buialska, Olena Lytvynenko, Natalya Denysova

### THE USE OF AMARANTH PROCESSED PRODUCTS IN BAKERY PRODUCTION

**Urgency of the research.** The development of bakery products with the addition of amaranth processed products, considering its chemical composition, is a promising direction for expanding the range of products of a high nutritional value, including in Ukraine.

**Target setting.** Despite the results of previous studies, bakery products with the addition of amaranth processed products need further development.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Works of many domestic and foreign scientists are devoted to the problems of using amaranth processed products in the food production.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** To date, the influence of amaranth processed products on the main quality indicators for various bakery products remains poorly studied.

**The research objective.** The aim of the work was to investigate the influence of the additives of amaranth seed meal and crushed amaranth leaves on organoleptic and physico-chemical quality indicators of bakery products.

**The statement of basic materials.** The advisability of using the amaranth processed products in the technology of bakery products in order to improve their quality and expanding the range of food with a high nutritional value was proved on the basis of scientific and experimental data. Fruit bagels were chosen as the object of study. Additives (crushed amaranth leaves and amaranth seed meal) were added in amounts of 0.5; 1.0 and 2.0 % by weight of flour. The influence of amaranth processed products on the baking properties of wheat flour and yeast, as well as on the quality of dough and finished bakery products, was analyzed.

**Conclusions.** On the basis of the conducted studies, the optimal dosages of additives to the flour (crushed amaranth leaves – 2.0 %; amaranth seed meal – 2.0 %) were established. The obtained data can be used for the development and introduction of new food products with high nutritional value, which are suitable for mass production.

**Keywords:** amaranth; bakery products; fruit bagels; organoleptic indicators; physical and chemical indicators.

Table: 8. References: 16.

**Буяльська Наталія Павлівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Buialska Nataliia** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Food Technology, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** buialska@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-6800-5604>

**ResearcherID:** G-2935-2014

**ScopusID:** 57196191416

**Литвиненко Олена Олегівна** – магістрантка 2-го курсу, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Lytvynenko Olena** – undergraduate student of the 2nd year, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** Nonochka96@i.ua

**Денисова Наталя Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри харчових технологій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Denysova Natalya** – PhD in technical sciences, Associate Professor, Department of Food Technology, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** 4386793@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-3522-4210>

**ResearcherID:** G-6068-2016

УДК 664.641.4

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-234-240

Наталія Денисова, Маргарита Зінюк, Наталія Буяльська

**ВИКОРИСТАННЯ ДОБАВОК БЕЗГЛЮТЕНОВОГО БОРОШНА  
В ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ**

**Актуальність теми дослідження** зумовлена необхідністю розробки технологічних рецептур хлібобулочних виробів із використанням натуральних добавок задля поліпшення якісних характеристик готової продукції.

**Постановка проблеми.** Хлібобулочні вироби є основним продуктом споживання абсолютної більшості населення нашої країни та світу загалом, тому виникає необхідність розробки та впровадження заходів щодо підвищення якісних та поживних характеристик продукції в конкурентних умовах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У наукових публікаціях показана перспективність введення в рецептуру хлібобулочних виробів як збагачувачів та поліпшувачів натуральних добавок рослинного та тваринного походження.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Не досліджено використання в технології пшеничних хлібобулочних виробів добавок із безглютенового борошна змінних концентрацій, що забезпечують поліпшення якісних показників виробів.

**Постановка завдання.** Розробка технології виготовлення пшеничного хлібу з використанням як добавки безглютенового борошна (рисового, гречаного та кукурудзяного), що дозволить поліпшити фізико-хімічні, структурно-механічні та органолептичні показники готових виробів.

**Виклад основного матеріалу.** Проведено оцінювання фізико-хімічних, структурно-механічних та органолептичних показників тістових напівфабрикатів та готових виробів. Розроблена рецептура приготування пшеничного надзбручанського хлібу з використанням як натуральної добавки суміші безглютенового борошна (рисового, гречаного та кукурудзяного в рівних концентраціях) з дозуванням 5 та 10 % від ваги внесеного пшеничного борошна.

**Висновки відповідно до статті.** Встановлено позитивний вплив 5 % добавки суміші безглютенового борошна (рисового, гречаного та кукурудзяного в рівних концентраціях) на фізико-хімічні, структурно-механічні та органолептичні показники пшеничних хлібобулочних виробів на прикладі технології виготовлення хлібу надзбручанського.

**Ключові слова:** пшеничний хліб; безглютенове борошно; технологія виготовлення.

Табл.: 4. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** Щоденно населення багатьох країн світу споживає у своєму раціоні хліб та хлібобулочні вироби (ХБВ), а їх асортимент постійно розширюється. Вимоги споживачів поступово зростають, зростає також і конкуренція у хлібопекарській галузі, що і стимулює впровадження інноваційних рішень у галузі.

**Постановка проблеми.** В останні кілька десятиліть спостерігається поступове зниження якості та харчових властивостей сировини, що спричиняє ускладнення в роботі харчових підприємств та сприяє зниженню якості хлібобулочних виробів. Тому виробники продукції дедалі частіше використовують у виробництві поліпшувачі та консерванти, часто синтетичного походження, що може викликати негативний вплив на здоров'я споживачів. Отже, для запобігання використанню шкідливих добавок у технології виробництва активно досліджуються способи удосконалення технологій виробництва хлібобулочних виробів. Це здійснюється завдяки використанню природної сировини рослинного походження з високим вмістом біологічно активних речовин.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Щорічно на світовий ринок вводиться близько 2000 нових хлібобулочних виробів, збагачених різноманітними корисними добавками [1]: гіпоалергенні, без глютену, без добавок і консервантів, цільнозернові, органічні, вегетаріанські, без трансжирів та ін.

В Україні на ринку галузі переважає хліб із пшеничного борошна (35-40 %), житнього і житньо-пшеничного борошна (30-35 %), булочні вироби (15-20 %), здобні, бубличні, сухарні та інші вироби (5-10 %). Найбільш споживаною продукцією є батони (90 %), після чого – пшеничний хліб (66 %), житній хліб (54 %) та дієтичні ХБВ (19 %) [2].

Розвиток можливості доступу до інформації дає можливість обирати споживачам більш якісні, безпечні та корисні вироби, незважаючи на їх вищу собівартість. Тому при виборі ХБВ для споживача визначальним фактором є якість. Якісними вважають продукти, які є свіжими (70-80 %), смачними (35-40 %), гарними за зовнішнім виглядом (30-35 %) та корисними для здоров'я (15-20 %) [2].

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

У наш час хімічний склад хліба дуже бідний, що зумовлено багатьма факторами [3]: нестабільна якість борошна, різноманіття видів і властивостей використовуваної сировини (у тому числі нетрадиційної); розширення асортименту хлібобулочних виробів із тривалим терміном зберігання свіжості тощо; вдосконалення технології виробництва прискореними і «холодними» способами тістоприготування; застосуванням нового обладнання з інтенсивним механічним впливом на тісто.

Тому додавання збагачуючих добавок є повсякденним та поширеним явищем. Більшість добавок і поліпшувачів не мають здебільшого харчового значення і в кращому випадку є біологічно інертними, а в гіршому – виявляються біологічно активними і шкідливими для організму.

Оцінкою корисності продукції з використанням різних видів добавок займалися В. І. Дробот, О. В. Самохвалова, В. Ф. Доценко, С. Г. Олійник та ін. Встановлена ефективність використання вітамінно-мінеральних преміксів, різних біологічно активних добавок і поліпшувачів [4]. В інших роботах показана ефективність використання у складі заквасочних культур мікроорганізмів, які продукують вітаміни [5]. Результати досліджень із використання безглютенового борошна [6] показали, що таке борошно сприяє збільшенню міцності структури і послабленню пружно еластичних властивостей виробів.

До безглютенового борошна відносять кокосове, гречане, рисове, горіхове (мигдальне), нутове, амарантове, гарбузове, кукурудзяне борошно та борошно тапіоки [7]. Для проведення подальших досліджень обрано види борошна, що доступні на ринку України у промислових масштабах. Гречане борошно містить вітаміни В1, В2, В6, В9, Е, РР, а також мікро- та макроелементи – калій, кальцій, натрій, сірку, фосфор, магній, залізо, мідь, фтор, цинк, марганець, кобальт та фолієву кислоту. Рисове борошно багате вітамінами – В1 у невеликій кількості, В2, В4, В5, В6, В9, РР, Е, а також мікро- та макроелементами (залізо, марганець, калій, цинк, магній, селен). Кукурудзяне борошно – кальцій, магній, калій, фосфор, залізо, вітаміни групи В (В1, В2), вітаміни РР і Е, крохмаль і бета-каротин.

Фізико-хімічні показники безглютенового та пшеничного борошна суттєво відрізняється (табл. 1). Безглютенове борошно характеризується низькими хлібопекарськими властивостями у зв'язку з відсутністю білкового каркаса [7], а складові різних видів борошна суттєво впливають на фізико-хімічні, колоїдні та біохімічні процеси тіста. Чим більше їх вноситься до тіста, тим виразніше помітні зміни показників технологічного процесу та якості хліба [8].

Таблиця 1

*Хімічний склад сировини*

Показники	Борошно пшеничне вищого гатунку	Рисове борошно	Гречане борошно	Кукурудзяне борошно
Масова частка вологи, %, не більше	15	8,0	8,6	12,5
Кислотність титрована, град.	3,5	1,2	4,1	5,4
Білки, %	10,3	6,8	13,0	7,6
Жири, %	1,1	0,8	2,2	1,1
Вуглеводи, %	70,0	80,8	69,8	71,8
Клітковина, %	24,0	0,4	1,0	0,71
Зола, %	0,55	0,60	1,25	0,8

Безглютенова сировина відрізняється за низкою показників: кислотність кукурудзяного борошна в 4,5 рази більша, ніж рисового, в 1,3 рази – ніж гречаного. Гречане борошно, порівняно з рисовим і кукурудзяним, містить більше жирів. Досліджувані види безглютенової сировини будуть мати різні технологічні властивості кожне та по-різному впливатимуть у суміші з пшеничним борошном на показники якості хлібобулочних виробів.

Таким чином, заміна пшеничного борошна на безглютенове або його внесення як добавки є актуальним питанням для технологів харчових виробництв для збагачення готової продукції вітамінно-мінеральними комплексами.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Не досліджено використання в технології пшеничних хлібобулочних виробів добавок із безглютенового борошна змінних концентрацій, що забезпечують поліпшення якісних показників виробів.

**Мета роботи.** Розробка технології виготовлення пшеничного хлібу з використанням як добавки поліпшувача безглютенового борошна (рисового, гречаного та кукурудзяного) у змінній концентрації.

**Методи проведення досліджень.** У роботі було використано стандартні методики щодо визначення фізико-хімічних, структурно-механічних та органолептичних показників напівфабрикатів та готових виробів [9; 10]: напівфабрикати – кислотність (титрометричним методом), вологість, підйомна сила, питомий об'єм (за швидкістю зміни об'єму тіста в циліндрі); якість готових виробів -титрована кислотність м'якуша (арбітражним методом), пористість (за допомогою приладу Журавльова), кришкуватість, намокаємість, вологість м'якушки (за допомогою СЕШ-3М); органолептичні показники – згідно до СОУ 15.8.37-00389676-559:2007. Статистичне оброблення результатів досліджень, побудову графіків і діаграм виконували з використанням програмного забезпечення MS Office Excel.

Під час проведення лабораторних досліджень і виробничих випробувань використовували борошно гречане (ТУ15.6-00952737-006-2002), борошно кукурудзяне (ГОСТ 14176 – 69), борошно рисове (ТУ15.6-00952737-006-2002), борошно пшеничне вищого сорту (ДСТУ 46.004-99), дріжджі хлібопекарські пресовані (ДСТУ 4812:2007 та ТУУ 15.8-00383320-001), цукор білий кристалічний (ДСТУ 4623-2006), сіль кухонна (ДСТУ 3583-97) вода питна (ДСТУ 4808:2007).

#### **Викладення основного матеріалу дослідження.**

Дослідна частина роботи виконана в лабораторних умовах кафедри харчових технологій Чернігівського національного технологічного університету.

З метою з'ясування впливу безглютенового борошна на технологічний процес та якість хлібобулочних виробів готували суміш із безглютенового борошна (суміш рисового, гречаного та кукурудзяного у пропорції 1:1:1) та додавали як добавку в концентрації 5 та 10 % від загальної ваги пшеничного борошна за рецептурою. Контролем був зразок з пшеничного борошна без додавання добавок.

Для досліджень обрано рецептуру хліба «Надзбручанського формового» масою 0,8 кг, СОУ 15.8.37-00389676-559:2007. Для проведення досліджень розроблено рецептуру пробних зразків на основі уніфікованої, результати розрахунку наведено в табл. 2.

Таблиця 2

*Рецептура дослідних зразків з використанням добавки*

Сировина	Вміст добавки безглютенового борошна (рисового, гречаного та кукурудзяного), %		Контрольний зразок
	5	10	
Борошно пшеничне вищого сорту	380,0	360,0	400,0
Добавка безглютенового борошна (рисового, гречаного та кукурудзяного)	20,0	40,0	-
Дріжджі пресовані	10,0	10,0	10,0
Сіль	6,0	6,0	6,0
Цукор	15,0	15,0	15,0
Всього	431,0	431,0	431,0

Тісто готувалося безопарним способом. Добавку до борошна додавали під час змішування тіста. До складу добавки змішували рисове, гречане та кукурудзяне бо-

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

рошно у співвідношенні 1:1:1, суміш ретельно перемішували та в сухі компоненти за наведеною рецептурою додавали розчини цукру, солі та дріжджову суспензію. Тісто замішували вручну. Вистоювали тістові заготовки протягом 60 хвилин до кислотності 8,0-9,0 град, вологості тіста 45 %. До вистійної шафи подавався пар для зволоження повітря у шафі до 75-80 % і підтримки необхідної температури 35-45°C. Після вистоювання тістові заготовки поміщали у форми для випікання. Тривалість випікання становила 40 хвилин з парозволоженням за температури 210-220°C.

Результати проведених досліджень щодо якісних характеристик тістових напівфабрикатів наведено в зведеній табл. 3.

Таблиця 3

*Зведені дані показників дослідження якості тіста*

Показники	Контроль	Вміст добавки безглютенового борошна (рисового, гречаного та кукурудзяного), %	
		5	10
<i>Показники якості тіста</i>			
вологість тіста, %	43,8	45,3	46,38
температура початкова, °C	27,3	25,8	25,8
температура кінцева, °C	39,6	36,1	37,9
кислотність початкова, град	1,7	2,1	2,5
кислотність кінцева, град	2,7	2,9	3,1
питомий об'єм тіста, м <sup>3</sup> /кг	100	96	92
<i>Органолептична характеристика тіста:</i>			
колір	світлий	з коричнюватим відтінком	світло-коричневий
смак	властивий цьому виробу	ледь помітний присмак	більш виражений присмак
запах	без стороннього запаху	ледь помітний запах добавки	більш виражений запах добавки
консистенція	однорідна	однорідна	однорідна
<i>Параметри бродіння тіста:</i>			
тривалість, хв	170	170	170
температура, °C	32	32	32
маса тістових заготовок, г	628	676	631
<i>Параметри вистоювання тістових заготовок:</i>			
тривалість, хв	40	40	40
температура, °C	42	42	42
<i>Параметри випікання:</i>			
тривалість, хв	40	40	40
температура, °C	220	220	220

Таким чином, як видно з табл. 3, вологість тіста зростає при збільшенні концентрації добавки, що пояснюється більшою гігроскопічністю добавки суміші рисового, гречаного й кукурудзяного борошна. Стосовно кислотності визначено, що і початкова, і кінцева кислотність мають ту ж тенденцію до зростання зі збільшенням концентрації добавки порівняно з контрольним зразком. Вміст продуктів, що мають кислу реакцію (це переважно органічні кислоти) у добавці надзвичайно низький та практично не стимулює і не впливає на утворення і накопичення кислот, які позитивно діють на інтенсивність розмноження дріжджових клітин. Тому добавка не може значно вплинути на скорочення терміну бродіння тіста. Питомий об'єм тіста знижується при додаванні добавки, тому вироби можуть бути менш пухкими, матимуть менший об'єм та пористість.

Результати органолептичної оцінки готових виробів наведено в табл. 4. Отримані зразки хліба мають приємні органолептичні властивості, достатньо пористу м'якушку, привабливий колір.

## Зведені дані показників дослідження якості готових хлібобулочних виробів

Показники	Контр. зразок	Вміст добавки безглютенового борошна (рисового, гречаного та кукурудзяного), %	
		5	10
<i>Органолептичні показники</i>			
Зовнішній вигляд	відповідає формі, в якій проводилось випікання, без бокових впливів	відповідає формі, в якій проводилось випікання, без бокових впливів	відповідає формі, в якій проводилось випікання, без бокових впливів
Колір і стан поверхні	гладенька, без підривів, світлого кольору	гладенька, без підривів, з коричневатим відтінком	гладенька, без підривів, світло-коричнева
Колір і стан м'якушки	світлий колір, пориста	з коричневатим відтінком, пориста	світло-коричнева, має щільнішу пористість
Смак	властивий даному виробу	ледь помітний присмак гречки	більш виражений присмак гречки
Запах	без стороннього запаху	ледь помітний запах добавки	більш виражений запах добавки
<i>Показники якості готових виробів</i>			
Маса гарячого виробу, г	588	534	597
Маса виробу через 1 годину після випікання, г	582	530	591
Усихання, %	1,02	0,75	1,00
Вологість м'якушки, %	43,24	42,42	41,83
Кислотність м'якушки, %	0,9	1,9	2,3
Пористість м'якушки, %	74,03	72,35	69,5
Крихуватість, %	34,96	32,22	29,45
Водопоглинальна здатність, %	394,28	380,07	359,86

Встановлено, що додавання безглютенового борошна (рисового, гречаного та кукурудзяного) як добавки, призвело до погіршення питомого об'єму та пористості, і тим більше, чим більша частка борошна замінена, що можна пояснити специфікою набування добавки. Пористість м'якушки зразка з 10 % концентрацією добавки менша за норму в 72,0%. Збільшення дозування добавки до 10 % призводить до значного зниження якості хліба. Кислотність м'якушки досліджуваних виробів вища за контроль, що пояснюється більш високою кислотністю добавки та дає можливість подовжити термін зберігання і зупинити розвиток шкідливої мікрофлори. Кислотність усіх зразків відповідає нормативному значенню – не більше за 3,0 град., згідно із СОУ 15.8.37-00389676-559:2007. Вологість м'якушки знижується при збільшенні концентрації добавки порівняно з контрольним зразком, що пов'язано, на наш погляд, з підвищеними гігроскопічними властивостями безглютенового борошна. Вологість усіх зразків м'якушки відповідає нормативному значенню – не більше ніж 44,0 %.

**Висновки відповідно до статті.** Встановлено, що корисність хлібобулочних виробів із використанням безглютенового борошна як добавки значно зростає, оскільки збагачує продукт рослинними білками (повноцінні за амінокислотним складом), вітамінами В1, В2, РР, біотином та іншими корисними макро- та мікронутрієнтами.

Встановлено позитивний вплив безглютенового борошна (рисового, гречаного та кукурудзяного) як добавки на органолептичні характеристики хлібобулочних виробів.

У результаті проведеної порівняльної характеристики експериментальних зразків за фізико-хімічними та хімічними показниками спостерігається погіршення за значеннями вологості, кислотності та пористості готових виробів, але зразки з концентрацією добавки в 5 % мають характеристики близькі до нормативних значень. Тому для поліпшення показників необхідне введення додаткових джерел білка.

**Список використаних джерел**

1. Хлібопекарські поліпшувачі та харчові добавки. URL: <https://uk.baker-group.net/bread-and-bakery-products/985-bakery-improvers-and-food-additives.html>
2. Гаранина В. В. Основные тенденции развития хлебопекарной отрасли в современных условиях. Молодой ученый. 2018. № 50. С. 122-123.
3. Лабораторний практикум з технології хлібопекарського та макаронного виробництва: навчальний посібник / В. І. Дробот [та ін.]. Київ: Центр навчальної літератури, 2006. 341 с.
4. Кузьминский Р. В., Патт В. А., Щербатенко В. В., Столярова Л. Ф. Пути повышения пищевой ценности хлебобулочных изделий. Москва: ЦНИИТЭИПищепром, 1979. 66 с.
5. Дробот В. І. Технологія хлібопекарського виробництва. Київ: Логос, 2002. 365 с.
6. Кожевнікова В. О. Удосконалення технології хлібобулочних виробів з використанням лікарської та пряно-ароматичної сировини. URL: [https://www.onaft.edu.ua/download/dissertation/thesis/Dyser\\_Kozhevnikova.pdf](https://www.onaft.edu.ua/download/dissertation/thesis/Dyser_Kozhevnikova.pdf).
7. Бабіч О. В., Дорохович А. М. Безглютенове борошно доцільно використовувати при виробництві борошняних кондитерських виробів. *Харчова і переробна промисловість*. 2005. № 4. С. 20-22.
8. Грищенко А. М., Дробот В. І. Технологічні властивості безглютенових видів сировини. *Зб. наук. пр. ОНАХТ*. 2017. Вип. 46, т. 1. С. 162-166.
9. ДСТУ 7044:2009. Вироби хлібобулочні. Правила приймання, методи відбирання проб, методи визначення органолептичних показників і маси виробів. [Чинний від 2010-01-01]. Київ: Державний комітет стандартизації метрології та сертифікації України, 2010. 10 с.
10. Дробот В. І. Технохімічний контроль сировини та хлібобулочних і макаронних виробів. Київ: Кондор, 2015. 958 с.

**References**

1. Khlibopekarski polipshuvachi ta kharchovi dobavky [Baking enhancers and nutritional supplements] (2014). Retrieved from <https://uk.baker-group.net/bread-and-bakery-products/985-bakery-improvers-and-food-additives.html> [in Ukrainian].
2. Garanina, V. V. (2018). Osnovnye tendentsii razvitiia khlebopekarnoi otrasli v sovremennykh usloviakh [The basic tendencies of development of the baking industry in modern conditions]. *Molodoi uchenyi – Young scientist*, 50, 122-123 [in Russian].
3. Drobot, V. I. (2006) *Laboratoryni praktykum z tekhnolohii khlibopekarskoho ta makaronnoho vyrobnytstva* [Laboratory for bakery and pasta production technology]. Kyiv: In Yure [in Ukrainian].
4. Kuzmysnyi, R. V., Patt, V. A., Shcherbatenko, V. V., Stoliarova, L. F. (1979). *Puti povyshe-niia pyshevoi tsennosti khlebobulochnykh izdelii* [Ways to enhance the nutritional value of bakery products]. Moscow: In Yure [in Russian].
5. Drobot, V. I. (2002). *Tekhnolohiia khlibopekarskoho vyrobnytstva* [Bakery production technology]. Kyiv: In Yure [in Ukrainian].
6. Kozhevnikova, V. O. (2009). *Udoskonalennia tekhnolohii khlibobulochnykh vyrobiv z vy-korystanniam likarskoi ta priano-aromatychnoi syrovyny* [Improvement of bakery technology using medicinal and spicy aromatic raw materials]. Retrieved from [https://www.onaft.edu.ua/download/dissertation/thesis/Dyser\\_Kozhevnikova.pdf](https://www.onaft.edu.ua/download/dissertation/thesis/Dyser_Kozhevnikova.pdf).
7. Babich, O. V., Dorokhovych, A. M. (2005). *Bezghliutenove boroshno dotsilno vykorystovuvaty pry vyrobnytstvi boroshnianykh kondyterskykh vyrobiv* [It is advisable to use gluten-free flour in the technology of confectionery]. *Kharchova i pererobna promyslovist – Food and processing industry*, 4, 20-22 [in Ukrainian].
8. Hryshchenko, A. M., Drobot, V. I. (2017). *Tekhnolohichni vlastyvoli bezghliutenovykh vydiv syrovyny* [Technological quality of gluten-free raw materials]. *Zbirnyk naukovykh prats ONAKhT – Coll. Sciences. ONAHT Ave.*, 46 (2), 162-166 [in Ukrainian].
9. *Vyrobny khlibobulochni. Pravyla pryimannia, metody vidbyrannia prob, metody vyznachennia orhanoleptychnykh pokaznykiv i masy vyrobiv DSTU 7044:2009* [Bakery products. Acceptance rules, sampling methods, methods for determining organoleptic characteristics and weight of products] (2010).
10. Drobot, V. I. (2015). *Tekhnokhimichni kontrol syrovyny ta khlibobulochnykh i makaronnykh vyrobiv* [Technochemical control of raw materials and bakery and pasta]. Kyiv: In Yure [in Ukrainian].

UDC 664.641.4

Natalya Denysova, Margaryta Ziniuk, Nataliia Buialska

**USE OF ADDITIVES OF GLASS-FREE FLOUR IN TECHNOLOGY OF BAKERY PRODUCTION**

**Urgency of the research** is due to the need to develop technological recipes for bakery products using natural additives to improve the quality characteristics of finished products.

**Target setting.** Bakery products are the main product of consumption of the vast majority of the population of our country and the world as a whole, so there is a need to develop and implement measures to improve the quality and nutritional characteristics of products in a competitive environment.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Scientific publications have shown the prospect of introducing into the recipe bakery products as enrichers and enhancers of natural additives of vegetable and animal origin.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** The use of gluten-free flour additives in variable concentrations to improve the quality of the products have not been investigated in the technology of wheat bakery products.

**The research objective.** Development of technology for making wheat bread using gluten-free flour (rice, buckwheat and corn) as an additive, which will improve the physico-chemical, structural-mechanical and organoleptic characteristics of the finished products.

**The statement of basic materials.** Assessment of physico-chemical, structural-mechanical and organoleptic parameters of yeast, test semi-finished products and finished products. The recipe for the preparation of wheat bread with the use of a mixture of gluten-free flour (rice, buckwheat and corn in equal concentrations) with a dosage of 5 and 10 % by weight of the introduced wheat flour was developed.

**Conclusions.** The positive effect of 5 % additive of gluten-free flour mixture (rice, buckwheat and corn in equal concentrations) on the physicochemical, structural-mechanical and organoleptic parameters of wheat bakery products on the example of the technology of bread making of the super-baked.

**Keywords:** wheat bread; gluten-free flour; manufacturing technology.

**Table:** 4. **References:** 10.

**Денисова Наталя Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри харчових технологій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Denysova Natalya** – PhD in technical sciences, Associate Professor, Department of Food Technology, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** 4386793@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-3522-4210>

**ResearcherID:** G-6068-2016

**Зінюк Маргарита Олександрівна** – студентка, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Ziniuk Margaryta** – student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** margosha.zinyk@gmail.com

**Буяльська Наталія Павлівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

**Buialska Nataliia** – PhD in technical sciences, Associate Professor, Department of Food Technology, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** buialska@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-6800-5604>

**ResearcherID:** G-2935-2014

**ScopusID:** 57196191416



Антоніна Дубініна, Тетяна Летута, Тетяна Фролова

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЛІКАРСЬКО-РОСЛИННИХ ЕКСТРАКТІВ НА МІКРОФЛОРУ БАКЛАЖАНІВ

**Актуальність теми дослідження.** З метою подовження термінів зберігання, збереження споживчих властивостей свіжих овочів застосовують різні післязбиральні засоби обробки, але кожен із цих засобів має негативні властивості різного характеру. Актуальним є пошук нових джерел антибактеріальних та протимікробних засобів обробки плодоовочевої сировини, одним з яких можуть бути екстракти з лікарсько-рослинної сировини.

**Постановка проблеми.** Визначено, що мікробіальне псування плодів баклажанів є основною причиною втрат рослинної сировини при зберіганні, яке викликають бактерії та грибки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведено аналітичний огляд вітчизняної та зарубіжної науково-технічної літератури й патентної інформації відносно мікробіоти плодів баклажанів та дії на неї екстрактів лікарсько-рослинної сировини.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Пошук нових антибактеріальних засобів природного походження з властивостями екологічно безпечного для організму людини та широкого спектра дії на мікробіоту плодів баклажанів з метою подовження тривалості зберігання плодоовочевої сировини.

**Постановка завдання.** Провести аналіз сучасних методів зберігання плодоовочевої сировини. Надати аналітичний огляд вітчизняної та зарубіжної науково-технічної літератури й патентної інформації відносно мікробіоти плодів баклажанів та дію на неї екстрактів лікарсько-рослинної сировини. Проаналізувати фунгіцидні властивості екстрактів лікарсько-рослинної сировини щодо основних природних захворювань баклажанів різних форм гнилі та антракнозу. Визначити перспективність подальшого вивчення та використання екстрактів лікарсько-рослинної сировини для обробки плодів баклажанів при зберіганні.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження мікробіального псування плодів баклажанів під час зберігання та антимікробної дії на неї екстрактів лікарсько-рослинної сировини. Обґрунтування запропонованої композиції як ефективно-універсального засобу для захисту під час збереження, що покриває увесь спектр поширених хвороб плодів баклажанів.

**Висновки відповідно до статті.** Запропонована композиція для післязбирального оброблення з екстрактів лікарсько-рослинної сировини дозволяє зменшити втрати від мікробіального псування та подовження тривалості зберігання плодів баклажана.

**Ключові слова:** баклажани; бактерії; грибки; зберігання; специфічна мікрофлора; фунгіцидна дія; антибактеріальні властивості.

Бібл.: 53.

**Актуальність теми дослідження.** З метою подовження термінів зберігання, збереження споживчих властивостей свіжих овочів застосовують різні післязбиральні засоби обробки. В останні десятиліття технології зберігання пройшли розвиток від збереження в умовах холодильного охолодження та регульованого газового середовища до обробки біологічно активними речовинами. Здебільшого для обробки овочів використовують синтетичні препарати, яким притаманні негативні властивості: токсичний вплив на організм людини та вузький спектр дії на мікробіоту овочів. У зв'язку з цим актуальним є пошук нових методів, які забезпечують стабілізацію продукції рослинництва у процесі зберігання та відповідають санітарно-гігієнічним вимогам, екологічній безпеці, господарській ефективності та сприяють збереженню поживних, лікувальних та смакових якостей плодів та овочів.

Отже, актуальним є пошук нових джерел протимікробних засобів обробки плодоовочевої сировини, одним з яких можуть бути екстракти з лікарсько-рослинної сировини. Речовини різної хімічної природи, які синтезуються рослинами, володіють широким спектром бактерицидних і фунгіцидних властивостей. З огляду на вищезазначене пошук нових антимікробних засобів природного походження є актуальним перспективним напрямком збереження якості свіжих овочів при зберіганні.

**Постановка проблеми.** У вирішенні проблеми продовольчої безпеки України визначальне значення має не тільки збільшення виробництва сільськогосподарської продукції, а й максимально можливе збереження якості, харчової та біологічної цінності плодоовочевої сировини з мінімальними втратами на різних етапах «вирощування-транспортування-зберігання-реалізація».

Виконаний огляд патентно-інформаційної літератури з проблеми тривалого зберігання овочевої сировини підтвердив прямий зв'язок втрат овочевої сировини під час процесу тривалого зберігання з ростом життєдіяльності бактерій та грибків.

Обсяги втрат при зберіганні овочів і плодів становлять до 40 %. Високу якість реалізованої плодоовочевої продукції більшою мірою забезпечує технологія зберігання. При виборі найбільш прийнятних способів зберігання плодоовочевої продукції враховуються багато факторів – економічна ефективність, терміни, наявність матеріально-технічної бази.

Традиційні способи, такі як холодильне зберігання, використання регульованих газових середовищ (регульована атмосфера (РА), регульоване газове середовище (РГС), модифіковане газове середовище (МГС)) є досить ресурсовитратними, пов'язані зі значними капітальними витратами, вимагають хорошої якості робочого матеріалу, спеціального дорогого обладнання і відрізняються додатковою трудомісткістю, високою енергоємністю та технічно складним процесом. Зберігання при низьких температурах уповільнює розвиток багатьох бактерій і грибів, але не виключає ураження продукції психрофільними мікроорганізмами та може викликати пошкодження поверхні плодів та овочів через вплив низьких температур.

Застосування агресивних дезінфікуючих речовин (сірчистий ангідрид ( $\text{SO}_2$ ), сорбінова кислота, хлор (хлорна вода), тіабендазол, беном та тощо), що інгібують мікробіологічні процеси псування плодів та овочів при зберіганні, але можуть проявити токсичну дію на організм людини. Однак нині неможливо повністю відмовитися від хімічних засобів боротьби з хворобами плодоовочевої продукції у процесі зберігання. Відмінними рисами цих методів є простота застосування, швидкість, висока ефективність, достатня вивченість.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Менш поширені методи зберігання плодоовочевої сировини – обробка бактеріальними й біологічно активними препаратами, інгібіторами етилену, озоном, використання спеціальних упаковок і сорбентів. Багато з цих методів відрізняються незначними витратами і можуть бути використані в господарствах невеликих розмірів.

Вітчизняні вчені О. С. Мироничева, Н. А. Гапріндашвілі, В. Ф. Жукова, В. М. Безменнікова, О. П. Герасимчук, С. В. Демченко [1–6] у своїх дослідженнях доводять доцільність використання антиоксидантних композицій на основі водних розчинів сантохіну, амінофенолу, іонолу, сорбінової та бензойної кислот для збереження плодів та овочів.

Науковці В. В. Дятлов, І. І. Медведкова, Г. М. Наумова, Л. Б. Коротішева [7–10] та інші пропонують використання плівкоутворюючих композицій, до складу яких входять полівиниловий спирт, протексан, Na-КМЦ (натрій карбоксиметилцелюлоза), полівинилпиргомедон, поліакриламід, поліетиленоксиди, селени, твіни для обробки та зберігання плодоовочевої сировини.

Використання антиоксидантних та плівкоутворюючих композицій, зокрема з харчовими поверхнево-активними речовинами (натуральний воск, канделін, йодистий калій і лікоподій в поєднанні з гліцерином, касторовою олією, парафіновим маслом, пшеничною зв'язкою), не тільки екологічно небезпечні, але і шкідливі для здоров'я людини [11].

У всьому світі використання рослинної сировини як альтернативи синтетичним пестицидам щорічно збільшується. Зокрема, зростаючий попит на ботанічні пестициди набагато вище в промислово розвинених країнах через збільшення виробництва органічних продуктів харчування. Рослинні препарати мають багато переваг у порівнянні із синтетичними хімічними речовинами: менша кількість або відсутність залишків через швидку деградацію, незначний або нульовий шкідливий вплив на людину або навколишнє середовище й економічна ефективність. Однак ботанічні пестициди мають деякі обмеження, оскільки спостерігається повільна й більш низька ефективність у порівнянні з хімічними пестицидами і менша ефективність при застосуванні. Таким чином, потрібна

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

розробка нових складів із підвищеною ефективністю і більш тривалим терміном зберігання. Сьогодні для складання рецептур застосовуються нанотехнології, тому такі частини рослин, як екстракти фруктів, листя, кори, насіння і стебел, використовуються як ефективні складники для боротьби з фітопатогенами [18].

Останнім часом лікарські рослини та їхні екстракти набули великого значення як потенційні антимікробні агенти, оскільки зазвичай вважається, що вони є більш прийнятними і менш небезпечними, ніж синтетичні сполуки. Використання екстрактів лікарсько-рослинного походження для обробки плодів та овочів, після збирання, може бути реальною альтернативою традиційним та хімічним методам захисту від хвороб [12].

Закордонні вчені приділяють велику увагу дослідженням впливу екстрактів лікарсько-технічної сировини в застосуванні обробки плодів та овочів при зберіганні.

У дослідженнях Ozturk I. et al. [13] екстракти чебрецю і чабру показали найбільший антимікробний та антибактеріальний ефекти на всі види патогенів хвороб салату «Айсберг».

Результати досліджень Catello Pane, Florinda Fratianni, Mario Parisi, Filomena Nazzaro [14] показали протигрибкову активність проти *Alternaria alternata* екстракту листя дикого *Capsicum annuum*, який багатий природними фенольними сполуками та може бути перспективним для застосування в захисті плодів та овочів при зберіганні.

Науковці М. Божик, П. Клоучек, П. Новий [15] у своїх дослідженнях на сприйнятливність бактеріальних післязбиральних патогенних мікроорганізмів (*Pectobacterium carotovorum subsp. carotovorum* (CCM 1008), *Pseudomonas syringae* (CCM 7018), *Xanthomonas campestris* (CCM 22) до ефірних олій довели, що найбільш ефективними ефірними оліями були виявлені олії орегано та кориці.

Takam, G.H.F. et al. [16] у своїй роботі дослідили альтернативу синтетичним фунгіцидам для продовження терміну зберігання плодів томата – властивості екстракту *Thymus vulgaris* (чебрець), який може потенційно запобігати виникненню інфекцій плодів після збирання врожаю.

Екстракт *H. perforatum* (звіробій звичайний) у дослідженнях Дильфуза Эгамбердиева, Стефана Вірта, Ундіни Берендт, Парваіз Ахмада, Габрієли Берг [17] показав потенційну протигрибкову активність ендоспориї проти *F. oxysporum* та *A. Alternata*.

Дослідники Vu T. T. et al. [18] у пошуках нових антибактеріальних засобів з природних джерел виявили активність екстракту *Sapium baccatum* проти *Ralstonia solanacearum*, завдяки вмісту галлової кислоти, метілгаллату, корілагіну, теркатаїну, хебулагінової кислоти, хебулінової кислоти і кверцетину 3-O- $\alpha$ -L-арабінопіранозиду.

У своїх дослідженнях учені Ібрагім Ф.А.А. та Ебаді Н.А. [19] протестували та довели антибактеріальні та протигрибкові властивості етанольного екстракту розмарину (*Rosemarinus officinalis* L) та масла орегано (*Origanum vulgare* L.) щодо таких грибів, як *A. niger*, *A. flavus*, *Penicillium spp.*, *Rhizopus spp.* і *Fusarium Spp.*, у хімічному складі яких є карвакол та борнеол.

Ученими Kwon S.-J. et al. [20] розроблена плівка з полівінілового спирту, яка містить мікрокапсули ефірного масла орегано, у ролі упаковки томатів чері для зниження зростання мікроорганізмів та високу ефективність проти *Salmonella enterica*, цвілі, дріжджів і мезофільних аеробних бактерій.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Пошук нових антибактеріальних засобів обробки плодів баклажана природного походження для тривалого зберігання дозволяє уникнути великих втрат та зниження споживних властивостей, а також значно збільшити терміни зберігання та скоротити матеріальні витрати на зберігання плодоовочевої сировини.

**Постановка задачі.** Метою роботи є аналітичний огляд вітчизняної та зарубіжної науково-технічної літератури і патентної інформації відносно мікробіоти плодів баклажанів та дії на неї екстрактів лікарсько-технічної сировини.

**Виклад основного матеріалу.** Баклажан (*Solanum melongena*) – трав'яниста рослина, родини пасльонових (*Solanaceae*), є дуже важливою харчовою культурою по всьому земному шару, зокрема й в Україні. Така світова популярність баклажана пов'язана з харчовою цінністю цього овочу, до складу якого входять значна кількість вуглеводів, білків, вітамінів й органічних кислот. Незважаючи на поширене використання цієї культури в сільському господарстві, культивування плодів баклажана є досить ресурсозатратним заходом, що залежить від регіону й сезону вирощування, пророщування насіння у воді, підготовки розсади, глибини висівання у ґрунті й інших умов. Врожайність баклажана безпосередньо залежить від вищезазначених факторів і дотримання умов вирощування. Утім однаково, як у будь-якій іншій сільськогосподарській культурі, основні втрати вражаю баклажана приходяться на мікробіологічне псування плодів [22].

Плоди баклажана збирають молодими, поки вони ще не дозріли – у стадії технічної стиглості, залежно від сорту й умов вирощування, через 25-40 днів після цвітіння. У цей час насіння у них дрібні, м'якоть ніжна [25].

При дозріванні до біологічної зрілості на рослині плоди розм'якшуються і стають гіркими та непривабливими для використання в їжу, а насіння значно зміцнюється та збільшується в розмірі. У плодах баклажанів міститься речовина соланін М (мелонген), яке надає гіркуватий присмак плодам. У міру дозрівання насіння вміст соланіну в плодах збільшується, відповідно посилюється гіркота. Концентрований соланін М є сильнотоксичною отрутою. До моменту біологічної зрілості плодів (дозрівання насіння) соланіну М накопичується в плодах така кількість, що вони стають непридатними до вживання [23].

Культура може культивуватися як на полі, так і в теплиці, залежно від кліматичних умов регіону вирощування, і це потрібно враховувати для зберігання плодів. Після збирання плодів вони мають гладку, глянсову поверхню шкірки без широких пор та виступів, що робить плоди стійкими до втрати вологи. Проте необхідно враховувати, що навіть невеликий ступінь зневоднення може призвести до помітного пом'якшення та зниження якості овочу [26; 27].

При збиранні баклажанів необхідно відсікати стебла від плоду, залишаючи на останньому зелену чашечку, без неї псування плоду сильно прискорюється. Потрібно обережно складати зібрані овочі до контейнерів для зберігання з уникненням утворення механічних травм [22; 24].

Також плоди баклажана характеризуються високою чутливістю до переохолодження, отже, мінімальна температура зберігання при відносній вологості 90-95 % становить 8-12 °С. У таких умовах баклажани можна зберігати впродовж 14 днів, і після цього терміну органолептичні якості плоду швидко погіршуються. При нефіксованих умовах зберігання погіршення стану овочів відбувається раніше, особливо в типових умовах роздрібної торгівлі. При транспортуванні застосовується короткотермінове переохолодження баклажанів, що дозволяє запобігати втрачання рідини плодами й пригніченню розвитку хвороб, але призводить до погіршення стану плоду через кілька днів. При температурі близько 5 °С пошкодження плоду відбувається через 6-8 днів. Наслідки холодової травми проявляються в вигляді плямистості, бронзовіння, затвердіння насіння й розпушення тканин плоду. Після переохолодження в більшості овочів спостерігається прискорений розпад під впливом грибів роду *Alternaria*. Вогнищами розвитку хвороб у переохолоджених плодів після відновлення температурного режиму виступають механічні травми, які можуть бути отримані ще під час збирання врожаю баклажанів [23; 28].

Контроль повітря у приміщенні для зберігання баклажанів спрямований на зниження порційного вмісту кисню і підвищення вуглекислого газу, що дає змогу зменшити процеси гниття. У деяких випадках для контролю дозрівання овочів використовують

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

етилен. Його застосовують зазвичай короткостроково, через прискорення втрат вологи плодом [28].

Зменшити втрату води плодами можна через зберігання баклажанів під поліетиленовою плівкою або в синтетичних мішках, але через такий спосіб зберігання овочі починають псуватися під впливом патогенів роду *Botrytis* [25; 28].

У разі недотримання необхідних умов зберігання на баклажанах з'являються симптоми ураження, що включають появу світло-коричневих плям на шкірці, розм'якшення плоду, утворення отворів на шкірці, гниття, потемніння м'якоті й насіння [27].

Основними природними захворюваннями баклажанів є різні форми гнилі й антракнозу. Плоди баклажана схильні до враження різними типовими й нетиповими патогенами, серед яких трапляються бактерії роду *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Erwinia* та гриби роду *Botrytis*, *Alternaria*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Rhizopus*, *Sclerotium* й *Phomopsis*. Гниття та в'янення плодів, викликані *Alternaria* та *Phomopsis* й антракнози різного походження є найбільш поширеними хворобами врожаю баклажанів [29].

Здебільшого грибкове гниття овочу спричиняє інвазія патогену *Phomopsis vexans*. Ця інфекція вражає майже всі надземні частини рослини. Хвороба починається з проявлення плямистості й бугорків світло-коричневого кольору, що поступово перетворюється на сухі або м'які вогнища гнилі, що охоплюють увесь плід. Оптимум розвитку грибу спостерігається при 30 °С, але температурні режими, що використовуються при зберіганні баклажанів не несуть загрози для життєдіяльності патогену, а лише сповільнюють темпи його росту. На вражених тканинах гриб формує конідії різної форми й характерний міцелій. Патоген може з легкістю залишатися в насінні інфікованої рослини впродовж тривалого часу, тому для обмеження поширеності хвороби рекомендовано не проводити висівання насіння, що отримано з інфікованих регіонів. Гниття, викликане *Verticillium*, що відбувається значно рідше, має схожі симптоми, але починається з пожовтіння чашечки й листя плоду. Також ця хвороба схожа на суху форму гнилі, що викликає *Diaporthe vexans* [30].

При грубому недотриманні встановлених умов зберігання або при повній їх відсутності, плоди баклажанів вражає сумісна інфекція *Alternaria tenuis*, *Erwinia carotovora*, *Phomopsis vexans*. При поширенні цих інфекційних агентів баклажана (не має значення, який патоген інфікував першим) відмічається дуже швидке гниття й розм'якшення тканин плоду з вивільненням соку, що може інфікувати інші здорові овочі [29; 30].

Коричневі форми гнилі баклажанів найчастіше спричинені *Phytophthora parasitica* й характеризуються виникненням кругових, темних, просочених вологою уражень. На інфікованих плодах візуалізуються поверхневі проростання міцелію грибу сіро-коричневого відтінку [31].

Антракноз баклажанів переважно викликають патогенні гриби *Gloeosporium melongense*, *Colletotrichum gloeosporioides* й *Fusarium melongenae*. Ця хвороба трапляється серед врожаю баклажана, що вирощувався на відкритому ґрунті частіше, ніж у випадку культивування в тепличних умовах. Хвороба активно прогресує в умовах дощів, надмірно високої вологості та при навколишній температурі 15-25 °С, при цьому грибові патогени можуть розвиватися у широкому температурному діапазоні 3-30 °С. Антракноз, незалежно від збудника, вражає майже всі надземні частини рослини й передусім проявляється виникненням овальних сірих плям з чітко окресленим краєм на листах. Плід баклажана, вражений антракнозом, розтріскується й покривається сіро-коричневими вогкими поглибленнями з темно-сірим пухким налітом. Під впливом цієї інфекції зазвичай втрачають майже 20 % врожаю, особливо часто хвороба спричиняє масову загибель овочів при транспортуванні [29; 30; 31].

Треба зазначити, що баклажан, як деякі інші пасльонові харчові культури, схильні до псування колорадським і блошиним жуками. Комахи заподіюють шкоди лише при

вирощуванні, а після збору плодів спричинені ними механічні травми шкірки баклажанів служать отворами для проникнення інфекції. Також баклажани, що вирощуються на відкритому ґрунті майже завжди вражені нематодами, життєдіяльність яких призводить до механічного руйнування плоду [30].

Для запобігання основних захворювань плодів баклажана, таких як антракнози та гниття, викликане *Alternaria* та *Phomopsis*, прийнято застосовувати фунгіциди похідні дитіокарбамінової кислоти й пропінелу, які за дотримання необхідних умов зберігання, дозволяють зберегти значну частину врожаю, але можуть викликати токсичні й алергічні реакції у споживачів. Вражені овочі обробляють оксіхлоридом купруму, що є ефективним, але небезпечним для людини фунгіцидним засобом [29]. Крім того часто застосовують розчини нематодцидних та інсектицидних речовин, таких як альдікарб, карбофуран, форат та інші, що також не мають задовільного профілю безпеки [32].

Оскільки псування плодів баклажана теоретично можуть викликати широкий ряд різних патогенів, то для розробки захисного засобу необхідно використовувати рослинні екстракти, що володіють вираженою загальною антибактеріальною, протимікробною й протигрибковою активністю.

Дуб звичайний (*Quercus robur*) – це багаторічна дерев'яниста рослина родини букових, що повсюдно росте на території Європи, у тому числі й в Україні. Ця рослина є джерелом сировини для деревообробної, сільськогосподарської й фармацевтичної промисловості. Для виготовлення біологічно активних екстрактів використовують кору, гали або листя дуба.

У медицині й фармації лікарсько-рослинна сировина дуба є джерелом природних дубильних фенольних речовин (8-20 %): танінів, елаготанінів, катехінів і галових кислот, а при комплексному аналізі в лікарсько-рослинній сировині дуба виявляються майже всі класи поліфенольних сполук. До хімічного складу кори й листя дубу також у великій кількості входять фенольні кислоти, флаваноли та флавоноїди, пентозани, пектини, терпеноїди, сапоніни, кумарини, стильбени, лігніни й деякі стероїдні сполуки. Весь комплекс поліфенольних сполук лікарсько-рослинної сировини дубу чинить потужну протимікробну і протигрибкову дію насамперед завдяки дубильним властивостям, що впливають на клітини мікроорганізмів: порушують цілісність мембрани й функції вбудованих у неї білків, а також попереджають сигнальні взаємодії між клітинами патогену [33; 34; 35].

Вивчення загальних протимікробних властивостей екстрактів лікарсько-рослинної сировини дуба з неполярними розчинниками показали, що нерозведений етилацетатний екстракт лише трохи поступався за активністю інгібування зони росту стрептоміцину (у стандартній для досліджень концентрації 2 мг/мл) у тестах із мікроорганізмами *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumonia*, *Staphylococcus epidermidis*, а в тесті з *Bacillus subtilis* в багато разів перевищував активність антибіотика, до якого патоген був нечутливий [35].

У мікробіологічних дослідженнях Ernest R. Mbega і співавторів з пошуку перспективних рослинних засобів для контролю плямистості томатів було продемонстровано високу активність екстракту листя дуба проти патогена *Xanthomonas perforans*, інфекція якого вражає плоди, зокрема їх насіння. У процесі дослідження було встановлено, що при лікуванні 20 одиниць насіння враженого *Xanthomonas* за допомогою 1 мл 10 % водного екстракту листя дубу значно знижувалася кількість мікробного матеріалу в насінні – з  $1 \cdot 10^7$  до  $7 \cdot 10^1$  КУО (колонієутворюючих одиниць)/мл, а після пророщування кількість вражених рослин зменшувалася на 64,5 % у порівнянні з контролем. При цьому екстракт лікарсько-рослинної сировини дубу не впливав на органолептичні показники насіння й не спричиняв токсичної дії [36].

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

У даних щодо чутливості бактерій роду *Erwinia* до рослинних екстрактів є повідомлення про знайдену активність водних і спиртових екстрактів лікарсько-рослинної сировини дубу проти цих патогенів за умов лабораторних тестів, але поки що не було остаточних підтверджень цього виду активності в експериментах *in vivo* [36].

Kolodziej та співавторами [37] була описана потужна антимікробна активність усіх танінів знайдених в екстрактах лікарсько-рослинної сировини дуба щодо мікроорганізмів *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Proteus mirabilis*, *Candida albicans* й *Cryptococcus neoformans*. Особливо ретельно була досліджена галова кислота, що є одним з основних компонентів фракції танінів екстрактів дуба, для неї була встановлена мінімально інгібуюча концентрація (МІК) 125-250 мкг/мл. Також ними було вивчено загальні протигрибкові властивості галової кислоти й інших танінів дуба. Була встановлена потужна протигрибкова активність цих сполук проти *Epidermophyton floccosum*, *Microsporium canis*, *Microsporium gypseum*, *Trichophyton mentagrophytes*, *Trichophyton rubrum*, *Trichophyton tonsurans*, *Trichophyton terrestre*, *Penicillium italicum*, *Aspergillus fumigatus*, *Mucor racemosus* й *Rhizopus nigricans*, а знайдена для різних мікроорганізмів МІК (мінімально інгібуюча концентрація) варіювала від 1,1 до 5,9 мк/моль [38].

На другому Європейському симпозіумі з алелопатії повідомлялося про вивчення впливу різних рослинних екстрактів на ріст і розвиток грибів *Fusarium oxysporum*, *Fusarium culmorum*, *Fusarium solani*, *Rhizoctonia solani*, *Bitrytis cinerea* й *Alternaria alternata*, що проводилося в межах пошуку перспективних рослинних засобів для захисту плодів культур в аграрній промисловості. За даними, представленими Stompor-Chrzan, визначалося, що водні та спиртові екстракти кори й листя дуба в максимальній дозі 200 мкг/мл інгібували ріст патогенів на 80-100 %, протигрибкова активність відмічалася й через 4 та 8 днів інкубаційного періоду [40].

Ялівець звичайний (*Juniperus communis*) – вічнозелена хвойна рослина родини Кипарисових (Cupressaceae). Росте ялівець зазвичай у підлісках хвойних лісів у країнах Європи, Азії, Північної Америки, також трапляється на території Північної Африки. В Україні рослина поширена в регіонах Карпат та Поліссі. У фармацевтичній промисловості переважно використовують шишко-ягоди ялівцю, але також можуть отримувати деякі речовини із хвої рослини. Лікарсько-рослинна сировина ялівцю є джерелом ефірних олій, що володіють помітним протигрибковим і протимікробним ефектом. В офіційній медицині з шишко-ягід виробляють водно-спиртові екстракти, настоянки й сухі екстракти [41].

Головною фракцією, що містить більшість біологічно активних речовин рослини, є ефірна олія, якої в ягодах ялівцю може бути до 3 %. Близько 58 % ефірної олії становлять монотерпенові сполуки, з яких переважна кількість припадає на  $\alpha$ -пінен (20 %), лімонен (8,7 %) й міоцен (8,5 %). Крім того, у достатній для аналізу кількості присутні  $\beta$ -пінен, сабінен, 1,4-цинеол, камфен, 4-терпінеол та ін. Також в ягодах ялівцю були знайдені сесквітерпени (ізоформи кадінену), дітерпенові кислоти, таніни (проантоціанідіни, галокатехіни, епігалокатехіни), флавоноїди (аментофлавіон, кверцетин, ізокверцетин, апігенін), лігнани, глікозиди й органічні кислоти [41; 42].

Ефірна олія ялівцю багато разів досліджувалася на наявність протимікробних і протигрибкових властивостей проти різних видів мікроорганізмів. Так, велике мікробіологічне дослідження Pereljnjak й співавторів з вивчення впливу ефірної олії ялівцю на ріст великого переліку мікроорганізмів (*Bacillus cereus*, *Bacillus subtilis*, *Micrococcus flavus*, *Micrococcus luteus*, *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus epidermidis*, *Enterococcus faecalis*, *Serratia spp.*, *Citrobacter freundii*, *Salmonella enteritidis*, *Proteus mirabilis*, *Shigella sonnei*, *Klebsiella oxytoca*, *Escherichia coli*, *Yersinia enterocolitica*, *Candida albicans*, *Candida krusei*, *Candida tropicalis*, *Candida parapsilosis*,

*Candida glabrata*, *Candida kefyr*, *Candida lusitanae*, *Cryptococcus neoformans*, *Geotrichum candidum*, *Hansenula anomala*, *Microsporium gypseum*, *Microsporium canis*, *Trichophyton mentagrophytes*, *Trichophyton rubrum*) показало високу активність об'єкта дослідження проти більшості патогенів. Була встановлена МІК (мінімально інгібуюча концентрація) ефірної олії ялівцю щодо грампозитивних і грамнегативних бактерій у концентрації 8-70 % (v/v), до дріжджових грибів у концентрації 0,78-2 % (v/v) та до дерматофітів в концентрації 0,39-10 % (v/v) [42].

Експерименти з вивчення загальних протимікробних властивостей ефірних дистилатів ялівцю проводилися Rossi та співавторами на модельних мікроорганізмах *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Enterobacter aerogenes* й *Pseudomonas aeruginosa* у порівнянні з антибіотиками. Результати роботи демонстрували, що в концентрації 2 % (v/v) ефірна олія ялівцю лише трохи поступалася ципрофлоксацину й пеніциліну [44].

Багатоетапне дослідження сербських учених, що стосувалося вивчення загальних протимікробних і протигрибкових властивостей ефірної олії ялівцю та її різних компонентів, показало високу чутливість поширених патогенів до експериментальних об'єктів. Дослідження антибактеріальної активності проводилося на модельних мікроорганізмах *Bacillus cereus*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Corynebacterium sp.*, *Pseudomonas aeruginosa* й *Staphylococcus aureus*. Зона інгібування росту патогенів у вилученій з ефірної олії фракції  $\alpha$ -пінену в кількості 8,75 мкг на диск переважала аналогічні показники активності антибіотиків гентаміцину (30 мкг/диск), кліндаміцину (10 мкг/диск), стрептоміцину (30 мкг/диск), тетрацикліну (30 мкг/диск), еритроміцину (15 мкг/диск), ванкоміцину (30 мкг/диск), ампіциліну (10 мкг/диск), пеніциліну G (6 мкг/диск). В рамках цієї роботи, головним результатом дослідження було виявлення в суміші фракцій ефірної олії ялівцю потужних протигрибкових властивостей до небезпечних рослинних патогенів *Alternaria sp.*, *Aspergillus nidulans* й *Aspergillus niger*. Найактивніша комбінація терпенів – 5,52 мкг  $\alpha$ -пінену й 3,23 мкг сабінену на диск призводила до проявлення значущої зони інгібування росту патогенів в 14-20 мм [45].

Головним дослідженням, яке остаточно підтверджує доцільність використання екстрактів із лікарсько-рослинної сировини ялівцю в сільському господарстві, був великий експеримент польських учених із вивчення впливу ефірної олії *Juniperus communis* на основні хвороби аграрних культур і розгляд ймовірності її практичного використання для лікування насіння та його профілактики під час зберігання. Як мікробіологічні об'єкти були використані *Cylindrocarpon destructans*, *Epicoccum purpurascens*, *Rhizoctonia solani*, *Trichoderma hamatum*, *Verticillium dahliae*, *Acremonium sp.*, *Alternaria spp.*, *Aspergillus spp.*, *Botryosphaeria spp.*, *Botrytis cinerea*, *Chaetomium sp.*, *Cladosporium sp.*, *Fusarium avenaceum*, *Fusarium culmorum*, *Fusarium equiseti*, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani*, *Fusarium spp.*, *Mucor spp.*, *Penicillium spp.*, *Phoma sp.*, *Pythium spp.*, *Rhizopus spp.*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Trichoderma sp.* й *Trichothecium sp.* Результати дослідження показують, що ефірна олія ялівцю в кількості 1 мл/л при тестуванні на ізольованих з хворого насіння патогенах максимально зменшувала кількість колоній патогенів на 93,1 % і максимально знижувала спороутворення на 90,4 % [46].

Звіробій звичайний (*Huregicum perforatum*) – багаторічна трав'яниста рослина родини звіробійні (Нурегісасеае). Ця лугова рослина поширена на території Євразії, в Україні – це одна з найбільш використовуваних лікарських рослин. Іноді звіробій використовують у харчовій промисловості, що вказує на умовну нешкідливість цієї рослини. Як лікарсько-рослинну сировину використовують висушену й подрібнену траву звіробою, у такому ж вигляді використовують у складі комплексних рослинних зборів [47].

До хімічного складу трави звіробою входять різні біологічно активні сполуки, які чинять протимікробну і протигрибкову дію, серед яких: 0,2-4% дериватів флороглюцинолу (адегіперфорін, фураногіперфорін), 0,06%-04% нафтодіантронів (гіперіцин, про-



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

тогіперин), 2-4% флавоноїдів та їх глікозидів (кверцитин, рутин), а також присутні проціанідіни, ксантони й фенольні кислоти [47]. Крім того, із ЛРС звіробою можна отримати ефірну олію (0,1-0,25 %), яка переважно складається з  $\alpha$ -пінену (10,6-67 %) й 2-метилоктану (16 %) [48].

Ступінь загальної протимікробної активності екстрактів звіробою досліджували Gibbons та співавтори й оцінювали на мультирезистентному до більшості антибіотиків штамі *Staphylococcus aureus*. Екстракт показав вражаючий результат пригнічення росту патогену й мав мінімальну інгібуючу концентрацію на рівні 64 мкг/мл [49].

Дуже важливою властивістю екстрактів звіробою є те, що вони пригнічують формування біоплівки і щільних великих колоній мікроорганізмів. Так, у дослідженні Simonetti було показано, що спиртовий екстракт *Hypericum perforatum* в дозі 32 і 16 мкг/мл активно руйнував біоплівки *Streptococcus mutans*, *Streptococcus sobrinus*, *Lactobacillus plantarum*, й *Enterococcus faecalis*, при МІК (мінімально інгібуюча концентрація) 8 мкг/мл для звичайних колоній мікроорганізмів [50].

До того ж екстракти звіробою здатні руйнувати високоорганізовані формування грибів, які притаманні більшості збудників хвороб баклажанів. У дослідженнях *in vitro* на прикладі *Malassezia furfur* було встановлено, що метанольний екстракт *Hypericum perforatum* у концентрації 16 мкг/мл зменшував плівкоутворення патогену на 39 %, й у висновках експерименту автори рекомендували застосування екстрактів звіробою проти агресивних форм грибів [51].

Потужні загальні протигрибкові властивості екстрактів звіробою і його фітохімічних компонентів були детально вивчені в декількох дослідженнях на патогенах *Microsporum canis*, *Trichophyton rubrum*, *Fusarium oxysporum*, *Exophiala dermatitidis*, *Candida albicans*, *Kluyveromyces marxianus*, *Pichia fermentans*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus glaucus* й *Phialophora fastigiata*. Усі автори стверджують про високу загальну протигрибкову активність екстрактів у діапазоні концентрацій до 750 мкг/мл [52, 53].

Ґрунтуючись на тому факті, що хвороба і псування плодів баклажана може бути викликана безліччю різних первинних і вторинних мікроорганізмів, то розробка та впровадження в сільськогосподарську практику нового рослинного засобу на основі екстракту кори й/або листя дуба, ягід ялівцю і трави звіробою для контролю за мікробіологічним профілем овочів під час зберігання може стати перспективною розробкою для аграрного сектору. Оскільки важливою характеристикою безпеки речовин, що контактують безпосередньо з продуктами харчування, є висока водорозчинність і мінімальна токсичність, для застосування в розробці технології засобу рекомендовані водні та водно-спирто-гліцеринові екстракти даних видів рослинної сировини. Слід вказати, що хоча більшість авторів рекомендують використання ефірної олії ялівцю, ми наполягаємо на тому, що застосування ефірної олії в харчовій промисловості не є обґрунтованим. Нерозчинені ефірні олії є високоалергенними речовинами й можуть специфічно впливати на органи та системи споживача, у деяких випадках навіть вчинити шкоду здоров'ю. Крім того, ефірні олії можуть створити різкий стійкий аромат і специфічний присмак на шкірці баклажанів.

Проаналізувавши мінімальні та ефективні інгібуючі концентрації екстрактів та ефірних олій запропонованої рослинної сировини, а також розбіг вмісту біологічно активних речовин в сировині, можна зробити висновок, що оптимальний вміст екстрактів ялівцю може бути трохи меншим, ніж інших компонентів, а для визначення кількісного вмісту екстрактів дуба і звіробою треба враховувати велику кількість параметрів стандартизації їхньої лікарсько-рослинної сировини, що може вплинути на біологічну активність.

**Висновки відповідно до статті.** Аналіз літератури показав, що композиція з екстрактів дуба звичайного (*Quercus robur*), ялівцю звичайного (*Juniperus communis*) та

звіробією звичайного (*Hypericum perforatum*) може стати ефективним універсальним засобом для захисту під час збереження, що покриває увесь спектр поширених хвороб плодів баклажанів. Оскільки важливою характеристикою безпеки речовин, що контактують безпосередньо з продуктами харчування є висока водорозчинність і мінімальна токсичність, для застосування рекомендовані водні та водно-спирто-гліцеринові екстракти рослинної сировини. Подальші мікробіологічні та токсикологічні дослідження тест зразків нададуть можливість встановлення робочих концентрацій ефективних композицій для обробки плодів баклажанів при збереженні.

### Список використаних джерел

1. Мироничева О. С. Обґрунтування використання антиоксидантних препаратів для тривалого зберігання плодів яблуни: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: спец.: 05.18.03 «Первинна обробка та зберігання продуктів рослинництва» / ТДАУ. Мелітополь, 2003. 20 с.
2. Гапріндашвілі Н. А. Обґрунтування використання нових антиоксидантних препаратів природного походження для тривалого зберігання плодів груш: автореф. дис. ... канд. с.-г. наук: спец.: 06.01.15 «Первинна обробка продуктів рослинництва» / ТДАУ. Мелітополь, 2011. 23 с.
3. Жукова В. Ф. Обґрунтування використання нових антиоксидантних композицій для зберігання плодів томату: дис. ... канд. с.-г. наук: 06.01.15 / ТДАУ. Мелітополь, 2011. 250 с.
4. Безменнікова В. М. Обґрунтування використання нових антиоксидантних препаратів для зберігання плодів абрикоса: дис. ... канд. с.-г. наук: 06.01.15 / ТДАУ. Мелітополь, 2009. 290 с.
5. Герасимчук О. П. Збереження якості плодів чорної смородини з післязбиральною обробкою речовинами антимікробної дії та в продуктах переробки: дис. ... канд. с.-г. наук: 06.01.15 / ТДАУ. Мелітополь, 2009. 379 с.
6. Демченко С. В. Влияние химических консервантов на биохимические изменения в сочном растительном сырье при хранении: дис. ... канд. техн. наук: спец. 03.00.04 «Технология продовольственных продуктов» / КГТУ. Краснодар, 2002. 153 с.
7. Дятлов В. В. Наукові основи обробки та зберігання плодовоовочевої продукції із застосуванням плівкоутворюючих композицій: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: спец. 05.18.03 «Первинна обробка та зберігання продуктів рослинництва» / ХНТУ. Херсон, 2005. 38 с.
8. Медведкова І. І. Якість і збереженість свіжих тепличних томатів із застосуванням обробки плівкоутворювальною композицією: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.18.15 «Товарознавство харчових продуктів» / ДонНУЕТ. Донецьк, 2007. 22 с.
9. Наумова Г. М. Совершенствование технологии хранения лукович чеснока с применением защитных покрытий: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.18.01 «технология обработки, хранения и переработки злаковых, бобовых культур, крупяных продуктов, плодоовощной продукции и виноградарства» / КГАУ. Краснодар, 2004. 141 с.
10. Коротышева Л. Б. Влияние полимерного покрытия на качество плодов яблони при хранении: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.15 «Товароведение пищевых продуктов и технология общественного питания» / ЛГУ. Ленинград, 1984. 147 с.
11. Паронян, В. Х., Кюрегян Г. П., Комаров Н. В. Прогресивні способи обробки плодовоовочевої продукції перед закладкою на зберігання. *Зберігання та переробка сільськогосподарської сировини*. 2003. № 7. С. 23-25.
12. Неменушья Л. А., Степанищева Н. М., Соломатин Д. М. Современные технологии хранения и переработки плодоовощной продукции. Москва: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. 172 с.
13. Ozturk I., Tornuk F., Caliskan-Aydogan O., Zeki Durak M., Sagdic O. Decontamination of iceberg lettuce by some plant hydrosols. *LWT*. December 2016. Vol. 74. P. 48-54. URL: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.067>.
14. Pane C., Fratianni F., Parisi M., Nazzaro F., Zaccardelli M. Control of *Alternaria* post-harvest infections on cherry tomato fruits by wild pepper phenolic-rich extracts. *Crop Protection*. June 2016. Vol. 84. P. 81-87. URL: <https://DOI:10.1016/j.cropro.2016.02.015>.
15. Božik M., Nový P., Klouček P. Susceptibility of Postharvest Pathogens to Essential Oils. *Scientia Agriculturae Bohemica*. 2017. Is. 48. P. 103-111. DOI: 10.1515/sab-2017-0017.
16. Takam G. H. F., Tatsinkou F. B., Mbah J. A., Bate P. N. N., Ngemenya M. N. Morphological and PCR characterisation of fungi isolated from tomato postharvest, and potential control of fruit spoilage by

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

antifungal plant extracts. *International Food Research Journal*. 2019. № 26(1). P. 123-131. URL: [https://www.researchgate.net/publication/331384873\\_Morphological\\_and\\_PCR\\_characterisation\\_of\\_fungi\\_isolated\\_from\\_tomato\\_postharvest\\_and\\_potential\\_control\\_of\\_fruit\\_spoilage\\_by\\_antifungal\\_plant\\_extract](https://www.researchgate.net/publication/331384873_Morphological_and_PCR_characterisation_of_fungi_isolated_from_tomato_postharvest_and_potential_control_of_fruit_spoilage_by_antifungal_plant_extract).

17. Egamberdieva D., Wirth S., Behrendt U., Ahmad P., Berg G. Antimicrobial Activity of Medicinal Plants Correlates with the Proportion of Antagonistic Endophytes. *Front. Microbiol.* 2017. № 8. P. 199. URL: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00199>.

18. Antibacterial activity of tannins isolated from *Sapium baccatum* extract and use for control of tomato bacterial wilt / Vu T. T., Kim H., Tran V. K., Vu H. D., Hoang T. H., & Han J. W. *PLOS ONE*. 2017. № 12 (7). URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181499>.

19. Ibrahim F. A. A., Al-Ebady N. Evaluation of Antifungal Activity of Some Plant Extracts and their Applicability in Extending the Shelf Life of Stored Tomato Fruits. *Journal of Food Processing & Technology*. 2014. Vol. 5, Is. 6. P. 340-346. URL: <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000340>.

20. Sang-Jo Kwon, Yoonjee Chang, Jaejoon Han. Oregano essential oil-based natural antimicrobial packaging film to inactivate *Salmonella enterica* and yeasts/molds in the atmosphere surrounding cherry tomatoes. *Food Microbiology*. August 2017. Vol. 65. P. 114-121. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.02.004>.

21. Bibhuti B. Mishra, Gautam S., Sharma A. Browning of fresh-cut eggplant: Impact of cutting and storage. *Postharvest Biology and Technology*. May 2012. Vol. 67. P. 44-51. URL: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.12.009>.

22. Concellón A., Añón M. C., Chaves A. R. Effect of low temperature storage on physical and physiological characteristics of eggplant fruit (*Solanum melongena* L.). *LWT*. 2007. Vol. 40, no. 3. P. 389-396. URL: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.02.004>.

23. Gajewski M., Katarzyna K., Bajer M. The Influence of Postharvest Storage on Quality Characteristics of Fruit of Eggplant Cultivars. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2009. № 37 (2). P. 200-205. URL: <https://doi.org/10.15835/nbha3723184>.

24. Sun W., Wang D., Wu Zh., Zhi J. Seasonal change of fruit setting in eggplants (*Solanum melongena* L.) caused by different climatic conditions. *Scientia Horticulturae*. October 1990. Vol. 44, Is. 1-2. P. 55-59. URL: [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(90\)90016-8](https://doi.org/10.1016/0304-4238(90)90016-8).

25. Jha S. N. Matsuoka T. Development of Freshness Index of Eggplant. *Applied Engineering in Agriculture*. 2002. Vol. 18, Is. 5. P. 555-558. URL: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201400097236>.

26. Cortbaoui P. Postharvest quality management of cucumber and eggplant: thesis for PhD / Department of Bioresource Engineering McGill University. Montreal, 2015. 135 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/281624942\\_POSTHARVEST\\_QUALITY\\_MANAGEMENT\\_OF\\_CUCUMBER\\_AND\\_EGGPLANT](https://www.researchgate.net/publication/281624942_POSTHARVEST_QUALITY_MANAGEMENT_OF_CUCUMBER_AND_EGGPLANT).

27. Temkin-Gorodeiski N., Shapiro B., Rosenberger I., Fallik E. Post harvest treatments to control eggplant deterioration during storage. *Journal of Horticultural Science*. 1993. № 68(5). P. 689-693. URL: <https://doi.org/10.1080/00221589.1993.11516401>.

28. Salunkhe D. K., Kadam S. S. *Handbook of Vegetable Science and Technology. Production, Compostion, Storage, and Processing*. Boca Raton: CRC Press, 1998. 742 p. URL: <https://doi.org/10.1201/9781482269871>.

29. Lloyd Ryall A., Werner J. Lipton. Handling, Transportation and Storage of Fruits And Vegetables. Vol. 1. Vegetables And Melons. Medtech; 2014 edition (September 11, 2013). 587 p. URL: <https://www.amazon.com/Handling-Transportation-Storage-Fruits-Vegetables/dp/9381714622>.

30. Dimitrios I. Tsitsigiannis, Polymnia P. Antoniou, Sotirios E. Tjamos, Epaminondas J. Paplomatas. Major Diseases of Tomato, Pepper and Eggplant in Greenhouses. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology*. 2008. № 2 (Special Issue 1). P. 106-124. URL: [http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOOnline/images/0812/EJPSB\\_2\(SI1\)/EJPSB\\_2\(SI1\)106-124o.pdf](http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOOnline/images/0812/EJPSB_2(SI1)/EJPSB_2(SI1)106-124o.pdf).

31. Bajaj K. L., Mahajan R. Effects of nematicides on the chemical composition of the fruits of egg-plant (*Solanum melongena* L.). *Plant Foods for Human Nutrition*. March 1980. Vol. 30, Is. 1. P. 69-72. URL: <https://doi.org/10.1007/BF01112106>.

32. Arramon G., Saucier C., Colombani D., Glories Y. Identification of triterpene saponins in *Quercus robur* L. and *Q. petraea* Liebl. heartwood by LC-ESI/MS and NMR. *Phytochemical Analysis*. 2002. № 13(6). P. 305-310. URL: <https://doi.org/10.1002/pca.658>.

33. Zhang Bo, Jian Cai, Chang-Qing Duan, Malcolm J. Reeves, Fei He. A Review of Polyphenolics in Oak Woods. *International Journal of Molecular Sciences*. 2015. № 16(4). P. 6978–7014. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4425000/?report=classic>.

34. Uddin G., Rauf A. Phytochemical Screening, Antimicrobial and Antioxidant Activities of Aerial Parts of *Quercus robur* L. *Middle-East Journal of Medicinal Plants Research*. 2012. № 1(1). P. 01-04. URL: <https://DOI:10.5829/idosi.mejmpr.2011.1.1.1101>.

35. Ernest R. Mbega, Carmen N. Mortensen, Robert B. Mabagala, Ednar G. Wulff. The effect of plant extracts as seed treatments to control bacterial leaf spot of tomato in Tanzania. *J Gen Plant Pathol*. 2012. № 78(4). P. 277-286. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/81894712.pdf>.

36. Fire Blight: The Disease and its Causative Agent, *Erwinia amylovora* / Ed. J. Vanneste. *Australasian Plant Pathology*. March 2001, Vol. 30, Is. 1. P. 77–78. URL: [https://www.researchgate.net/publication/240508283\\_Fire\\_Blight\\_The\\_Disease\\_and\\_its\\_Causative\\_Agent\\_Erwinia\\_amylovoraEd\\_J\\_Vanneste](https://www.researchgate.net/publication/240508283_Fire_Blight_The_Disease_and_its_Causative_Agent_Erwinia_amylovoraEd_J_Vanneste).

37. Kolodziej H., Kayser O., Latte K. P., Kiderlen A. F. Enhancement of Antimicrobial Activity of Tannins and Related Compounds by Immune Modulatory Effects. *Plant Polyphenols 2*. 1999. P. 575-594. Part of the Basic Life Sciences book series. URL: [https://www.researchgate.net/profile/Herbert\\_Kolodziej2/publication/Effects.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Herbert_Kolodziej2/publication/Effects.pdf).

38. Klaus Peter Latté, Herbert Kolodziej. Antifungal Effects of Hydrolysable Tannins and Related Compounds on Dermatophytes, Mould Fungi and Yeasts. *Biosciences*. 2000. Vol. 55, Is. 5-6. P. 467-472. DOI: <https://doi.org/10.1515/znc-2000-5-625>.

39. Stompor-Chrzan E. Antifungal activity of leaf and bark extracts on the growth and development of damping-off fungi and their practical utilisation in protection of seedlings. *Second European Allelopathy Symposium "Allelopathy – from understanding to application"*. 2004. P. 152. URL: <http://seas.iung.pulawy.pl/pdf/str152.pdf>.

40. Juniper - pseudofruit juniper. *E/S/C/O/P monographs : the scientific foundation for herbal medicinal products*. Stuttgart: Thieme, 2003. P. 282-285. URL: <https://www.worldcat.org/title/escop-monographs-the-scientific-foundation-for-herbal-medicinal-products/oclc/879135235>.

41. Barnes J., Linda A. Anderson, Phillipson J. D. *Herbal Medicines*. 3rd Edition. London: Pharmaceutical Press, 2007. 720 p.

42. Pepeljnjak S., Kosalets I., Kalodera Z., Blazevych N. Antimicrobial activity of juniper berry essential oil (*Juniperus communis* L., Cupressaceae). *Acta Pharm*. 2006. № 55 (4). P. 417-422. URL: <https://hrcak.srce.hr/file/29715>.

43. Paul-Georges Rossi, Liliane Berti, Jean Panighi, Anne Luciani, Jacques Maury, Alain Muselli, Dominique de Rocca Serra, Marcelle Gonny, Jean-Michel Bolla. Antibacterial Action of Essential Oils from Corsica. *Journal of Essential Oil Research*. 2007. Vol. 19, Is. 2. P. 176-182. URL: <https://doi.org/10.1080/10412905.2007.9699254>.

44. Glisic S. B., Milojevic S. Z., Dimitrijevic-Brankovic S. I., Orlovic A.M. & Skala D. U. Antimicrobial activity of the essential oil and different fractions of *Juniperus communis* L. and a comparison with some commercial antibiotics. *Journal of the Serbian Chemical Society*. 2007. № 72(4). P. 311-320. URL: <https://DOI:10.2298/JSC0704311G>.

45. Глень-Карольчик К., Болиглова Є. Фунгіцидна активність ефірної олії ялівцю (*Juniperus communis* L.) проти грибків, що вражають проростки хрону. *Журнал досліджень і впровадження в аграрному інжинірингу*. 2016. № 61(3). С. 119-125.

46. Бредлі П. Британський трав'яний збірник. Довідник наукової інформації про широко використовуваних рослинних препаратах / Британська асоціація фітотерапії. Борнмут, 2006. Т. 2. С. 406. URL: <https://bhma.info/index.php/product/british-herbal-compendium-volume-2>.

47. Hänsel R., Sticher O. *Pharmakognosie – Phytopharmazie*. Walshtedt, Germany, 2007. 1561 p. URL: <https://epdf.pub/queue/pharmakognosie-phytopharmazie-8-auflage.html>.

48. Gibbons S., Ohlendorf B., Johnsen I. The genus *Hypericum*—a valuable resource of anti-Staphylococcal leads. *Fitoterapia*. July 2002. Vol. 73, Is. 4. P. 300-304. URL: [https://doi.org/10.1016/S0367-326X\(02\)00082-5](https://doi.org/10.1016/S0367-326X(02)00082-5).

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

49. Süntar I., Oyardı O., Esra Küpeli Akkol, Özçelik B. Antimicrobial effect of the extracts from *Hypericum perforatum* against oral bacteria and biofilm formation. *Pharmaceutical Biology*. 2016. Vol. 54, Is. 6. P. 1065-1070. URL: <https://doi.org/10.3109/13880209.2015.1102948>.

50. Simonetti G., Tocci N., Valletta A., Brasili E., Felicia Diodata D'Auria, Idoux A., Pasqua G. In vitro antifungal activity of extracts obtained from *Hypericum perforatum* adventitious roots cultured in a mist bioreactor against planktonic cells and biofilm of *Malassezia furfur*. *Natural Product Research. Formerly Natural Product Letters*. 2016. Vol. 30, Is. 5. P. 544-550. URL: <https://doi:10.1080/14786419.2015.1028059>.

51. Gadzovska-Simic S., Tusevski O., Antevski S., Atanasova-Pancevska N., Petreska J., Stefova M., Kungulovski D., Spasenovski M. Secondary metabolite production in *Hypericum perforatum* L. cell suspensions upon elicitation with fungal mycelia from *Aspergillus flavus*. *Archives of Biological Sciences*. 2012. Vol. 64, No 1. P. 113-121. URL: <https://DOI:10.2298 ABS1201113G>.

52. Maskovic P., Mladenović J., Cvijović M., Aćamović-Đoković G., Solučić S., Radojković M. Phenolic content, antioxidant and antifungal activities of acetic, ethanolic and petroleum ether extracts of *Hypericum perforatum* L. *Hemijska industrija*. 2011. № 65 (2). P. 159-164.

53. Sytar O., Švedienė J., Ložienė K., Paškevičius A., Kosyan A., Taran N. Antifungal properties of hypericin, hypericin tetrasulphonic acid and fagopyrin on pathogenic fungi and spoilage yeasts. *Pharmaceutical Biology*. 2016. Vol. 54, Is. 12. P. 3121-3125. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13880209.2016.1211716>.

### References

1. Myronycheva, O. S. (2003). *Obgruntuvannia vykorystannia antyoksydantnykh preparativ dlia tryvaloho zberihannia fruktiv yabluni [Justification of the use of antioxidant drugs for prolonged storage of apple fruit]*. (Candidate's thesis). TDAU, Melitopol [in Ukrainian].

2. Hapriindashvili, N. A. (2011). *Obgruntuvannia vykorystannia novykh antyoksydantnykh preparativ pryrodnoho pokhodzhennia dlia tryvaloho zberihannia plodiv hrush [Grounds for the use of new antioxidant drugs of natural origin for the long-term storage of fruit pears]*. (Candidate's thesis). TDAU, Melitopol [in Ukrainian].

3. Zhukova, V. F. (2011). *Obgruntuvannia vykorystannia novykh antyoksydantnykh kompozytsiy dlia zberihannia plodiv tomatu [Justification of the use of new antioxidant compositions for the storage of tomatoes]*. (Candidate's thesis). TDAU, Melitopol [in Ukrainian].

4. Bezmennikova, V. M. (2009). *Obgruntuvannia vikoristannia novykh antioksidantnykh preparatov dlia zberigannia plodiv abrikosa [The rationale for using new antioxidant drugs to store apricot fruits]*. (Candidate's thesis). TDAU, Melitopol [in Ukrainian].

5. Herasymchuk, O. P. (2009). *Zberezhennia yakosti plodiv chornoj smorodyny z pisliazybralnoiu obrobkoiu rehovynamy antimikrobnoi dii ta v produktakh pererobky [Preserving the quality of the fruits of black currant with post-harvest treatment with substances of antimicrobial action and in products of processing]*. (Candidate's thesis). TDAU, Melitopol [in Ukrainian].

6. Demchenko, S. V. (2002). *Vliianie khimicheskikh konservantov na biokhimicheskie izmeneniia v sochnom rastitel'nom syre pri khraneni [Influence of chemical preservatives on biochemical changes in juicy plant material during storage]*. (Candidate's thesis). KDTU, Krasnodar [in Russian].

7. Diatlov V. V. (2005). *Naukovi osnovy obrobky ta zberihannia plodovoochevoi produktsii iz zastovuvanniam plivkoutvoriuvnykh kompozytsii [Scientific bases of processing and storage of fruit-flour products with the use of film-forming compositions]*. (Doctor's thesis). KhNTU, Herson [in Ukrainian].

8. Medvedkova, I. I. (2007). *Yakist i zberezhennist svizhykh teplychnykh tomativ iz zastovuvanniam obrobky plivkoutvoryval'noyu kompozytsiyeyu [Quality and preservation of fresh greenhouse tomatoes with the use of processing film-forming composition]*. (Candidate's thesis). DonNUET, Donetsk [in Ukrainian].

9. Naumova, H. M. (2004). *Sovershenstvovanie tekhnologii khraneniia lukovyts chesnoka s primeneniem zashchytnykh pokrytii [Improvement of technology of storage of garlic bulbs with application of protective coatings]*. (Candidate's thesis). KGAU, Krasnodar [in Russian].

10. Korotysheva, L. B. (1984). *Vliianie polimernogo pokrytiia na kachestvo plodov iablony pri khraneni [The influence of the polymer coating on the quality of apple fruit during storage]*. (Candidate's thesis). LGU, Leningrad [in Russian].

11. Paronyan, V. Kh., Kyurehyan, H. P. & Komarov, N. V. (2003). Prohresyvnii sposoby obrobky plodoovochevoyi produktsiyi pered zakladkoyu na zberihannya [Progressive methods of processing of products of fruit and vegetables before laying on storage]. *Zberihannia ta pererobka silskohospodarskoi syrovyny – Storage and processing of agricultural raw materials*, 7, 23-25 [in Ukrainian].
12. Nemenushchaia, L. A., Stepanishcheva, N. M., Solomatin, D. M. (2009). Sovremennye tekhnologii khraneniia i pererabotki plodoovoshchnoi produktsii [Modern technologies of storage and processing of fruit and vegetable products]. Moscow: FHNU «Rosinformahrotekh» [in Russia].
13. Ozturk I., Tornuk F., Caliskan-Aydogan O., Zeki Durak M., Sagdic O. (December 2016). Decontamination of iceberg lettuce by some plant hydrosols. *LWT*, 74, 48-54. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.067>.
14. Pane, C., Fratianni, F., Parisi, M., Nazzaro, F., Zaccardelli, M. (June 2016). Control of *Alternaria* post-harvest infections on cherry tomato fruits by wild pepper phenolic-rich extracts. *Crop Protection*, 84, 81-87. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.02.015>.
15. Božik, M., Nový, P., Klouček, P. (2017): Susceptibility of Postharvest Pathogens to Essential Oils. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 48, 103-111. DOI: 10.1515/ca6-2017-0017.
16. Takam, G. H. F., Tatsinkou, F. B., Mbah, J. A., Bate, P. N. N., Ngemenya, M. N. (2019). Morphological and PCR characterisation of fungi isolated from tomato postharvest, and potential control of fruit spoilage by antifungal plant extracts. *International Food Research Journal*, 26(1), 123-131. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/331384873\\_Morphological\\_and\\_PCR\\_characterisation\\_of\\_fungi\\_isolated\\_from\\_tomato\\_postharvest\\_and\\_potential\\_control\\_of\\_fruit\\_spoilage\\_by\\_antifungal\\_plant\\_extract](https://www.researchgate.net/publication/331384873_Morphological_and_PCR_characterisation_of_fungi_isolated_from_tomato_postharvest_and_potential_control_of_fruit_spoilage_by_antifungal_plant_extract).
17. Egamberdieva, D., Wirth, S., Behrendt, U., Ahmad, P., Berg, G. (2017). Antimicrobial Activity of Medicinal Plants Correlates with the Proportion of Antagonistic Endophytes. *Front. Microbiol.*, 8, 199. Retrieved from <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00199>.
18. Vu, T. T., Kim, H., Tran, V. K., Vu, H. D., Hoang, T. H., & Han, J. W. (2017). Antibacterial activity of tannins isolated from *Sapium baccatum* extract and use for control of tomato bacterial wilt. *PLOS ONE*, 12 (7). Retrieved from <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181499>.
19. Ibrahim, F. A. A., Al-Ebady, N. (2014). Evaluation of Antifungal Activity of Some Plant Extracts and their Applicability in Extending the Shelf Life of Stored Tomato Fruits. *Journal of Food Processing & Technology*, 5 (6), 340-346. Retrieved from <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000340>.
20. Sang-Jo, Kwon, Yoonjee, Chang, Jaejoon, Han (August 2017). Oregano essential oil-based natural antimicrobial packaging film to inactivate *Salmonella enterica* and yeasts/molds in the atmosphere surrounding cherry tomatoes. *Food Microbiology*, 65, 114-121. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.02.004>.
21. Bibhuti B. Mishra, Gautam, S., Sharma, A. (May 2012). Browning of fresh-cut eggplant: Impact of cutting and storage. *Postharvest Biology and Technology*, 67, 44-51. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.12.009>.
22. Concellón, A., Añón, M. C., Chaves, A. R. (2007). Effect of low temperature storage on physical and physiological characteristics of eggplant fruit (*Solanum melongena* L.). *LWT*, 40 (3), 389–396. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.02.004>.
23. Gajewski, M., Katarzyna, K., & Bajer, M. (2009). The Influence of Postharvest Storage on Quality Characteristics of Fruit of Eggplant Cultivars. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 37(2), 200-205. Retrieved from <https://doi.org/10.15835/nbha3723184>.
24. Sun, W., Wang, D., Wu, Zh., Zhi, J. (October 1990). Seasonal change of fruit setting in eggplants (*Solanum melongena* L.) caused by different climatic conditions. *Scientia Horticulturae*, 44 (1–2), 55-59. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(90\)90016-8](https://doi.org/10.1016/0304-4238(90)90016-8).
25. Jha, S. N., Matsuoka, T. (2002). Development of Freshness Index of Eggplant. *Applied Engineering in Agriculture*, 18 (5), 555-558. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201400097236>.
26. Cortbaoui, P. (2015). Postharvest quality management of cucumber and eggplant (PhD thesis). / Department of Bioresource Engineering McGill University, Montreal. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/281624942\\_POSTHARVEST\\_QUALITY\\_MANAGEMENT\\_OF\\_CUCUMBER\\_AND\\_EGGPLANT](https://www.researchgate.net/publication/281624942_POSTHARVEST_QUALITY_MANAGEMENT_OF_CUCUMBER_AND_EGGPLANT).

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

27. Temkin-Gorodeiski, N., Shapiro, B., Rosenberger, I., Fallik, E. (1993). Post harvest treatments to control eggplant deterioration during storage. *Journal of Horticultural Science*, 68(5), 689-693. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/00221589.1993.11516401>.

28. Salunkhe, D. K., Kadam, S. S. (1998). *Handbook of Vegetable Science and Technology. Production, Compostion, Storage, and Processing*. Boca Raton: CRC Press. Retrieved from <https://doi.org/10.1201/9781482269871>.

29. Lloyd Ryall A., Werner J. Lipton (2014). Handling, Transportation and Storage of Fruits And Vegetables. Vol. 1. Vegetables And Melons. Medtech. (September 11, 2013). Retrieved from <https://www.amazon.com/ Handling-Transportation-Storage-Fruits-Vegetables/dp/9381714622>.

30. Dimitrios I. Tsitsigiannis, Polymnia P. Antoniou, Sotirios E. Tjamos, Epaminondas J. (2008). Paplomatas. Major Diseases of Tomato, Pepper and Eggplant in Greenhouses. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology*, 2 (Special Issue 1), 106-124. Retrieved from [http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/0812/EJPSB\\_2\(S11\)/EJPSB\\_2\(S11\)106-124o.pdf](http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOnline/images/0812/EJPSB_2(S11)/EJPSB_2(S11)106-124o.pdf).

31. Bajaj, K. L., Mahajan, R. (March 1980). Effects of nematicides on the chemical composition of the fruits of egg-plant (*Solanum melongena* L.). *Plant Foods for Human Nutrition*, 30 (1), 69-72. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/BF01112106>.

32. Arramon, G., Saucier, C., Colombani, D., Glories, Y. (2002). Identification of triterpene saponins in *Quercus robur* L. and *Q. petraea* Liebl. heartwood by LC-ESI/MS and NMR. *Phytochemical Analysis*, 13(6), 305-310. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/pca.658>.

33. Zhang Bo, Jian Cai, Chang-Qing Duan, Malcolm J. Reeves, Fei He. (2015). A Review of Polyphenolics in Oak Woods. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(4), 6978–7014. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4425000/?report=classic>.

34. Uddin, G., Rauf, A. (2012). Phytochemical Screening, Antimicrobial and Antioxidant Activities of Aerial Parts of *Quercus robur* L. *Middle-East Journal of Medicinal Plants Research*, 1(1), 01-04. Retrieved from <https://DOI:10.5829/idosi.mejmpr.2011.1.1.1101>.

35. Ernest R. Mbega, Carmen N. Mortensen, Robert B. Mabagala, Ednar G. Wulff (2012). The effect of plant extracts as seed treatments to control bacterial leaf spot of tomato in Tanzania. *J Gen Plant Pathol*, 78(4), 277-286. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/81894712.pdf>.

36. Vanneste, J. (Ed.) (March 2001). Fire Blight: The Disease and its Causative Agent, *Erwinia amylovora* /. *Australasian Plant Pathology*, 30 (1), 77–78. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/240508283\\_Fire\\_Blight\\_The\\_Disease\\_and\\_its\\_Causative\\_Agent\\_Erwinia\\_amylovora\\_Ed\\_J\\_Vanneste](https://www.researchgate.net/publication/240508283_Fire_Blight_The_Disease_and_its_Causative_Agent_Erwinia_amylovora_Ed_J_Vanneste).

37. Kolodziej, H., Kayser, O., Latte, K. P., Kiderlen, A. F. (1999). Enhancement of Antimicrobial Activity of Tannins and Related Compounds by Immune Modulatory Effects. *Plant Polyphenols 2* (pp. 575-594). Part of the Basic Life Sciences book series. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Herbert\\_Kolodziej2/publication/Effects.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Herbert_Kolodziej2/publication/Effects.pdf).

38. Klaus Peter Latté, Herbert Kolodziej (2000). Antifungal Effects of Hydrolysable Tannins and Related Compounds on Dermatophytes, Mould Fungi and Yeasts. *Biosciences*, 55(5-6), 467-472. DOI: <https://doi.org/10.1515/znc-2000-5-625>.

39. Stompor-Chrzan, E. (2004). Antifungal activity of leaf and bark extracts on the growth and development of damping-off fungi and their practical utilisation in protection of seedlings. *Second European Allelopathy Symposium "Allelopathy – from understanding to application"*(pp. 152). Retrieved from <http://seas.iung.pulawy.pl/pdf/str152.pdf>.

40. Juniper - pseudofruit juniper (2003). *E/S/C/O/P monographs : the scientific foundation for herbal medicinal products* (pp. 282-285). Stuttgart: Thieme. Retrieved from <https://www.worldcat.org/title/escop-monographs-the-scientific-foundation-for-herbal-medicinal-products/oclc/879135235>.

41. Barnes, J., Linda A. Anderson, Phillipson, J. D. (2007). *Herbal Medicines*. (3rd Ed.). London: Pharmaceutical Press.

42. Pepeljnjak, S., Kosalets, I., Kalodera, Z., Blazevych, N. (2006). Antimicrobial activity of juniper berry essential oil (*Juniperus communis* L., Cupressaceae). *Acta Pharm*, 55 (4), 417-422. Retrieved from <https://hrcak.srce.hr/file/29715>.

43. Paul-Georges Rossi, Liliane Berti, Jean Panighi, Anne Luciani, Jacques Maury, Alain Muselli, Dominique de Rocca Serra, Marcelle Gonny, Jean-Michel Bolla (2007). Antimicrobial Action of Es-

sential Oils from Corsica. *Journal of Essential Oil Research*, 19 (2), 176-182. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/10412905.2007.9699254>.

44. Glisic, S. B., Milojevic, S. Z., Dimitrijevic-Brankovic, S. I., Orlovic, A.M., Skala, D. U. (2007). Antimicrobial activity of the essential oil and different fractions of *Juniperus communis* L. and a comparison with some commercial antibiotics. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 72(4), 311-320. Retrieved from <https://DOI:10.2298/JSC0704311G>.

45. Glen-Karolczyk, K. & Boligłowa, E. (2016). Fungitsydna aktyvnist efirnoyi olii yalivtsiu (*Juniperus communis* L.) proty hrybkiv, shcho vrazhayut' prorostky khronu [Fungicidal activity of juniper essential oil (*Juniperus communis* L.) against the fungi infecting horseradish seedlings]. *Zhurnal doslidzen i vprovadzhennia v ahrarnomu inzhynirynhu – Journal of Research and Implementation in Agrarian Engineering*, 61(3). 119-125.

46. Bridley, P. (2006). *Brytans'kyi trav'yanyy zbirnyk. Tom 2: dovidnyk naukovoyi informatsiyi pro shyroko vykorystovuvanykh roslynnykh preparatakh* [British Herbal Compendium. Vol 2. British Herbal Medicine Association]. Retrieved from <https://bhma.info/index.php/product/british-herbal-compendium-volume-2>.

47. Hänsel, R., Sticher, O. (2007). *Pharmakognosie – Phytopharmazie*. Walshtedt, Germany. Retrieved from <https://epdf.pub/queue/pharmakognosie-phytopharmazie-8-auflage.html>.

48. Gibbons, S., Ohlendorf, B., Johnsen, I. (July, 2002). The genus *Hypericum*—a valuable resource of anti-Staphylococcal leads. *Fitoterapia*, 73 (4), 300-304. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0367-326X\(02\)00082-5](https://doi.org/10.1016/S0367-326X(02)00082-5).

49. Süntar, I., Oyardı, O., Esra Küpeli Akkol, Özçelik, B. (2016). Antimicrobial effect of the extracts from *Hypericum perforatum* against oral bacteria and biofilm formation. *Pharmaceutical Biology*, 54 (6), 1065-1070. Retrieved from <https://doi.org/10.3109/13880209.2015.1102948>.

50. Simonetti, G., Tocci, N., Valletta, A., Brasili, E., Felicia Diodata D'Auria, Idoux, A., Pasqua, G. (2016). In vitro antifungal activity of extracts obtained from *Hypericum perforatum* adventitious roots cultured in a mist bioreactor against planktonic cells and biofilm of *Malassezia furfur*. *Natural Product Research. Formerly Natural Product Letters*, 30 (5), 544-550. Retrieved from <https://doi:10.1080/14786419.2015.1028059>.

51. Gadzovska-Simic, S., Tusevski, O., Antevski, S., Atanasova-Pancevska, N., Petreska, J., Stefova, M., Kungulovski D., Spasenoski M. (2012). Secondary metabolite production in *Hypericum perforatum* L. cell suspensions upon elicitation with fungal mycelia from *Aspergillus flavus*. *Archives of Biological Sciences*, 64 (1), 113-121. Retrieved from <https://DOI:10.2298/ABS1201113G>.

52. Maskovic, P., Mladenović, J., Cvijović, M., Aćamović-Đoković, G., Solučić, S., Radojković, M. (2011). Phenolic content, antioxidant and antifungal activities of acetic, ethanolic and petroleum ether extracts of *Hypericum perforatum* L. *Hemijaska industrija*, 65 (2), 159-164.

53. Sytar, O., Švedienė, J., Ložienė, K., Paškevičius, A., Kosyan, A., Taran, N. (2016). Antifungal properties of hypericin, hypericin tetrasulphonic acid and fagopyrin on pathogenic fungi and spoilage yeasts. *Pharmaceutical Biology*, 54 (12), 3121-3125. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13880209.2016.1211716>.

UDC 631.577-047.44:635.646

*Antonina Dubinina, Tetiana Letuta, Tetiana Frolova*

## EFFECT ANALYSIS OF MEDICINAL VEGETABLE EXTRACTS ON EGGPLANT MICROFLORA

**Urgency of the research.** Different post-harvest processing means are used for shelf life prolonging, consumption properties of fresh vegetables preserving, but each of these means has different negative properties. It is topical to search for new sources of antibacterial and antimicrobial agents for fruit and vegetable raw material processing; medicinal vegetable raw material extracts are among such means.

**Target setting.** It is determined that microbial spoilage of eggplant fruits is the main factor of vegetable raw material losses during storage which is caused by bacteria and fungi.

**Actual scientific researches and issues analysis.** The analytical review of domestic and foreign scientific and technical literature and patent information regarding the eggplant fruits microbiota and medicinal and technical raw material extracts effect on it were carried out.



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Searching for new antibacterial agents of natural origin with environmental safety for the human body properties and wide range of action on the eggplant fruits microbiota with the aim of fruit and vegetable raw material shelf life prolonging.

**The research objective.** The analysis of modern methods of fruit and vegetable raw material storage should be carried out. Analytical review of domestic and foreign scientific and technical literature and patent information regarding the microbiota of eggplant fruits and the effect on it of medicinal and technical raw material extracts should be presented.

**The statement of basic materials.** Study of microbial spoilage of eggplant fruits during storage and antimicrobial action of medicinal vegetable raw material extracts on it.

**Conclusions.** The proposed composition for post-harvest processing of medicinal and technical raw material extracts allows reducing losses from microbial spoilage and prolonging the duration of eggplant fruits storage.

**Keywords:** eggplants; bacteria; fungi; storage; specific microflora; fungicidal action; antibacterial properties.

**References:** 53.

**Дубініна Антоніна Анатоліївна** – доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри товарознавства та експертизи товарів, Харківський державний університет харчування і торгівлі (вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051, Україна).

**Dubinina Antonina** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Commodity Research and Expertise of Goods, Kharkiv State University of Nutrition and Trade (333 Klochkovskaya Str., 61051 Kharkiv, Ukraine).

**E-mail:** tovaroved206@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000000331321918>

**Летуга Тетяна Миколаївна** – кандидат технічних наук, професор кафедри товарознавства та експертизи товарів, Харківський державний університет харчування і торгівлі (вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051, Україна).

**Letuta Tatiana** – PhD in Technical Sciences, PhD, Associate Professor, Department of Commodity Research and Expertise of Goods, Kharkiv State University of Food Technology and Trade (333 Klochkovskaya Str., 61051 Kharkiv, Ukraine).

**E-mail:** lettanya@ukr.net

**ORCID:** <http://orcid.org/0000000201102047>

**Фролова Тетяна Володимирівна** – асистент кафедри товарознавства та експертизи товарів, Харківський державний університет харчування і торгівлі (вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051, Україна).

**Frolova Tatiana** – assistant of the Department of Commodity Research and Expertise of Goods, Kharkiv State University of Nutrition and Trade (333 Klochkovskaya Str., 61051 Kharkiv, Ukraine).

**E-mail:** tetfrol70@ukr.net

УДК 664.8.047

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-258-266

Світлана Миколенко, Юрій Куянов, Павло Баранік

**ВПЛИВ ІНФРАЧЕРВОНОГО СУШІННЯ НА ЯКІСТЬ  
СВІЖОЇ І ЗАМОРОЖЕНОЇ ЧЕРЕШНІ**

**Актуальність теми дослідження.** Дослідження процесу сушіння черешні, рослинної продукції з високим антиоксидантним статусом і швидкою втратою споживчих властивостей, є актуальним для зниження втрат продовольчої сировини та отримання функціональних харчових продуктів.

**Постановка проблеми.** Обмежений строк зберігання черешні та короткий сезон збирання врожаю за умови підвищення обсягів виробництва у світі створюють потребу в обґрунтуванні ефективних технологій переробки черешні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Було проаналізовано закордонні й вітчизняні наукові праці, які свідчать про ускладнення переробки черешень порівняно з вишнями через високий вміст пектину, переважне консервування свіжих плодів заморожуванням, що негативно позначається на органолептичних властивостях черешень, та підвищення антиоксидантної активності плодів внаслідок зневоднення.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Відсутні ефективні технології сушіння черешні, зокрема, шляхом інфрачервоної обробки з урахуванням сортових особливостей плодів *Prunus avium L.* та умов попереднього зберігання сировини.

**Постановка завдання.** Визначення впливу інфрачервоної обробки на кінетику сушіння, фізико-хімічні, органолептичні показники якості черешні різних сортів та умов попереднього зберігання, зокрема, заморожування.

**Виклад основного матеріалу.** Плоди червоної і жовтої черешні відрізняються здатністю поглинання підведеної енергії, що впливає на швидкість перебігу процесу вологоперенесення. Залежно від сортових особливостей плодів *Prunus avium L.* доцільно змінювати тривалість сушіння: для отримання більш якісної продукції з черешень сортів жовтого кольору потрібно збільшувати тривалість термічної дії і застосовувати нижчі температури сушіння. Попереднє заморожування черешні позитивно позначається на органолептичних показниках сушеного продукту. Висушування черешень інфрачервоним випромінюванням раціональне до вологості 10–18 %, що дозволяє отримати продукт найвищої якості.

**Висновки відповідно до статті.** Інфрачервона обробка черешні дозволяє отримати сушений продукт із прийнятними споживчими властивостями, зокрема, із сировини зниженої якості, сприяючи скороченню втрат сировини протягом продовольчого ланцюга.

**Ключові слова:** черешні; заморожування; інфрачервоне сушіння; криві сушіння; показники якості.

Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 18.

**Актуальність теми дослідження.** Плоди черешні (*Prunus avium L.*) належать до харчової продукції з високим антиоксидантним статусом, яка багата на феноли, антоціани, а також на мінеральні речовини, вітаміни. Черешні здатні проявляти функціональні властивості за рахунок антиоксидантної, антиканцерогенної, протизапальної дії на організм людини [1; 2]. За даними Всесвітньої продовольчої і сільськогосподарської організації FAO у 2017 р. світовий обсяг виробництва черешні сягнув 2,4 млн т на рік [3]. Втрати плодоовочевої сировини становлять 45 %, що суттєво підриває основи продовольчої безпеки за умов постійно зростаючого населення планети [4]. В Україні втрати харчової сировини внаслідок недосконалості реалізації технологічних процесів вздовж продовольчого ланцюга, на жаль, перевищують загальносвітові. Це робить актуальним удосконалення технологій збереження харчової сировини, зокрема, консервування шляхом зневоднення.

**Постановка проблеми.** Черешні мають обмежений термін зберігання: в охолодженому стані черешні зберігаються лише 7–14 днів. При цьому сезон збирання врожаю *Prunus avium L.* триває лише три тижні [5]. В умовах глобального потепління і підвищення середньодобових температур прискорюється процес дозрівання плодів черешні. Тому в багатьох випадках черешні реалізують за низьку ціну, щоб запобігти втратам унаслідок незадовільних споживчих якостей. Плоди *Prunus avium L.* швидко стають нестійкими до впливу збудників різноманітних хвороб та шкідників. Своєю чергою, застосування додаткових хімічних засобів захисту черешні призводить до небажаних наслідків, пов'язаних зі зниженням рівня безпечності харчової сировини для людини та провокуванням імуносупресії.

В Україні виробництво черешні за період з 2013 по 2017 рр. коливалось від 67,33 до 70,86 тис. т [3]. За останні роки відбувається підвищення обсягів виробництва черешні, що пов'язано зі збільшенням попиту та зростанням світових цін. Однак проблемою зали-

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

шається збереження споживчих якостей черешні під час зберігання і розробка альтернативних технологій, які б запобігали втратам продукції вздовж продовольчого ланцюга [6].

Плоди кісточкових культур досить швидко втрачають свої товарні якості під час зберігання. Застосування різних методів консервування по різному впливає на зміну кількості антоціанів та загальної антиоксидантної активності черешні, що відрізняється для свіжої, замороженої і сушеної плодової сировини [7]. При цьому як свіжа, так і сушена черешня може використовуватись як джерело природних барвників, антиоксидантів та нутрієнтів завдяки наявності фенолів, антоціанів та високій антиоксидантній здатності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомо, що 60 % плодів *Prunus avium L.* постачається в торговельні мережі у свіжому вигляді та за умови охолодження черешні зберігають свої споживчі властивості до двох тижнів. Доведено, що пакування черешні в модифікованому газовому середовищі дозволяє пролонгувати збереження якості плодів до 40–50 днів [5]. При цьому за рахунок високої активності води черешні нестійкі до мікробіологічного псування [8; 9]. Тому, враховуючи значні обсяги вирощування черешні в Україні і світі, зазначена тривалість є недостатньою і призводить до суттєвих втрат плодовоовочевої сировини.

Обсяги переробки черешні порівняно із вишнями набагато нижчі, що пов'язано з особливостями її хімічного складу [10]. У клітинних стінках черешні міститься значно більше пектинів, які перешкоджають ефективній переробці продукту на сік, а вміст ароматичних сполук менший. Відсутність ефективних технологій переробки черешні призводить до більших втрат таких плодів у порівнянні з вишнями.

Заморожування і сушіння відносять до найбільш застосовуваних методів консервування плодовоовочевої сировини. Встановлено, що сушіння і заморожування плодовоовочевої сировини посилює вивільнення антоціанів, тісно пов'язаних із мембранами, у результаті чого після обробки їх вміст зростає [5]. Під час заморожування відбувається фазове перетворення плодів із рідкого стану в кристалічний, що перешкоджає перебігу мікробіологічних, біохімічних, фізіологічних процесів у сировині [11]. Рекомендована температура зберігання черешні в замороженому стані становить  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Проте внаслідок заморожування відбувається значна втрата вологи й аромату, потемніння черешні, що суттєво знижує її споживчі властивості. Лише швидке заморожування і зберігання за температури  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  дозволяє запобігти таким процесам [12]. Однак такі технологічні заходи потребують значних енерговитрат із застосуванням складної холодильної техніки й додаткових виробничих площ.

Сушіння черешні може здійснюватися радіаційним, конвективним, інфрачервоним способами, які характеризуються різними режимами тепловіддачі, теплової конвекції і випромінювання [13]. Застосування інфрачервоного (ІЧ) випромінювання для сушіння харчової сировини має певні переваги, до яких відносяться зменшення тривалості процесу, висока енергоефективність, рівномірність нагрівання продукту і підвищення його якості [14–16]. Встановлено, що сушіння черешні при  $70\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$  призводить до підвищення її антиоксидантної активності. У роботі [7] показано, що інфрачервоне сушіння призводить до значного підвищення загальної кількості антоціанів у продукті, а тривалість обробки продукту порівняно із конвективним сушінням скорочується вдвічі – з 8 годин до 4 годин. Тому інфрачервоне сушіння є досить перспективним методом обробки черешні. Його ефективність буде суттєво залежати як від вихідних характеристик сировини (сортових особливостей, умов попереднього зберігання перед обробкою, які змінюють фізико-хімічні властивості сировини), так і від застосовуваних режимів обробки.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Нині відсутні розробки ефективних технологій сушіння черешні, зокрема, шляхом інфрачервоної обробки з урахуванням сортових особливостей плодів *Prunus avium L.* та умов попереднього зберігання сировини. Сушена черешня є гарною альтернативою полікомпонентній снековій продукції з

додаванням комплексу штучних поліпшувачів смаку й аромату. Тому дослідження впливу інфрачервоної обробки на споживчі якості черешні надасть можливість отримувати натуральну функціональну снекову продукцію з високим антиоксидантним статусом.

**Постановка завдання.** Аналіз літературних джерел вказує на відсутність досліджень інфрачервоного сушіння черешні з урахуванням фактору сортових особливостей плодів та попередніх умов їх зберігання, здатних призводити до зниження споживчих характеристик продукту. Тому в цій роботі поставлене завдання визначення впливу інфрачервоної обробки на кінетику сушіння, фізико-хімічні, органолептичні показники якості черешні різних сортів та умов попереднього зберігання, зокрема, заморожування.

#### Виклад основного матеріалу.

Для проведення досліджень як сировину використовували черешні червоні сорту Валерій Чкалов і черешні жовті сорту Дрогана жовта, що зберігалась після збирання протягом 2–3 діб при температурі  $(+3\pm 1)$  °С. Характеристики досліджуваної черешні наведено у табл. 1. Також у роботі було використано черешні червоні попередньо заморожені при температурі  $(-17\pm 1)$  °С, яка зберігалась за таких умов протягом 20–24 доби. Ця сировина, на відміну від свіжої, характеризувалась погіршенням аромату, притаманного черешні, зміною кольору та появою побуріння плодів. Перед сушінням черешні червоні заморожені попередньо розморожували при 24–26 °С протягом 30 хв. Споживчі характеристики сировини до обробки були суттєво знижені порівняно зі свіжими зразками і такий продукт був непридатним до подальшого використання в нативному вигляді. Перед сушінням у плодах видаляли кісточки і промивали водою.

Таблиця 1

#### Характеристика плодів черешні

Показники	Черешня	
	червона	жовта
Середній діаметр, мм	32,9±4,1	33,7±4,0
Вага плоду, г	1,77±0,2	1,87±0,2
Вміст вологи, %	79,2	68,9
Вміст сухих розчинних речовин, %	16,44	21,26
Густина, г/см <sup>3</sup>	1,04	1,02
pH	3,55	3,45
ОВП, mV	300	389

Сушіння черешні проводилось у лабораторній ІЧ-установці з кварцевими випромінювачами у стаціонарному шарі з регуляцією інтенсивності сушіння шляхом зміни потужності ІЧ-випромінювачів. Відстань від кварцевих ІЧ-випромінювачів до шару продукту становила 19 мм. Черешні висушувалась у шарі, товщина якого була рівною радіусу черешні (16–17 мм). Вага зразку черешні, який висушували у стаціонарному шарі, становила 200 г. Температуру під час сушіння фіксували за допомогою термопари. Загальна тривалість ІЧ-сушіння черешні для всіх дослідних зразків була рівною 220 хв. Перед завантаженням продукту проводилось попереднє розігрівання шафи протягом 1,5 хв. Досліди проводили у трьох повтореннях. У першій серії дослідів як сировину використовували черешні червоні свіжі, у другій серії – черешні червоні заморожені, у третій серії – черешні жовті свіжі.

Вологість продукту визначали термогравіметричним експрес-методом на приладі «Кварц», вміст сухих розчинних речовин – рефрактометричним методом, активну кислотність, окислювально-відновний потенціал – потенціометричним методом на приладі EZODO MP-103, ступінь усадки – за методикою, наведеною у роботі [16], органолептичні показники оцінювали баловим методом із врахуванням коефіцієнтів вагомості критеріїв якості продукту.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Інфрачервону обробку проводили в 5 етапів, що відрізнялися потужністю ІЧ-випромінювачів, температурою шару продукту під час обробки і тривалістю сушіння (табл. 2). Потужність випромінювачів поступово знижували з 300 до 100 Вт враховуючи, що зі зменшенням вологовмісту раціональною є зміна температурного режиму. Температурного максимуму (77–82 °С) шар продукту досягав на 2–4 етапі сушіння. Найбільш тривалими були заключні етапи сушіння, що зайняло 150 хв.

Таблиця 2

Параметри сушіння черешні ІЧ-випромінюванням

Етап		Дослід		
		1	2	3
1	потужність, Вт	300	300	300
	температура, °С	75	74	75
	тривалість, хв	30	30	30
2	потужність, Вт	250	250	250
	температура, °С	82	78	82
	тривалість, хв	40	40	40
3	потужність, Вт	200	200	200
	температура, °С	82	80	82
	тривалість, хв	20	20	20
4	потужність, Вт	150	150	150
	температура, °С	77	82	82
	тривалість, хв	60	60	60
5	потужність, Вт	100	100	100
	температура, °С	77	78	78
	тривалість, хв	90	90	90

Загальна характеристика кривих ІЧ-сушіння схожа за своїм проявом і відрізняється лише зміною вмісту води в кінцевій фазі процесу (рис. 1). Нехарактерні властивості проявляються у частині кривих, де вміст води становить менше 30 %. Видалення води за вказаних значень очевидно пов'язано зі зміною хімічного складу, зокрема, рН середовища, наявністю пектинових речовин та здатністю проникнення води крізь поверхневий шар плодів. Криві сушіння зразків черешні червоної свіжої і замороженої (1, 2, рис. 1) показують, що для останньої відбувається стабілізація процесу, притаманна вирівнюванню процесу перетворення протопектинів у пектини розчинної форми. Таким чином, здатність утримувати вільну воду змінюється, що прискорює швидкість вологовіддачі продукту. У порівнянні із замороженими плодами червоної черешні, свіжий продукт має сповільнену втрату води. Зразки червоної і жовтої черешні відрізняються здатністю до поглинання підведеної енергії, що впливає на швидкість перебігу процесу вологоперенесення. Протягом перших 2 годин ІЧ-обробки для кривих 1 і 3 спостерігається однакова за значенням швидкість сушіння та значне зниження втрати води в інтервалі 2–4 години для зразків жовтої черешні. Таким чином, залежно від сортових особливостей плодів *Prunus avium L.* доцільно змінювати тривалість сушіння. Для отримання більш якісної продукції із черешень сортів жовтого кольору потрібно збільшувати тривалість термічної дії і застосовувати нижчі температури сушіння.

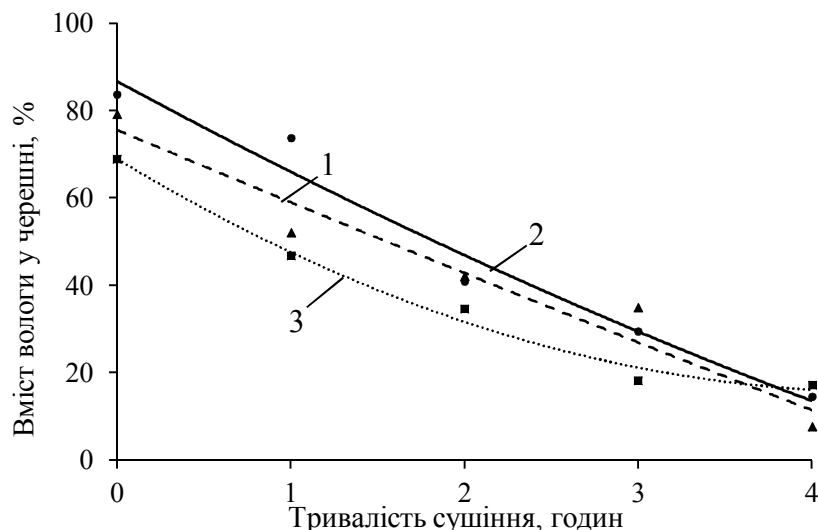


Рис. 1. Криві сушіння черешні:

1 – червона свіжа; 2 – червона заморожена; 3 – жовта свіжа

Вологість кінцевого продукту є визначальним критерієм якості. Вміст вологи у висушених шляхом ІЧ-обробки плодах черешні становив: 7,6; 14,5; 17,2% для червоної свіжої, червоної замороженої і жовтої черешні відповідно. Це безпосередньо впливає на усадку кінцевого продукту (рис. 2). Враховуючи органолептичні показники сушених плодів черешні (рис. 3), треба відзначити, що найвища якість отримана для зразків червоної замороженої і жовтої свіжої черешні, які відповідають значенням усадки продукту внаслідок ІЧ-обробки. Так, усадка для червоної замороженої і жовтої свіжої черешні вища у два рази, ніж для червоної свіжої плодів. На показник рН плодів черешні висушування плодів вплинуло в бік зменшення: для черешні червоної рН становило 3,43, а для жовтої – 3,39; попереднє заморожування продукту не позначалось на зміні вказаного показника.

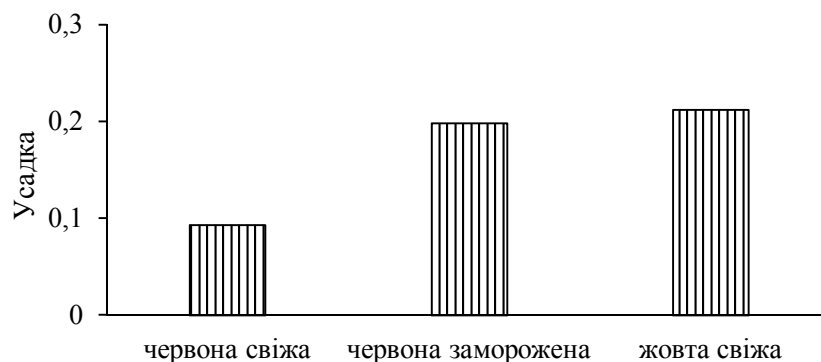


Рис. 2. Усадка сушеної черешні, отриманої шляхом ІЧ-обробки



Рис. 3. Органолептичні профілі сушеної черешні:

1 – червона свіжа; 2 – червона заморожена; 3 – жовта свіжа

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Як видно з наведених профілів якості, найвищі органолептичні властивості має сушена червона черешня, попередньо заморожена: загальна органолептична оцінка продукту вища на 12 % порівняно з іншими дослідними зразками. Погіршення зовнішнього вигляду і розжовуваності черешні червоної свіжої порівняно з іншими зразками пов'язано зі зниженою вологістю продукту, що становить 7,6 % проти 14,5 та 17,2 % для червоної замороженої і жовтої свіжої відповідно. Аромат сушеної червоної черешні є більш вираженим у порівнянні з жовтою, що, очевидно, пов'язано з підвищеним вмістом летких ароматичних сполук, які складаються із суміші таких летких сполук, як спирти, карбоніли, органічні кислоти, складні ефіри, терпени і норізопреноїди [17; 18]. За смаковими характеристиками і розжовуваністю зразки сушеної черешні, отриманої із червоної замороженої і жовтої свіжої, відрізняються високими споживчими якостями. Враховуючи органолептичні профілі сушеної черешні недоцільним є її висушування до вологості нижче 10–12 %.

**Висновки відповідно до статті.** Плоди черешень відносяться до харчової продукції функціонального призначення завдяки антиоксидантній, антиканцерогенній, протизапальній дії на організм людини, але відрізняються коротким терміном збирання врожаю і швидкою втратою споживчих характеристик за умови значного вмісту пектину, який перешкоджає переробці черешень на сік та іншу харчову продукцію. Відсутність ефективних технологій переробки черешень викликає значні обсяги втрат такої плодової сировини в Україні та світі. Популярне для інших плодових культур заморожування у черешень призводить до погіршення аромату, побуріння, зміни консистенції плодів, внаслідок чого вони стають непридатними до споживання у нативному вигляді. Сушіння черешень дозволяє отримати снековий продукт, знижуючи його втрати вздовж продовольчого ланцюга.

За кривими сушіння інфрачервоним випромінюванням у рваному режимі встановлено, що попереднє заморожування черешні впливає на стабілізацію процесу вологовидалення, що, очевидно, пов'язано із перетворенням протопектинів у пектини розчинної форми, що прискорює процес вологовидалення. Плоди червоної і жовтої черешні відрізняються здатністю до поглинання підведеної енергії, що впливає на швидкість перебігу процесу вологоперенесення. Залежно від сортових особливостей плодів *Prunus avium* L. доцільно змінювати тривалість сушіння: для отримання більш якісної продукції з черешень сортів жовтого кольору потрібно збільшувати тривалість термічної дії і застосовувати нижчі температури сушіння.

Висушена шляхом ІЧ-обробки черешня відрізняється за вмістом води, що варіювалася від 7,6 до 17,2 %, а усадка червоної замороженої і жовтої свіжої черешні вдвічі перевищувала усадку червоної свіжої черешні. Внаслідок зневоднення сушена черешня відрізнялась від свіжої зниженням активної кислотності на 2–3 % залежно від сорту плодів *Prunus avium* L. Попереднє заморожування черешні позитивно позначається на органолептичних показниках сушеного продукту: загальна органолептична оцінка зростає на 12 % порівняно зі свіжим продуктом. Сортіві особливості черешні найбільше впливають на аромат сушеного продукту, що зумовлено хімічним складом жовтих і червоних черешень, для останніх з яких характерний підвищений вміст ароматичних сполук. Висушування черешень інфрачервоним випромінюванням раціональне до вологості не менше 10–18 %, що дозволяє отримати продукт найвищої якості.

#### Список використаних джерел

1. Nutrients, bioactive compounds and bioactivity: the health benefits of sweet cherries (*Prunus avium* L.) / Gonçalves A. C. et al. *Current Nutrition & Food Science*. 2019. Vol. 15. № 3. P. 208–227. DOI: 10.2174/1573401313666170925154707.
2. Dark sweet cherry phenolics as dietary chemopreventive/therapeutic compounds for aggressive breast cancer cell growth with no toxicity to normal breast cells (FS13-03-19) / Marjorie A. et al. *Current Developments in Nutrition*. 2019. Vol. 3. Iss. Sup. 1. P. 408. DOI: 10.1093/cdn/nzz030.FS13-03-19.

3. FAOSTAT. Production. Crops. Cherries. URL: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
4. Інноваційні методи обробки продовольчої сировини: монографія / Миколенко С. Ю. та ін. Дніпро: Журфонд, 2017. 224 с.
5. Shelf-life and marketing window extension in sweet cherries by the use of modified atmosphere packaging / Kahlke C. J. et al. *New York Fruit Quarterly*. 2009. Vol. 17. № 2. P. 21–24.
6. Reducing food loss and waste / Lipinski B. et al. *World Resources Institute Working Paper*. 2013. P. 1–40.
7. Oancea S., Draghici O., Ketney O. Changes in total anthocyanin content and antioxidant activity in sweet cherries during frozen storage, and air-oven and infrared drying. *Fruits*. 2016. Vol. 71. № 5. P. 281–288. DOI: 10.1051/fruits/2016025.
8. Sweet cherry: Composition, postharvest preservation, processing and trends for its future use / Chockchaisawasdee S. et al. *Trends in food science & technology*. 2016. Vol. 55. P. 72–83. DOI: 10.1016/j.tifs.2016.07.002.
9. Romano G. S., Cittadini E. D. Sweet cherry quality in the horticultural production chain. *Stewart Postharvest Review*. 2006. Vol. 6. № 2. P. 1–8. DOI: 10.2212/spr.2006.6.2.
10. Sweet cherry (*Prunus avium*): critical factors affecting the composition and shelf life / Wani A. A. et al. *Food packaging and shelf life*. 2014. Vol. 1. № 1. P. 86–99. DOI: 10.1016/j.fpsl.2014.01.005.
11. Василюшина О. В. Особливості кристалоутворення під час заморожування плодів вишні. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*: зб. наук. пр. ХДУХТ. 2013. Вип.1 (17), ч. 2. С. 191–196.
12. Leong S. Y., Oey I. Effects of processing on anthocyanins, carotenoids and vitamin C in summer fruits and vegetables. *Food Chemistry*. 2012. Vol. 133. № 4. P. 1577–1587. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.02.052.
13. Drying characteristics of agricultural products under different drying methods: a review / Lee S. H. et al. *Journal of Biosystems Engineering*. 2016. Vol. 41. № 4. P. 389–395. DOI: 10.5307/JBE.2016.41.4.389.
14. Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating / Shi J. et al. *LWT-Food Science and Technology*. 2008. Vol. 41. № 10. P. 1962–1972. DOI: 10.1016/j.lwt.2008.01.003.
15. Doymaz I. Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices. *Journal of Food Science and Technology*. 2012. Vol. 49. № 6. P. 760–766. DOI: 10.1007/s13197-010-0217-8.
16. Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic / Baysal T. et al. *European Food Research and Technology*. 2003. Vol. 218. № 1. P. 68–73. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-003-0791-3>.
17. Factors affecting quality and health promoting compounds during growth and postharvest life of sweet cherry (*Prunus avium* L.) / Correia S. et al. *Frontiers in plant science*. 2017. Vol. 8. P. 2166. DOI:10.3389/fpls.2017.02166.
18. Composition of the cherry (*Prunus avium* L. and *Prunus cerasus* L.; Rosaceae) / Serradilla M. J. et al. *Nutritional Composition of Fruit Cultivars*. Academic Press, 2016. P. 127–147. DOI: 10.3389/fpls.2017.02166.

### References

1. Gonçalves, A. C. et al. (2019). Nutrients, bioactive compounds and bioactivity: the health benefits of sweet cherries (*Prunus avium* L.). *Current Nutrition & Food Science*, 15 (3), 208–227. DOI: 10.2174/1573401313666170925154707.
2. Marjorie, A. et al. (2019). Dark sweet cherry phenolics as dietary chemopreventive/therapeutic compounds for aggressive breast cancer cell growth with no toxicity to normal breast cells (FS13-03-19). *Current Developments in Nutrition*, 3 (1), 408. DOI: 10.1093/cdn/nzz030.FS13-03-19.
3. Production. Crops. Cherries. (2019). *FAOSTAT*. Retrieved from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
4. Mykolenko, S. Yu. et al. (2017). *Innovatsiyni metody obrobki prodovolchoyi sirovini: monografiya [Innovative approaches for food processing: monograph]*. Dnipro: Zhurfond [in Ukrainian].
5. Kahlke, C. J. et al. (2009). Shelf-life and marketing window extension in sweet cherries by the use of modified atmosphere packaging. *New York Fruit Quarterly*, 17 (2), 21–24.



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

6. Lipinski, B. et al. (2013). Reducing food loss and waste. *World Resources Institute Working Paper*. 1–40.
7. Oancea, S., Draghici, O., Ketney, O. (2016). Changes in total anthocyanin content and antioxidant activity in sweet cherries during frozen storage, and air-oven and infrared drying. *Fruits*, 71 (5), 281–288. DOI: 10.1051/fruits/2016025.
8. Chockchaisawasdee, S. et al. (2016). Sweet cherry: Composition, postharvest preservation, processing and trends for its future use. *Trends in food science & technology*, 55, 72–83. DOI: 10.1016/j.tifs.2016.07.002.
9. Romano, G. S., Cittadini, E. D. (2006). Sweet cherry quality in the horticultural production chain. *Stewart Postharvest Review*, 6, (2), 1–8. DOI: 10.2212/spr.2006.6.2.
10. Wani, A. A. et al. (2014). Sweet cherry (*Prunus avium*): critical factors affecting the composition and shelf life. *Food packaging and shelf life*, 1 (1), 86–99. DOI: 10.1016/j.fpsl.2014.01.005.
11. Vasylyshyna, O. V. (2013). Osoblyvosti krystaloutvorennya pid chas zamorozhuvannya plodiv vyshni [Features of crystalline formation during freezing of wild cherries]. *Prohresyvni tekhnika ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva i torhivli: zb. nauk. pr. KhDUKht – Progressive equipment and technology in food production, restaurant industry and trade: col. of scient. works of KhSUNT*, 1 (17), 191–196 [in Ukrainian].
12. Leong, S. Y., Oey, I. (2012). Effects of processing on anthocyanins, carotenoids and vitamin C in summer fruits and vegetables. *Food Chemistry*, 133 (4), 1577–1587. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.02.052.
13. Lee, S. H. et al. (2016). Drying characteristics of agricultural products under different drying methods: a review. *Journal of Biosystems Engineering*, 41 (4), 389–395. DOI: 10.5307/JBE.2016.41.4.389.
14. Shi, J. et al. (2008). Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. *LWT-Food Science and Technology*, 41 (10), 1962–1972. DOI: 10.1016/j.lwt.2008.01.003.
15. Doymaz, I. (2012). Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices. *Journal of Food Science and Technology*, 49 (6), 760–766. DOI: 10.1007/s13197-010-0217-8.
16. Baysal, T., et al. (2003). Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *European Food Research and Technology*, 218 (1), 68–73. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-003-0791-3>.
17. Correia, S., et al. (2017). Factors affecting quality and health promoting compounds during growth and postharvest life of sweet cherry (*Prunus avium* L.). *Frontiers in plant science*, 8, 2166. DOI:10.3389/fpls.2017.02166.
18. Serradilla, M. J., et al. (2016). Composition of the cherry (*Prunus avium* L. and *Prunus cerasus* L.; Rosaceae). Monique S.J. Simmonds (Ed.), *Nutritional Composition of Fruit Cultivars* (pp. 127–147). Academic Press. DOI: 10.3389/fpls.2017.02166.

UDC 664.8.047

Svitlana Mykolenko, Yuriy Kuianov, Pavlo Baranik

## EFFECT OF INFRARED DRYING ON THE QUALITY OF FRESH AND FROZEN SWEET CHERRIES

**Urgency of the research.** Study of the process of drying sweet cherries, food product with high antioxidant status and quick loss of consumer properties, is actual for reducing food loss and waste, obtaining functional food.

**Target setting.** The limited shelf-life of sweet cherries and the short harvesting season, with increasing their production in the world, urge to develop effective sweet cherries processing technologies.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Foreign and domestic scientific papers were analyzed, which confirm difficulties for processing sweet cherries in comparison with sour cherries due to their high content of pectin; predominant preservation of the fresh fruits by freezing, which negatively affects on the organoleptic characteristics; increasing of antioxidant activity of the fruits due to dehydration.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** There are no effective sweet cherries drying technologies, in particular, by infrared processing, taking into account the varietal features of *Prunus avium* L. fruits and the conditions of previous storage of raw materials.

**The research objective.** Study of effect of infrared radiation heating on drying process and quality of sweet cherries of different varieties and pre-storage conditions, in particular, freezing.

**The statement of basic materials.** *The fruits of red and yellow sweet cherries are distinguished by the absorption capacity to infrared energy that impacts on the velocity of moisture migration. Depending on the varietal features of Prunus avium L. fruits, it is feasible to vary the drying time: yellow varieties of cherries for better quality should be undergoing drying longer at lower temperatures. Pre-freezing of sweet cherries has a positive effect on the organoleptic characteristics of the dried products. Drying sweet cherries by infrared radiation is acceptable to the moisture content of 10-18%, which allows to get a high-quality product.*

**Conclusions.** *Infrared radiation heating of sweet cherries allows to obtain dried product with good consumer properties, in particular from raw materials of lower quality, helping to reduce food loss and waste along the food chain.*

**Keywords:** *sweet cherries; freezing; infrared drying; drying curves; quality indicators.*

**Fig.:** 3. **Tab.:** 2. **References:** 18.

**Миколенко Світлана Юрївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції, Дніпровський державний аграрно-економічний університет (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, 49600, Україна).

**Mykolenko Svitlana** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Storage and Processing Technologies of Agricultural Products, Dnipro State Agrarian and Economic University (25 Serhiy Efremov Str., 49600 Dnipro, Ukraine).

**E-mail:** svetlana.mykolenko@gmail.com

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1959-1141>

**ResearcherID:** N-6958-2018

**Scopus Author ID:** 57194689776

**Куянов Юрій Юрійович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції, Дніпровський державний аграрно-економічний університет (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, 49600, Україна).

**Kuianov Yuriy** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Storage and Processing Technologies of Agricultural Products, Dnipro State Agrarian and Economic University (25 Serhiy Efremov Str., 49600 Dnipro, Ukraine).

**E-mail:** kuianov.yu.yu@dsau.dp.ua

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4699-8131>

**Баранік Павло Вікторович** – магістрант, Дніпровський державний аграрно-економічний університет (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, 49600, Україна).

**Baranik Pavlo** – master student, Dnipro State Agrarian and Economic University (25 Serhiy Efremov Str., 49600 Dnipro, Ukraine).

Віктор Осика, Леонід Коптюх, Володимир Комаха, Ольга Шульга

## ХАРАКТЕРИСТИКА МІКРОСТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ПАПЕРУ РІЗНОЇ ЩІЛЬНОСТІ

**Актуальність теми дослідження.** Властивості паперу обумовлені багатьма чинниками, зокрема композицією волокнистих напівфабрикатів, характером помелу волокнистих матеріалів, введенням в паперову масу наповнювачів та модифікуючих добавок, режимом відливу та сушіння тощо. Серед технологічних факторів, що мають найбільший вплив на властивості паперу, чільне місце посідають операції каландрування та остаточної обробки, під час яких у значних інтервалах можна змінювати щільність паперового полотна.

**Постановка проблеми.** Для отримання паперу із заданими властивостями проводять його ущільнення на суперкаландрі. При цьому додаткове ущільнення композиції паперу також сприяє підвищенню непроникності за рахунок зміни характеру розподілу й ущільнення целюлозних волокон та загальної кількості пор у його структурі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Були розглянуті останні публікації щодо можливості отримання паперу із заданими властивостями шляхом керованої зміни мікроструктури паперового полотна у процесі каландрування.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Дослідження властивостей паперу, що піддається ущільненню до різного ступеня у процесі виготовлення, за інших рівних умов, має актуальний науковий та практичний інтерес, зокрема, для виготовлення матеріалів із заданим комплексом споживних властивостей.

**Постановка завдання.** Мета дослідження полягає у виявленні особливостей мікроструктури паперу різної щільності, виготовленого за інших рівних умов, та встановленні впливу ступеня ущільнення паперу в процесі виготовлення на його властивості.

**Виклад основного матеріалу.** Проведено порівняльні дослідження структурних характеристик паперу для вологоміцного водо- та жиронепроникного пакувального матеріалу, виготовленого із сульфатної целюлози розмеленої до ступеня 75 °ШР із різним ступенем ущільнення. Досліджено чотири зразки паперу різної маси квадратного метра площі та щільності. Охарактеризовано їхню мікроструктуру та абсорбційні, бар'єрні та міцнісні властивості.

**Висновки відповідно до статті.** Експериментальним шляхом встановлено оптимальний рівень щільності – 0,75-0,85 г/см<sup>3</sup>. Білена та небілена сульфатна целюлоза із хвойних порід деревини визначена як найбільш придатна для отримання паперу-основи, що може використовуватись для виробництва паперових пакувальних матеріалів із заданими властивостями для волого- і жиромісної продукції.

**Ключові слова:** щільність паперу; мікроструктура паперу; поровий простір; властивості паперу; капілярне всмоктування; жиронепроникність; руйнівне зусилля.

Табл.: 1. Рис.: 5. Бібл.: 17.

**Актуальність теми дослідження.** Властивості паперу обумовлені багатьма чинниками, зокрема композицією волокнистих напівфабрикатів, характером помелу волокнистих матеріалів, введенням у паперову масу наповнювачів та модифікуючих добавок, режимом відливу й сушіння та багато інших. Серед технологічних факторів, що мають найбільший вплив на властивості паперу, чільне місце посідають операції каландрування та остаточної обробки, під час яких у значних інтервалах можна змінювати щільність паперового полотна [1; 2]. Для отримання паперу із заданими властивостями проводять його ущільнення на суперкаландрі. При цьому додаткове ущільнення композиції паперу також сприяє підвищенню непроникності за рахунок зміни характеру розподілу й ущільнення целюлозних волокон та загальної кількості пор у його структурі [3].

**Постановка проблеми.** Вимірювання активності й розмірів зовнішньої поверхні волокна, визначення їхньої пластичності, внутрішнього фібрилювання та інших найбільш характерних властивостей пов'язані з певними труднощами. Виконання таких вимірювань можливо лише у профільних лабораторіях. У виробничих же умовах основні властивості паперової маси оцінюють з огляду на непрямі визначення її якості. Здебільшого для виробничих цілей обмежуються визначенням здатності целюлозного волокна вбирати воду та набухати, вимірюючи показник ступеня помелу (°ШР), а також визначенням середньої довжини волокон.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Над проблемою забезпечення рівномірності властивостей паперу працювали відомі вчені: Д. М. Фляте [2], Д. Тведе, С. Е. Селке, Д. П. Камдем, Д. Схірес [3] та ін. Вони встановили, що важливим фактором, який забезпечує комплекс властивостей паперу як матеріалу, є його щільність.

Технологічну сторону впливу різноманітних факторів, у тому числі структури паперового полотна, на властивості паперу досліджували багато авторів. Так, у роботах [4-9] показано, що для отримання паперу із заданими механічними властивостями можна регулювати ступінь помелу целюлозного волокна.

Результатами попередніх досліджень [10] встановлено, що з підвищенням ступеня помелу целюлозного волокна знижуються показники його пористості. Однак розмелювання целюлозного волокна вище за 75 °ШР не сприяє значному зростанню механічної міцності та бар'єрних властивостей паперу. Це відбувається за рахунок зменшення міцності целюлозного волокна внаслідок розпушування структури волокна та його укорочення. Крім того, процес такого помелу є довготривалим та енергозатратним. У таких умовах більш раціональним фактором регулювання властивостей паперу є зміна його щільності.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Для прогнозування властивостей паперу виготовленого з підготовленої паперової маси, що у процесі технологічної переробки може піддаватись ущільненню до різного ступеня, значний науковий та практичний інтерес становить встановлення залежностей споживних властивостей від умов виготовлення.

**Мета дослідження** полягає у виявленні особливостей мікроструктури паперу різної щільності, виготовленого за інших рівних умов, та встановленні впливу ступеня ущільнення паперу в процесі виготовлення на його властивості.

**Матеріали та методи.** Дослідні зразки паперу виготовляли із сульфатної біленої (Б-1) та небіленої (НС-2) целюлози хвойних порід деревини (АТ «Балтійська целюлоза», РФ). Волокнисті напівфабрикати піддавали розпуску та розмелюванню до ступеня помелу 75 °ШР в присутності води в лабораторному ролі VALLEY за швидкості барабана 500 хв<sup>-1</sup>. Ступінь помелу контролювали на приладі Шоппер-Ріглера за стандартною методикою [11]. Дослідні зразки паперу готували за допомогою листовиливного лабораторного приладу з комбінованою сушильною камерою RapidKothen. Дослідження показників якості паперу здійснювали загальноприйнятими методами: масу паперу – за ДСТУ 2297 [12]; капілярне всмоктування – ГОСТ 12602–93 [13]; жиропроникність – ДСТУ ISO 5634 [14] та ГОСТ 13525.13 [15]; показники міцності за ДСТУ 2334-94 [16] та ДСТУ ISO 3781:2005 [17].

**Виклад основного матеріалу.** Проведено порівняльні дослідження структурних характеристик паперу для вологоміцного водо- та жиронепроникного пакувального матеріалу, виготовленого із сульфатної біленої целюлози розмеленої до ступеня з різним ступенем ущільнення. Досліджено чотири зразки паперу: 1 – папір масою площі 1 м<sup>2</sup> – 45 г та щільністю 0,75 г/см<sup>3</sup>; 2 – папір масою площі 1 м<sup>2</sup> – 50 г та щільністю 0,80 г/см<sup>3</sup>; 3 – папір масою площі 1 м<sup>2</sup> – 60 г та щільністю 0,85 г/см<sup>3</sup>, 4 – папір масою площі 1 м<sup>2</sup> – 65 г та щільністю 0,9 г/см<sup>3</sup>.

Результати дослідження зазначених зразків паперу за радіусом та об'ємом пор із використанням методів рентгеноструктурного аналізу й растрової електронної мікроскопії наведено на рис. 1.

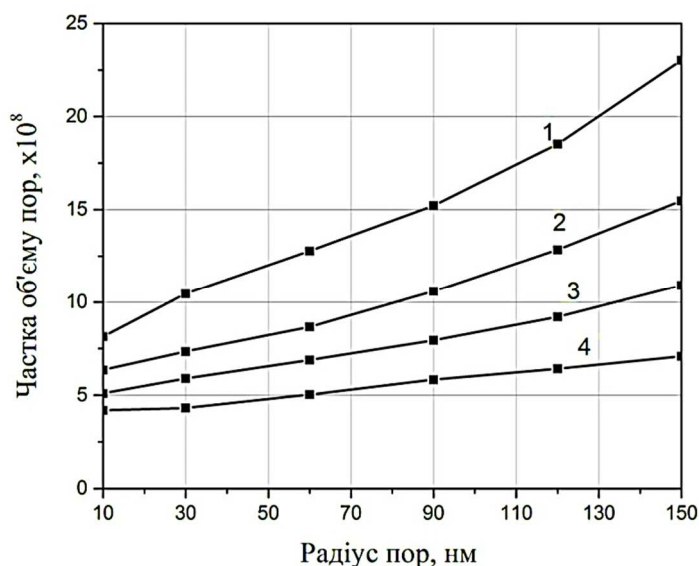


Рис. 1. Розподіл частки об'єму пор за радіусом для зразків паперу:

1 – масою площі 1 м<sup>2</sup> – 45 г та щільністю 0,75 г/см<sup>3</sup>; 2 – масою площі 1 м<sup>2</sup> – 50 г та щільністю 0,8 г/см<sup>3</sup>; 3 – масою площі 1 м<sup>2</sup> – 60 г та щільністю 0,85 г/см<sup>3</sup>, 4 – масою площі 1 м<sup>2</sup> – 65 г та щільністю 0,9 г/см<sup>3</sup>

Механічне розроблення целюлозного волокна при розмелюванні в комплексі з подальшим ущільненням структури виготовленого з нього паперового полотна дає змогу отримати матеріали із широким діапазоном розмірів та характеру розподілу мікропор. Дослідження мікропористої структури показує, що найбільшим об'ємом мікропор характеризується зразок паперу 1 масою 45 г/м<sup>2</sup>, що підданий мінімальному ущільненню до щільності 0,75 г/см<sup>3</sup>. Мікропористість зразків 2, 3, 4 є значно нижчою (таблиця).

Таблиця

Характеристика порового простору зразків паперу із біленої сульфатної хвойної целюлози за різної щільності

№ зразка	Маса 1 м <sup>2</sup> паперу, г	Щільність паперу г/см <sup>3</sup>	Частка об'єму пор x10 <sup>8</sup> за різного радіусу пор (нм)					
			10	30	60	90	120	150
1	45	0,75	8,1	10,5	12,8	15,2	18,5	23,0
2	50	0,80	6,4	7,3	8,7	10,6	12,8	15,5
3	60	0,85	5,1	5,9	6,9	7,9	9,2	10,9
4	65	0,90	4,2	4,3	5,0	5,8	6,4	7,1

Для дослідження впливу щільності паперу на його мікроструктуру були проведені також електронно-мікроскопічні дослідження поверхні зразків паперу на основі біленої сульфатної целюлози з хвойних порід деревини. Електронно-мікроскопічні зображення поверхні зразків паперу (рис. 2) за збільшення у 250 разів дають змогу візуально оцінити характер розподілу целюлозних волокон у матеріалі, їхні поперечні розміри, розглянути макроструктуру поверхні досліджуваних зразків різної щільності.

Усі зразки паперу складаються з переплетених між собою целюлозних волокон. Волокна паперу подібні між собою як за зовнішнім виглядом, так і за своїми поперечними розмірами. Однак, слід відзначити зменшення вільного міжволоконного простору в більш ущільнених зразках паперу. Більш щільна структура паперу сприяє утворенню більшої кількості міжволоконних зв'язків.

Целюлозні волокна у зразках на рис. 2, в та г, що піддавалися найбільшому ущільненню на суперкаландрі до 0,85-0,9 г/см<sup>3</sup>, порівняно із 0,45-0,48 г/см<sup>3</sup> для неущільнених зразків, мають найменш об'ємну картину міжпорового простору.

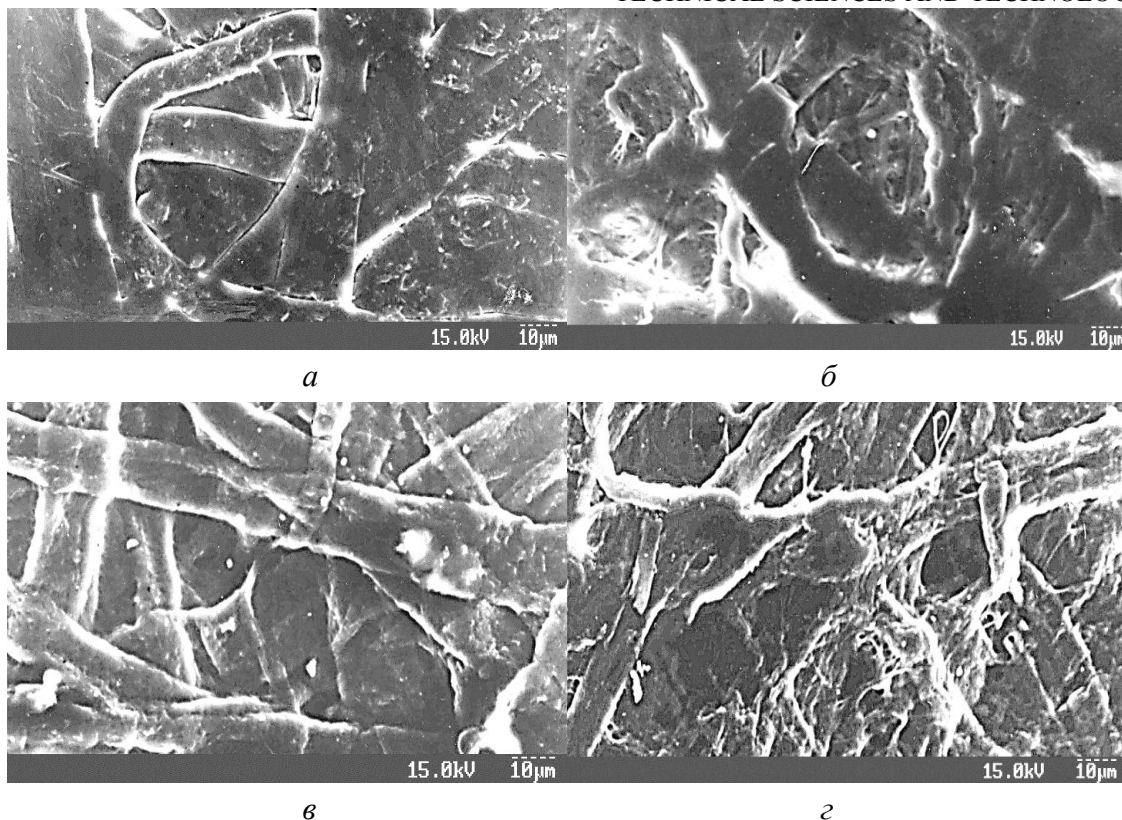


Рис. 2. Електронно-мікроскопічні зображення (збільшення у 250 разів) поверхні зразків паперу:

*а* – масою  $1 \text{ м}^2 - 45 \text{ г}$  та щільністю  $0,75 \text{ г/см}^3$ ; *б* – масою  $1 \text{ м}^2 - 50 \text{ г}$  та щільністю  $0,8 \text{ г/см}^3$ ;  
*в* – масою  $1 \text{ м}^2 - 60 \text{ г}$  та щільністю  $0,85 \text{ г/см}^3$ ; *г* – масою  $1 \text{ м}^2 - 65 \text{ г}$  та щільністю  $0,9 \text{ г/см}^3$

Треба зазначити, що характер розподілу об'єму пор за розмірами паперу різної щільності узгоджується з результатами досліджень капілярного всмоктування зразків (рис. 3).

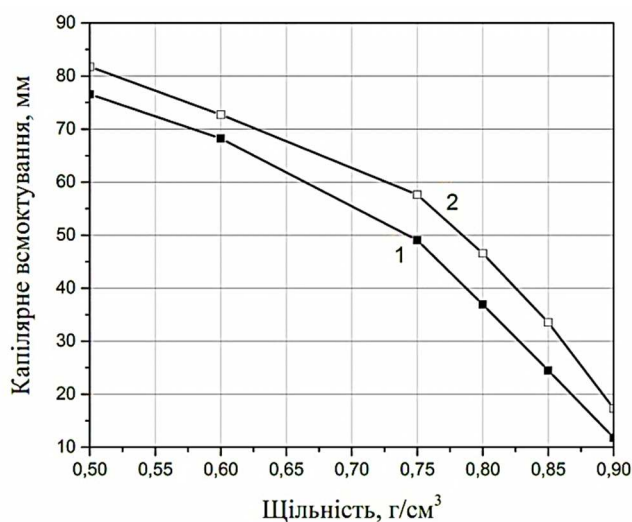


Рис. 3. Залежність капілярного всмоктування від щільності паперу із небіленої (1) і біленої (2) сульфатної целюлози хвойних порід деревини

Зменшення кількості макропор у структурі більш щільного паперу та його розвинена мікропористість обумовлює зниження капілярного всмоктування по відношенню до води. Володіючи більш високощільною структурою, папір проявляє меншу здатність до набухання і деформації під впливом води за різних агрегатних станів.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

За однакової щільності капілярне всмоктування паперу з біленої целюлози є вищим ніж у паперу з небіленої сульфатної хвойної целюлози, однак дана розбіжність у значеннях показника є незначною, а динаміка зменшення з ростом щільності є подібною для обох кривих.

Мінімальні значення капілярного всмоктування паперу (17,3 мм і 11,8 мм) відмічено за щільності 0,9 г/см<sup>3</sup> для зразків з біленої та небіленої целюлози відповідно.

Враховуючи те, що для надання пакувальним матеріалам на основі паперу бар'єрних властивостей передбачається його оброблення розчинами, які мають в'язкість більшу від води, високий показник щільності не забезпечить рівномірний розподіл речовин у структурі паперу та зменшить ефективність їх застосування. Виходячи з цього оптимальним рівнем щільності паперу є 0,75-0,85 г/см<sup>3</sup>.

Щільність, як відомо, є одним із найсуттєвіших факторів, що визначає опір паперу до проходження жиру та його механічну міцність. З метою встановлення впливу щільності паперу виготовленого із сульфатної хвойної целюлози на жиропроникність та механічну міцність були виготовлені зразки паперу з небіленої та біленої целюлози щільністю від 0,5 до 0,9 г/см<sup>3</sup> та піддано випробуванням за прийнятими методиками. Результати дослідження жиропроникності наведено на рис. 4, руйнівного зусилля паперу у сухому та вологому станах – рис. 5.

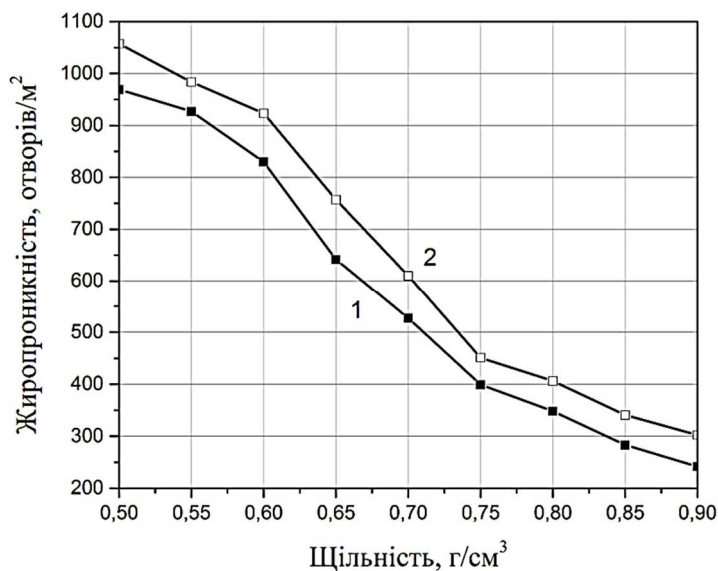


Рис. 4. Залежність жиропроникності від щільності паперу із небіленої (1) і біленої (2) сульфатної целюлози хвойних порід деревини

Наведені залежності демонструють значне зниження жиропроникності паперу з підвищенням щільності в досліджуваному інтервалі. При цьому найбільш інтенсивне зниження абсолютних показників жиропроникності в обох зразків зафіксовано в інтервалі 0,6-0,75 г/см<sup>3</sup>, що пов'язано з перерозподілом порової структури зразків на макрорівні та зменшенням загальної кількості макропор. Подальше зниження відбувається менш інтенсивно.

Зі збільшенням щільності паперу відбувається підвищення руйнівного зусилля в сухому стані. Треба зазначити, що найбільший приріст механічної міцності паперу в сухому стані має місце в діапазоні щільності 0,7-0,85 г/см<sup>3</sup>. За щільності 0,85 г/см<sup>3</sup> руйнівне зусилля для паперу із небіленої целюлози становить 67,9 Н, з біленої 61,8 Н. Підвищення щільності до 0,9 г/см<sup>3</sup> дозволяє збільшити його міцність у сухому стані на 3 та 1 % відповідно. Проте зростання щільності паперу в діапазоні 0,5-0,9 г/см<sup>3</sup> незначною мірою впливає на його міцність у вологому стані. Це свідчить про те, що з підвищенням щільності уповільнюються процеси проникнення води в міжволоконний простір, однак зв'язки між волокнами целюлози залишаються нестійкими до впливу вологи.

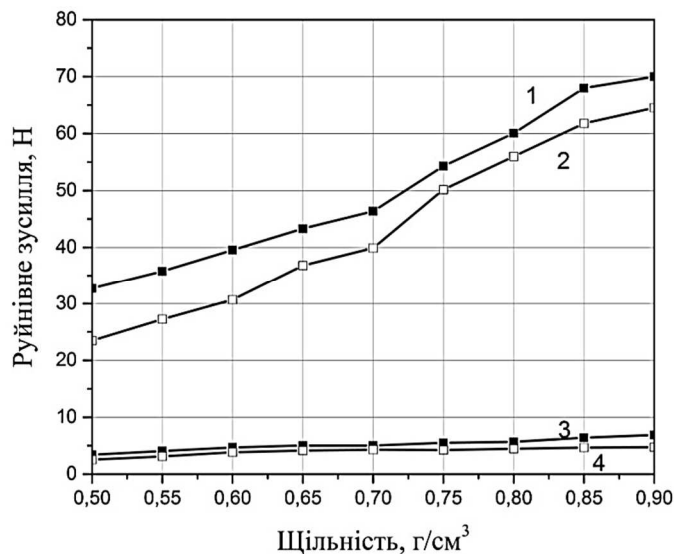


Рис. 5. Залежність руйнівного зусилля від щільності паперу із сульфатної целюлози хвойних порід деревини:  
 1 – небіленої в сухому стані; 2 – біленої в сухому стані;  
 3 – небіленої у вологому стані; 4 – біленої у вологому стані

Таким чином, експериментальним шляхом встановлено рівень щільності, що відповідає оптимальному, виходячи із зазначених вимог – 0,75-0,85 г/см<sup>3</sup>. Білена та небілена сульфатна целюлоза із хвойних порід деревини визначена як найбільш придатна для отримання паперу-основи, що може використовуватись для виробництва паперових пакувальних матеріалів із заданими властивостями для волого- і жировмісної продукції.

#### Список використаних джерел

1. Примаков П. С., Барабаш В. А. Технологія паперу і картону. Київ: ЕКМО, 2008. 425 с.
2. Фляте Д. М. Бумагообразующие свойства волокнистых материалов. Москва: Лесная промышленность, 1990. 136 с.
3. Twede D., Selke S. E., Kamdem D. P., Shires D. Cartons, crates and corrugated board: handbook of paper and wood packaging technology. DEStech Publications, Inc, 2014.
4. Вураско А. В., Фролова Е. И. Влияние степени помола на сорбционные свойства целлюлозы из недревесного растительного сырья. *Леса России и хозяйство в них*. 2013. С. 123–126.
5. Карпунин И. И., Кузьмич В. В., Балабанова Т. Ф. Технологические режимы переработки растительного сырья для производства упаковки. *Наука и техника*. 2011. № 3. С. 34–38.
6. Мирзаева М. В., Бабаханова Х. А. Факторы, влияющие на специфические свойства бумаги конкретного назначения. *Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела*. 2013. № 2. С. 13–17.
7. Кулешов А. В., Смолин А. С. Бумагообразующие свойства вторичных растительных волокон. *Химия растительного сырья*. 2008. № 2. С. 110–112.
8. Анализ влияния качества целлюлозного сырья на прочностные и сорбционные свойства упаковочных видов картона / О. А. Мишурина и др. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017. № 1–1. С. 9–13.
9. Iwamoto S., Abe K., Yano H. The effect of hemicellulose son wood pulp nanofibrillation and nanofiber network characteristics. *Biomacromolecules*. 2008. Vol. 9. № 3. P. 1022–1026.
10. Осика В. А., Коптюх Л. А. Паперові пакувальні матеріали: монографія. Київ: КНТЕУ, 2018. 464 с.
11. Бумага. Определение прочности на излом при многократных перегибах (методы Шоппера, Ломаржи, Келер-Молина, М1Т): ГОСТ ИСО 5626-97. [Введ. 2001-07-01]. Москва: Изд-во стандартов, 2001. 12 с.
12. Напівфабрикати волокнисті, папір та картон. Метод визначення маси продукції площею 1 м<sup>2</sup>: ДСТУ 2297-93. [Чинний від 1996-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 1996. 19 с.
13. Бумага и картон. Определение капиллярной впитываемости. Метод Клемма: ГОСТ 12602-93). – [Введ. 1995-01-01]. Минск: Издательство стандартов, 1995. 6 с.



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

14. Папір і картон. Визначення жиропроникності: ДСТУ ISO 5634:2003. [Чинний від 2005-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2003. 10 с.

15. Бумага. Методы определения жиропроницаемости: ГОСТ 13525.13–69. [Введ. 1970-01-01]. Москва: Стандартинформ, 2007. 4 с.

16. Папір та картон. Визначення міцності під час розтягування. Частина 1. Метод навантажування з постійною швидкістю: ДСТУ 2334-94. [Чинний від 1998-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 1997. 10 с.

17. Папір і картон. Визначення міцності під час розтягування після занурення у воду: ДСТУ ISO 3781:2005. [Чинний від 2006-07-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 12 с.

## References

1. Prymakov, P. S. (2008). *Tekhnolohiia paperu i kartonu [Publishing and editing]*. Kyiv: EKMO [in Ukrainian].

2. Fliate, D. M. (1990). *Bumagoobrazuiushchie svoistva voloknistikh materialov [Publishing and editing]*. Moscow: Lesnaia promyshlennost [in Russian].

3. Koptiukh, L. A. (1997). Razrabotka i organizatsiia proizvodstva zhironpronitcaemoi i vlagoprochnoi upakovochnoi bumagi [Development and organization of production of greaseproof and moisture-proof packaging paper]. *Tseliuloza. Bumaga. Karton – Cellulose. Paper. Cardboard*, 11-12, 28–30 [in Russian].

4. Vurasko, A. V. (2013). Vliianie stepeni pomola na sorbtcionnye svoistva tseliulozy iz nedrevesnogo rastitelnogo Syria [The influence of the degree of grinding on the sorption properties of cellulose from non-wood plant materials]. *Les Rossii i khoziaistvo v nikh – Russian forests and farming in them*, 1, 123–126 [in Russian].

5. Karpunin, I. I. (2011). Tekhnologicheskie rezhimy pererabotki rastitelnogo syria dlia proizvodstva upakovki [Technological modes of processing vegetable raw materials for the production of packaging]. *Nauka i tekhnika – Science and technology*, 3, 34–38 [in Russian].

6. Mirzaeva, M. V. (2013). Faktory, vliiaiuschie na spetsificheskie svoistva bumagi konkretnogo naznacheniia [Factors affecting the specific properties of a paper of a specific purpose]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy poligrafii i izdatelskogo dela – News of higher educational institutions – Problems of printing and publishing*, 2, 13–17 [in Russian].

7. Kuleshov, A. V. (2008). Bumagoobrazuiushchie svoistva vtorichnykh rastitelnykh volokon [Paper-forming properties of secondary plant fibers]. *Khimiia rastitelnogo syria – Chemistry of plant raw materials*, 2, 110–112 [in Russian].

8. Mishurina, O. A. (2017). Analiz vliptniia kachestva tseliuloznogo syria na prochnostnye i sorbtcionnye svoistva upakovochnykh vidov kartona [Analysis of the influence of the quality of cellulosic raw materials on the strength and sorption properties of packaging types of cardb]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy – International Journal of Applied and Fundamental Research*, 1–1, 9–13 [in Russian].

9. Iwamoto, S. (2008). The effect of hemicellulose son wood pulp nanofibrillation and nanofiber network characteristics. *Biomacromolecules*, 9 (3), 1022–1026.

10. Osyka, V. A. (2018). *Paperovi pakuvalni materialy [Publishing and editing]*. Kyiv: KNUTE [in Ukrainian].

11. Bumaga. Opredelenie prochnosti na izlom pri mnogokratnykh peregibakh (metody Shoppera, Lomarzhi, Keler-Molina, MIT) [Paper. Determination of fracture strength at multiple kinks (Shopper, Lomarje, Keller-Molina, MIT methods)]. HOST ISO 5626-97 [Publishing and editing]. Minsk Izdatelstvo standartov [in Russian].

12. Napivfabrykaty voloknysti, papir ta karton. Metod vyznachennia masy produktsii plosheiu 1 m<sup>2</sup> [Fibers, paper and paperboard. The method of determining the mass of production area of 1 m<sup>2</sup>]. DSTU 2297-93. [Publishing and editing]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].

13. Bumaga i karton. Opredelenie kapilliarnoi vpityvaemosti. Metod Klemma [Paper and cardboard. Determination of capillary absorption. The Clemm method]. HOST 126026-93 [Publishing and editing]. Minsk Izdatelstvo standartov [in Russian].

14. Papir i karton. Vyznachennia zhyropronyknosti [Paper and cardboard. Determination of fat permeability]. DSTU ISO 5634:2003 [Publishing and editing]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].

15. Bumaga. Metody opredeleniia zhiropronyknosti Paper [Methods for determining fat permeability]. HOST 13525.13–69 [Publishing and editing]. Minsk Izdatelstvo standartov [in Russian].

16. Papir ta karton. Vyznachennia mitsnosti pid chas roztriahuvannia. Chastyna 1. Metod navantazhuvannia z postiinoiu shvydkistiu [Paper and cardboard. Determination of tensile strength. Part 1. Constant-speed loading method]. DSTU 2334-94 [Publishing and editing]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].

17. Papir i karton. Vyznachennia mitsnosti pid chas roztriahuvannia pislia zanurennia u vodu [Paper and cardboard. Determination of tensile strength after immersion in water]. DSTU ISO 3781:2005 [Publishing and editing]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].

UDC 676.248

*Viktor Osyka, Leonid Koptyuh, Volodymyr Komakha, Olga Shulga*

## CHARACTERISTICS OF MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF VARIOUS DENSITY PAPER

**Relevance of the research topic.** Many factors affect the properties of paper, in particular the composition of fibrous semi-finished products, the nature of the grinding of fibrous materials, the introduction of fillers and modifying additives into the pulp, the regime of ebb and drying and many others. Among the technological factors that have the greatest influence on paper properties, calendaring and finishing operations have a special place, in which the density of the paper web can be changed at significant intervals.

**Formulation of the problem.** To obtain paper with desired properties, it is sealed on a supercalender. At the same time, additional compaction of the paper composition enhances impermeability by changing the nature of the distribution and compaction of cellulose fibers and the total number of pores in its structure.

**Analysis of recent research and publications.** Recent publications on the possibility of obtaining paper with desired properties by controlled changes in the microstructure of the paper web during the calendaring process were considered.

**Isolation of previously unexplored parts of a common problem.** The study of the properties of paper subjected to compaction to varying degrees during the manufacturing process, *ceteris paribus*, is of urgent scientific and practical interest, in particular, for the manufacture of materials with a given set of consumer properties.

**Formulation of the problem.** The purpose of the study is to identify the features of the microstructure of paper of different densities, manufactured *ceteris paribus*, and to establish the effect of the degree of compaction of paper in the manufacturing process on its properties.

**The presentation of the main material.** Comparative studies of the structural characteristics of paper for water-resistant water and grease-proof packaging material made of sulphate pulp, milled to a degree of 75 ° SR with varying degrees of compaction were carried out. Four paper samples of different mass per square meter of area and density were studied. Their microstructure and a number of consumer properties characterizing absorption, barrier and strength properties are characterized.

**Conclusions according to the article.** Experimentally established the optimal level of density - 0.75-0.85 g/cm<sup>3</sup>. Softwood sulphate pulp is defined as the most suitable for base paper, can be used for the production of paper packaging materials with desired properties for moisture and fat-containing products.

**Keywords:** paper density; paper microstructure; pore space; paper properties; capillary absorption; grease permeability; destructive force.

Table: 1. Fig.: 5. References: 17.

**Осика Віктор Анатолійович** – доктор технічних наук, доцент, декан факультету торгівлі та маркетингу, Київський національний торговельно-економічний університет (вул. Кіото 19, м. Київ, 02156, Україна).

**Osyka Victor** – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Dean of Trade and Marketing Faculty, Kyiv National University of Trade and Economics (19 Kioto Str., 02156 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** osyka@knteu.kiev.ua

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5081-7727>

**Коптюх Леонід Андрійович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри товарознавства та митної справи, Київський національний торговельно-економічний університет (вул. Кіото 19, м. Київ, 02156, Україна).

**Koptiukh Leonid** – Doctor in technical sciences, Professor, Professor in the Department of Commodity Science and Customs Affairs, Kyiv National University of Trade and Economics (19 Kioto Str., 02156 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** neprod3@knteu.kiev.ua

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6205-6120>

**Комаха Володимир Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри товарознавства та митної справи, Київський національний торговельно-економічний університет (вул. Кіото 19, м. Київ, 02156, Україна).

**Komakha Volodymyr** – PhD in technical sciences, Assistant Professor in the Department of Commodity Science and Customs Affairs, Kyiv National University of Trade and Economics (19 Kioto Str., 02156 Kyiv, Ukraine).

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6498-9047>

**Шульга Ольга Сергіївна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри товарознавства та митної справи, Київський національний торговельно-економічний університет (вул. Кіото 19, м. Київ, 02156, Україна).

**Shulga Olga** – PhD in technical sciences, docent in the department of commodity science and customs affairs, Kyiv National University of Trade and Economics (19 Kioto Str., 02156 Kyiv, Ukraine).

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0312-890X>

Микола Гомеля, Олена Степова, Віктор Камаєв

## РОЗРОБКА ІНГІБІТОРІВ КОРОЗІЇ МЕТАЛІВ У ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ІЗ РІЗНИМ РІВНЕМ МІНЕРАЛІЗАЦІЇ

**Актуальність теми дослідження.** Актуальність теми дослідження зумовлена гостротою проблеми захисту трубопроводів та обладнання від корозії при контакті з природними та стічними водами, включаючи високомінералізовані шахтні та пластові води.

**Постановка проблеми.** Нині застосування високоефективних інгібіторів для захисту трубопроводів та обладнання від корозії та відкладень в енергетиці, промисловості, видобувній галузі є економічно вигідним та доцільним у плані захисту довкілля від шкідливих впливів при виліві або скиді забруднених вод із високою мінералізацією.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Досліджено застосування пасиваційних інгібіторів, таких як оксиетиледефосфонова кислота. Цей реагент забезпечував високу стабільність води щодо осадко відкладень. Високу ефективність при боротьбі з корозією забезпечували й інші композиції на основі фосфонових кислот. Ефективні інгібітори є досить дорогими, а сировина для їх виготовлення є важкодоступною на Україні.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Створення ефективних інгібіторів корозії на основі похідних фосфористої та диметилфосфінової кислот, перспективних стабілізаторів накіпсутворення.

**Виклад основного матеріалу.** Було розроблено новий метод синтезу диметилсульфонатфосфіна натрію із гіпофосфіту натрію, пара форму та сульфату натрію, а також створено новий інгібітор – нітрилоксидетилдиметилфосфонову кислоту шляхом конденсації фосфористої кислоти з етанол аміном в присутності формальдегіду. Отримані реагенти використовували як інгібітори корозії металів у водних середовищах. Показано, що вони не поступаються за ефективністю іншим інгібіторам пасиваційного типу у прісних водах. У мінералізованих водах ефективними були інгібітори адсорбційного типу.

**Висновки відповідно до статті.** Створено нові методи синтезу диметилсульфонатфосфіна натрію та нітрилоксидетилдиметилфосфонові кислоти з доступних реагентів.

Досліджено інгібітори корозії металів на основі диметилсульфонатфосфіна натрію та нітрилоксидетилдиметилфосфонові кислоти. Показано, що вони, наряду з іншими фосфонатами є ефективними інгібіторами корозії металів у прісних водах. Їх ефективність зростає в присутності іонів цинку.

Показано, що інгібітори пасиваційного типу неефективні при захисті від корозії металів у високо мінералізованих водах. Захист металів від корозії забезпечують інгібітори адсорбційного типу.

**Ключові слова:** корозія; коефіцієнт гальмування; ступінь захисту від корозії; фосфонові кислоти; інгібітори корозії.

Табл.: 5. Рис.: 1. Бібл.: 9.

**Актуальність теми дослідження.** Проблема створення та забезпечення надійності роботи систем водопостачання та водовідведення у промисловості є досить гострою. Вона є актуальною не лише у плані раціонального використання водних ресурсів, але і при вирішенні проблеми захисту навколишнього природного середовища від технологічних виливів. Особливо небезпечним на сьогодні є забруднення довкілля внаслідок великої кількості аварій та пошкоджень на нафто- та газопроводах, інших продуктопроводах [1], причиною яких є корозійні пошкодження та руйнування. Гостро стоїть проблема захисту трубопроводів та обладнання від корозії та осадко відкладень у промислових водоциркуляційних системах [2]. Вирішення цієї проблеми важливе з погляду захисту довкілля від шкідливих впливів та забезпечення раціонального використання води у промисловості, яка на Україні споживає понад 60 % води, що забирається із природних водойм [3]. Головним завданням у промисловому водоспоживанні є зниження об'ємів споживання води за рахунок широкого впровадження та забезпечення надійної роботи водооборотних та замкнених (безстічних) систем водопостачання [4].

**Постановка проблеми.** Економічні збитки від руйнування обладнання та трубопроводів спричинені корозією металів є великими. Особливо значними вони є у видобувній промисловості внаслідок втрат цінних компонентів. Крім того, вони є причиною значних економічних збитків при попаданні в довкілля нафти та нафтопродуктів, токсичних хімічних речовин, високомінералізованих та забруднених вод. Очевидно, що визначення ефективності як інгібіторів корозії відомих речовин у високоагресивних водних середовищах, розробка доступних дешевих нових реагентів, що надійно захищають метали від корозії є тими напрямками досліджень, які дозволяють вирішити багато проблем, пов'язаних із корозією.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Переваги від застосування високоефективних реагентів у водоциркуляційних системах досить значні. При їх використанні можна створювати безстічні водоциркуляційні системи [5]. Застосування пасиваційних інгібіторів у водопровідних мережах, таких як оксиетилендекфосфонова кислота в присутності іонів цинку дозволило значно знизити корозійну активність води щодо сталі [6]. Крім того, цей реагент забезпечував високу стабільність води щодо осадко відкладень. Високу ефективність при боротьбі з корозією забезпечували й інші композиції на основі фосфонових кислот [7]. Вони також були ефективними інгібіторами осадковідкладень. Інгібітори-бактерициди [8], крім хімічної корозії, дозволяють вирішувати проблеми боротьби з біокорозією та біообростанням у водопровідних мережах.

Проте ефективність інгібіторів залежить від умов використання, хімічного складу води, її аерації [9]. Ефективні інгібітори є досить дорогими, а сировина для їх виготовлення є важкодоступною на Україні.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Нині інгібітори корозії металів пасиваційного типу, значна частина яких (фосфонові кислоти) добре зарекомендували себе і як стабілізатори накипоутворення, практично не досліджені в корозійних процесах у високомінералізованих водах. Практично не вивчені інгібітори сульфонатного типу. Не досліджені процеси їх синтезу. Те саме стосується інгібіторів на основі етанол аміну, що містять фосфонатні групи.

**Постановка завдання.** Метою цієї роботи було визначення впливу рівня мінералізації води на її корозійну активність, на ефективність інгібіторів корозії, створення нових високоефективних інгібіторів корозії та оцінка відомих реагентів як інгібіторів корозії у водних середовищах із різним рівнем мінералізації.

Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- оцінка корозійної активності водних середовищ до різних металів залежно від типу металу та рівня мінералізації води;
- розробка нового методу синтезу сульфонатно-фосфінатного інгібітора на основі натрієвої солі диметиллолфосфінової кислоти та нітрилфосфонатної кислоти на основі етанол аміну та фосфористої кислоти;
- оцінка інгібіторів корозії пасиваційного типу у водах із різними рівнями мінералізації;
- пошук інгібіторів корозії сталі у мінералізованих водних середовищах.

**Виклад основного матеріалу.** У роботі були використані відомі та синтезовані реагенти. Серед синтезованих реагентів були диметилсульфонатфосфінату натрію (ДМСФН) та нітрилоксиетилендиметилфосфонова кислота. Як відомі реагенти були використані оксиетилідендифосфонової кислоти (ОЕДФК), нітрилтриметилфосфонова кислота (НТМФК) та їхні натрієві солі, а також тіокарбамід, 1, 2, 3 бензотриазол, бензімідазол, *n*-диметиламінобензойна кислота та тіосемінарбазид.

Як середовище використовували модельні розчини, водопровідну та артезіанську води, характеристики яких наведені в табл. 1.

Реагент застосовували в концентраціях від 2 до 50 мг/дм<sup>3</sup>.

Для вимірювання корозійної активності води як без інгібіторів, так і при їх використанні застосовано метод масометрії.

Коефіцієнт гальмування корозії визначали за формулою:

$$J = \frac{V}{V_i}, \quad (1)$$

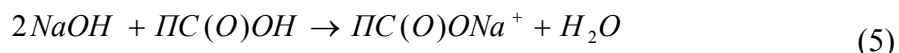
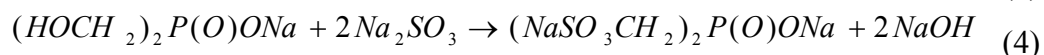
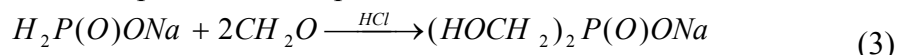
де  $V$  – швидкість корозії у воді у контрольному досліді;

$V_i$  – швидкість корозії у досліді з інгібітором.

Ступінь захисту від корозії розраховували за формулою:

$$Z = \left(1 - \frac{1}{J}\right) 100\%, \quad (2)$$

Розроблений нами метод отримання диметилсульфонатфосфіату натрію (ДМСФН) заснований на таких нескладних реакціях, які проходять із кількісним виходом:



де  $P$  – фрагмент матриці катіоніту.

Таблиця 1

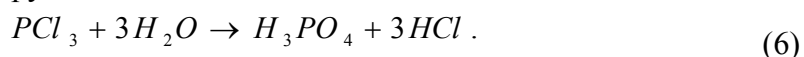
*Характеристики водних середовищ використаних для визначення ефективності інгібіторів осадковідкладень та корозії металів*

Показник	Модельний розчин			Водопровідна вода	Артезіанська вода
	1	2	3		
Каламутність	0,5	0,6	0,7	0,7	0,1
pH	8,3	6,5	7,3	7,6	7,5
Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>	39,1	241,2	318,0	4,1	5,27
Концентрація Ca <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	21,0	180,351	180,2	3,0	4,1
Лужність, мг-екв/дм <sup>3</sup>	4,2	5,6	4,3	4,0	5,26
Концентрація Cl <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	14875,0	44310,0	6396,0	75,0	103,0
Концентрація SO <sup>2-</sup> <sub>4</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	316,0	841,0	7969,0	37,0	6,4
Концентрація Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> мг/дм <sup>3</sup>	8984,0	29809,0	28950,0	54,0	75,0
Концентрація Fe загал., мг/дм <sup>3</sup>	0,15	0,1	0,15	0,26	0,2
Мінералізація, мг/дм <sup>3</sup>	25059,0	73533,0	94585,0	410,0	435,0

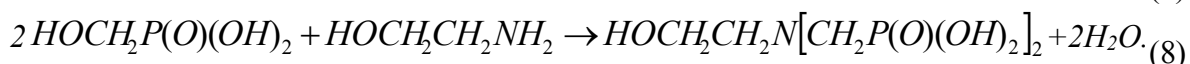
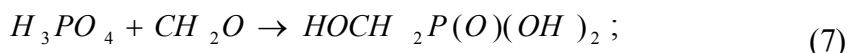
На першій стадії насичений розчин гіпофосфіту натрію у воді підкислювали соляною кислотою до pH=4,0. Після цього при температурі розчину 80-90 °С під час перемішування додавали невеликими частинами параформ. Наступну порцію параформу додавали після розчинення попередньої кількості. Після завершення процесу (реакція 1) при температурі 70–80 °С під час перемішування розчин натрієвої солі диметилфосфонової кислоти додавали до розчину сульфату натрію у воді (реакція 2). Після завершення реакції 2 розчин містить значну кількість розчиненого луку. Тому до цього розчину під час перемішування додавали слабокислотний катіоніт у кислотній формі до досягнення pH = 7,5-8,5. Після цього іоніт відділяли на фільтрі, промивали водою.

Промивні води використовували для розведення сульфату натрію або гіпофосфіту натрію. Отриманий фільтрат із концентрацією основного продукту 20 % використовували для стабілізаційної обробки води. Іоніт регенерували 5 %-ю соляною кислотою і в подальшому використовували для нейтралізації розчину натрієвої солі диметилсульфонатуфосфіату натрію (ДМСФН).

Для синтезу алкіламінофосфонових кислот використовували метилфосфоновою кислоту, отриману при взаємодії фосфористої кислоти, отриманої при гідролізі трихлористого фосфору та параформу або формаліну. Для цього до 10 %-го розчину формаліну при охолодженні його сумішшю льоду та хлориду натрію при перемішуванні додавали по краплях розраховану кількість три хлористого фосфору. На першій стадії відбувався гідроліз три хлористого фосфору



Після цього температуру суміші при перемішуванні поступово піднімали до 20–30 °С. При цій температурі суміш витримували 4-5 годин, а потім додавали до неї по краплях моноетаноламін. Після змішування реагентів температуру підвищували до 100–110 °С і кип'ятили протягом трьох годин. При цьому були реалізовані дві стадії процесу отримання нітрилооксietiлендиметилфосфонової кислоти (НОЕДМФК). Надлишок соляної кислоти відгоняли, а розчин НОЕДМФК концентрацією 40 % використовували як реагент для стабілізаційної обробки води.



Надалі визначили корозійну активність різних водних середовищ.

Мінералізовані середовища мають вищу корозійну активність щодо металів, у порівнянні з прісною водою (табл. 2). При цьому в мінералізованій воді швидкість корозії сталі Ст3 приблизно у 1,5–2,0 раза вища, порівняно із прісною водою. Для кольорових металів (мідь, латунь) при переході від прісної до мінералізованої води швидкість корозії значно зростає. Пов'язано це з тим, що пасиваційна дифузійна плівка продуктів корозії на поверхні кольорових металів у прісній воді значно міцніша й надійно захищає метал від контакту з водою. У розчинах із високою електропровідністю анодна й катодна зони на поверхні металу можуть бути досить віддалені через високу електропровідність розчину. Тому анодне розчинення металу можливе з переходом іонів у розчин без утворення дифузного бар'єрного шару. Зазначені процеси корозії здебільшого зумовлені кисневою деполаризацією. Але в окремих випадках, особливо для металів, які в ряду активності стоять до водню, деполаризатором можуть бути іони водню.

Таблиця 2

*Залежність швидкості корозії металів у водних розчинах від рівня їх мінералізації та типу металу при температурі 15 °С*

№ з/п	Середовище	Мінералізація, мг/дм <sup>3</sup>	Метал	Швидкість корозії	
				г/м <sup>2</sup> год	мм/рік
1	Водопровідна вода	410	Сталь Ст3	0,0390	0,0435
			Мідь М-2	0,0053	0,0052
			Латунь Л62	0,0066	0,0068
			Нержавіюча сталь 12ХІ8Н10Т	0,0008	0,0009
2	Артезіанська вода	435	Сталь Ст3	0,0324	0,0360
			Мідь М-2	0,0092	0,0090
			Латунь Л62	0,0112	0,0122
			Нержавіюча сталь	0,0016	0,0017
3	Модельний розчин № 1	25029	Сталь Ст3	0,0480	0,05328
			Мідь М-2	0,0374	0,0364
			Латунь Л62	0,0386	0,0420
			Нержавіюча сталь 12ХІ8Н10Т	0,0007	0,0008
4	Модельний розчин № 2	73533	Сталь Ст3	0,0628	0,0760
			Мідь М-2	0,0241	0,0235
			Латунь Л62	0,0339	0,0369
			Нержавіюча сталь 12ХІ8Н10Т	0,0008	0,0009
5	Модельний розчин № 3	94585	Сталь Ст3	0,0675	0,0817
			Мідь М-2	0,0301	0,0294
			Латунь Л62	0,0389	0,0423
			Нержавіюча сталь 12ХІ8Н10Т	0,0006	0,0007

Можливе також окислення металу при взаємодії з водою. Загалом, якщо врахувати, що присутні в мінералізованій воді хлорид-аніони (можливо й сульфати) руйнують за-

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

хисну плівку з продуктів корозії або пасиваційну кисневу плівку, то вибрати надійні інгібітори корозії металів є складною проблемою.

Відомо, що розглянуті вище інгібітори осадковідкладення на основі фосфонових та фосфінових кислот, так само як і поліфосфати та орто-фосфати, є ефективними інгібіторами корозії сталі пасиваційного типу [7]. Такі речовини сприяють стабілізації кисневої плівки на поверхні металу. Особливо плівка стабільна, а ефективність інгібіторів висока у присутності іонів цинку при інтенсивній аерації розчину. Розчинність кисню тим вища, чим менший рівень мінералізації води. Тому цей фактор може суттєво впливати на ефективність інгібіторів пасиваційного типу. Як інгібітори пасиваційного типу в цій роботі були використані відомі та розроблені нами інгібітори, такі як ОЕДФК, НТМФК, ДМСФН та НОЕДМФК.

Результати оцінювання впливу ОЕДФК у присутності іонів цинку на корозію металів у різних водних середовищах наведені в табл. 3.

Таблиця 3

*Оцінка ефективності ОЕДФК ( $D=10 \text{ мг/дм}^3$ ) в присутності іонів цинку ( $D=5 \text{ } 10 \text{ мг/дм}^3$ ) як інгібітора корозії сталі в різних водних середовищах при температурі  $25^\circ\text{C}$*

Метал	Водне середовище	Швидкість корозії, $\text{г/м}^2\text{год}$	Коефіцієнт зниження швидкості корозії	Ступінь захисту від корозії, $Z$ , %
Сталь Ст3	Водопровідна вода	0,0031	12,5	92,0
	Артезіанська вода	0,0028	11,57	91,4
	Модельний розчин № 1	0,0489	0,98	-
	Модельний розчин № 2	0,0632	1,00	-
	Модельний розчин № 3	0,681	0,98	-
Сталь Ст20	Водопровідна вода	0,0028	14,0	92,9
	Артезіанська вода	0,0025	14,5	93,1
	Модельний розчин № 1	0,0462	0,99	-
	Модельний розчин № 2	0,0627	1,00	-
	Модельний розчин № 3	0,0674	0,98	-
Мідь М-2	Водопровідна вода	0,0015	3,53	71,7
	Артезіанська вода	0,0017	4,41	77,3
	Модельний розчин № 1	0,0375	1,00	-
	Модельний розчин № 2	0,0272	0,89	-
	Модельний розчин № 3	0,0307	0,98	-
Латунь Л-62	Водопровідна вода	0,0015	4,40	77,2
	Артезіанська вода	0,0075	1,49	32,9
	Модельний розчин № 1	0,0390	0,99	-
	Модельний розчин № 2	0,0350	0,97	-
	Модельний розчин № 3	0,0392	0,99	-

Як видно із табл. 3, інгібітор надійно захищає сталь Ст20 та Ст3 у водопровідній та артезіанській воді при  $25^\circ\text{C}$ . Зумовлено це тим, що в цих середовищах у прісних водах концентрація кисню сягає  $8\text{--}10 \text{ мг/дм}^3$  при низькій концентрації хлоридів та сульфатів.

Ступінь захисту від корозії в обох випадках перевищує 90 %. Менш виражений інгібуючий ефект був для міді та латуні. Очевидно, це пов'язано з тим, що швидкість корозії цих металів навіть без інгібіторів корозії була невисокою. В усіх інших середовищах, мінералізація яких була більше за  $25 \text{ г/дм}^3$  ефекту зниження швидкості корозії не спостерігалось. Головна причина в тому, що хлориди та сульфати руйнують захисну пасиваційну плівку.

Про ефективність відомих і розроблених інгібіторів корозії у прісних водах (на прикладі артезіанської води) можна робити висновки за результатами, що наведені на рис. 1.

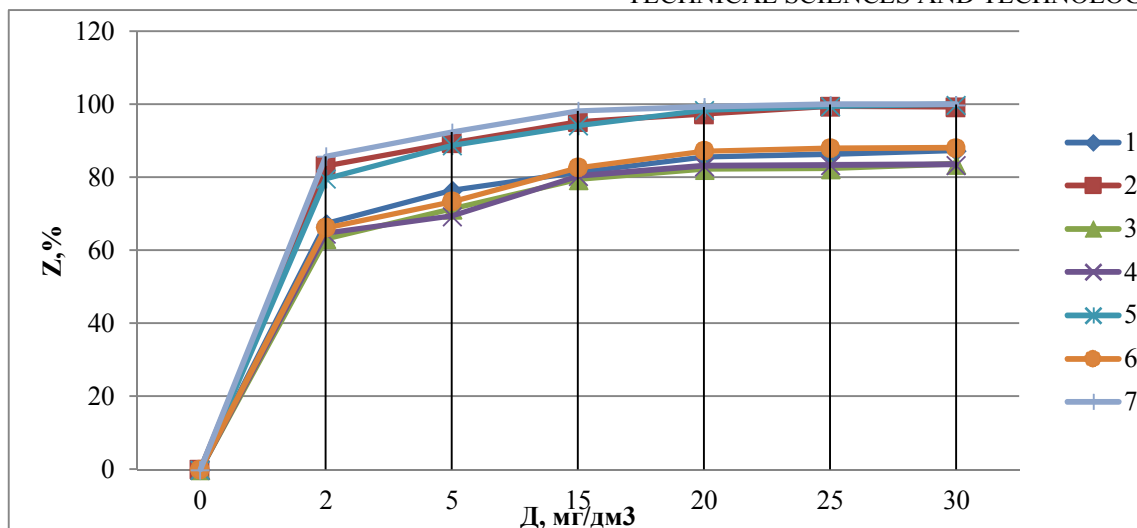


Рис. 1. Залежність ступеню захисту від корозії сталі Ст3 в артезіанській воді при використанні як інгібіторів ОЕДФК (1); ОЕДФК+ $Zn^{2+}$ ; НТМФК (3); ДМСФН (4); ДМСФН+  $Zn^{2+}$  (5); НОЕДМФК (6); НОЕДМФК +  $Zn^{2+}$  (7) при концентрації цинку (2; 4; 6) в концентрації 2 мг/дм<sup>3</sup>

Як видно з рисунку, усі випробувані інгібітори пасиваційного типу в умовах ефектвної аерації води забезпечували надійний захист сталі Ст3 від корозії. Ефект посилювався у присутності іонів цинку, що добре погоджується з механізмами, описаними у роботі [9].

Ефективність інших фосфонатних та фосфінатних інгібіторів була оцінена на прикладі корозії сталі Ст20 (табл. 4).

Таблиця 4

Залежність швидкості корозії та ступеня захисту сталі Ст20 від корозії в модельному розчині № 3 від дози інгібітора пасиваційного типу

Інгібітор	Доза, мг/дм <sup>3</sup>	Швидкість корозії, г/м <sup>2</sup> год	Коефіцієнт гальмування корозії	Ступінь захисту від корозії, %
ОЕДФК	2	0,0589	0,866	-
	5	0,0654	0,962	-
	10	0,0636	0,935	-
НТМФК	5	0,0602	0,885	-
	10	0,0678	1,0	-
	15	0,00618	0,91	-
ДМСФН	5	0,00635	0,94	-
	10	0,00639	0,54	-
	15	0,00677	1,0	-
НОЕДМФК	5	0,00649	0,95	-
	10	0,00651	0,96	-
	15	0,00680	1,0	-

Як видно із табл. 4, у мінералізованому розчині (модельний розчин № 3), жодний із інгібіторів не забезпечив зниження корозії сталі. Очевидно, що за високих концентрацій хлоридів та сульфатів формування пасиваційної кисневої плівки неможливе. При цьому зі зростанням мінералізації розчину знижується розчинність кисню у воді.

Відомо, що в мінералізованих водах кращими є інгібітори адсорбційного типу, які здатні тонкою плівкою сорбуватись на поверхні металу, суттєво знижуючи швидкість окислення металу при взаємодії із водою. Про ефективність використаних нами інгібіторів можна судити по результатах, наведених у табл. 5.



*Ефективність інгібіторів корозії сталі Ст20 адсорбційного типу  
в модельному розчині № 2 (I) та № 3 (II)*

Інгібітор	Доза, мг/дм <sup>3</sup>	Швидкість корозії, г/м <sup>2</sup> год		Коефіцієнт гальмування корозії		Ступінь захисту від корозії, %	
Тіокарбамід	10	0,00649	0,0651	1,047	1,037	4,50	3,85
	25	0,0347	0,0322	1,960	2,096	48,98	52,38
	50	0,0188	0,0211	3,598	3,199	72,22	68,75
1,2,3-бензотріазол	10	0,0490	0,0520	1,389	2,298	78,57	56,52
	25	0,0361	0,0370	1,884	1,824	47,37	55,56
	50	0,0148	0,0162	4,595	4,167	78,26	76,19
п-диметиламінобензойна кислота	10	0,0337	-	2,018	-	-	-
	25	0,0225	-	3,022	-	-	-
	50	0,0210	-	3,238	-	-	-
Бензімідазол	10	0,0540	0,0570	1,259	1,184	20,63	15,54
	25	0,0330	0,0425	2,061	1,588	52,38	37,48
	50	0,0162	0,0193	4,198	3,497	76,20	71,43
Тіосемінарбазид	10	0,0427	-	1,607	-	37,50	-
	25	0,0423	-	1,608	-	37,52	-
	50	0,0331	-	2,054	-	52,38	-

Насамперед треба зазначити, що будь який із використаних інгібіторів був ефективним лише при значних концентраціях 25–50 мг/дм<sup>3</sup>. Із переходом від модельного розчину № 1 до розчину № 3 активність води зростала, а ефективність інгібіторів знижувалась.

Із використаних кращими були бензотріазол та бензімідазол. Ступінь захисту при дозі 50 мг/дм<sup>3</sup> сягав 71–78 %.

Очевидно, що ці інгібітори перспективні при захисті сталі від корозії в мінералізованих водах.

**Висновки відповідно до статті.** Створено нові методи синтезу диметилсульфонатфосфінату натрію та нітрилоксиетилдиметилфосфінової кислоти із доступних реагентів.

Досліджено інгібітори корозії металів на основі диметилсульфонатфосфінату натрію та нітрилоксиетилдиметилфосфонової кислоти. Показано, що вони, разом з іншими фосфонатами, є ефективними інгібіторами корозії металів у прісних водах. Їх ефективність зростає у присутності іонів цинку.

Показано, що інгібітори пасиваційного типу неефективні для захисту від корозії металів у високо мінералізованих водах. Захист металів від корозії забезпечують інгібітори адсорбційного типу.

#### Список використаних джерел

1. Биченок М. М., Іванюта С. П., Яковлев Є. О. Ризики життєдіяльності у природно-техногенному середовищі. Київ: ПП, 2008. 160 с.
2. Тыр С. Г., Боботко З. А., Глушко И. Д. Оценка эффективности ингибиторов в средах оборотного водоснабжения. *Защита металлов*. 1993. Т. 29, № 1. С. 158–160.
3. Волошкіна О. С., Яковлев Є. О., Удод В. М. Питання екологічної безпеки поверхневих водних об'єктів. Київ: ІПНБ, 2007. 139 с.
4. Іванов С. В., Манчук Н. М., Борсук П. С. Загальна хімічна технологія : промислові хіміко-технологічні процеси: навч. посіб. Київ: НАУ, 2010. 280 с.
5. Пуришкевич В. М. Водоподготовка оборотных промышленных вод безсточной системы водообеспечения. *Мир техники и технологий*. 2003. № 6. С. 68–69.
6. Ковальчук А. П. Результат применения ингибитора накипеобразования и коррозии ОЭДФ-цинк в системе теплоснабжения Ростовской ТЭЦ-2. *Промышленная энергетика*. 2004. № 11. С. 34–35.
7. Кузнецов Ю. И. Современное состояние теории ингибирования коррозии металлов. *Защита металлов*. 2002. Т. 38, № 2. С. 122–131.

8. Куц А. В., Гомеля Н. Д., Ставская С. С. Новый фосфорорганический ингибитор коррозии с бактерицидным действием для водооборотных систем охлаждения. *Химия и технология воды*. 2004. Вып. 26, № 1. С. 89–94.

9. Гомеля Н. Д. Новые ингибиторы коррозии и отложений осадков для систем водоциркуляции. *Химия и технология воды*. 2017. Т. 39, № 2 (256). С. 169–177.

### References

1. Bychenok, M. M., Ivaniuta, S. P., Yakovlev, Ye. O (2008). *Ryzyky zhyttiedialnosti u pryrodno-tekhnohennomu seredovyshchi [Risks of vital activity in natural-technogenic environment]*. Kyiv: ПІІ [in Ukrainian].

2. Tyr, S. H., Bobotko, Z. A., Hlushko, I. D. (1993). Otsenka effektivnosti ingibitorov v sredakh oborotnogo vodosnabzheniia [Evaluation of the effectiveness of inhibitors in water recycling environments]. *Zashchita metallov – Metal protection*, 29, 1, 158–160 [in Russian].

3. Voloshkina, O. S., Yakovliev, Ye. O., Udod, V. M. (2007). *Pytannia ekolohichnoi bezpeky poverkhnevyykh vodnykh ob'ektiv [Environmental safety issues for surface water bodies]*. Kyiv: EPNB [in Ukrainian].

4. Ivanov, S. V., Manchuk, N. M., Borsuk, P. S. (2010). *Zahalna khimichna tekhnolohiia: promyslovi khimiko-tekhnolohichni protsesy [General chemical technology: industrial chemical-technological processes]*. Kyiv: NAU [in Russian].

5. Puryshkevych, V. M. (2003). Vodopodgotovka oborotnykh promyshlennykh vod bezstochnoi sistemy vodoobespecheniia [Water treatment of circulating industrial waters of the waste water supply system]. *Mir tekhniki i tekhnologii – World of Engineering and Technology*, 6, 68–69 [in Ukrainian].

6. Kovalchuk, A. P. (2004). Rezultat primeniia ingibitora nakipeobrazovaniia i korrozii OEDF-tcink v sisteme teplosnabzheniia Rostovskoi TETc-2 [The result of the application of scale inhibitor and corrosion OEDP-zinc in the heat supply system of Rostov CHP-2]. *Promyshlennaia enerhetika – Industrial energy*, 11, 34–35 [in Russian].

7. Kuznetsov, Iu. I. (2002). Sovremennoe sostoianie teorii ingibirovaniia korrozii metallov [Current state of the theory of corrosion inhibition of metals]. *Zashchita metallov – Metal protection*, 38 (2), 122–131 [in Russian].

8. Kushch, A. V., Gomelia, N. D., Stavskaiia, S. S. (2004). Novyi fosfororganicheskii ingibitor korrozii s bakteritsidnym deistviem dlia vodooborotnykh sistem okhlazhdeniia [New organophosphorus corrosion inhibitor with bactericidal action for water cooling systems]. *Khimiia i tekhnologiia vody – Chemistry and water technology*, 26 (1), 89–94 [in Russian].

9. Gomelia, N. D. (2017). Novye ingibitory korrozii i otlozhenii osadkov dlia sistem vodotcirkuliatcii. [New corrosion and sediment inhibitors for water circulation systems]. *Khimiia i tekhnologiia vody – Chemistry and water technology*, 39 (2 (256)), 169–177 [in Russian].

UDC 628.164

*Mykola Gomelia, Olena Stepova, Viktor Kamaev*

## DEVELOPMENT OF METAL CORROSION INHIBITORS IN WATER ENVIRONMENTS WITH DIFFERENT MINERALIZATION LEVEL

**Urgency of the research.** The relevance of the topic of the study is due to the severity of the problem of protection of pipelines and equipment from corrosion in contact with natural and waste water, including highly mineralized mine and formation water.

**Target setting.** Today, the use of highly effective inhibitors for the protection of pipelines and equipment from corrosion and sediment in the energy, industry, extractive industries is economically viable and appropriate in terms of protecting the environment from the harmful effects of the discharge or discharge of contaminated waters with high mineralization.

**Actual scientific researches and issues analysis.** The use of passive inhibitors such as oxyethylene dephosphonic acid has been investigated. This reagent provided high stability of water against sediment. Other phosphonic acid-based compositions have also been highly effective in combating corrosion. Effective inhibitors are quite expensive and raw materials for their production are difficult to access in Ukraine.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Creation of effective corrosion inhibitors based on derivatives of phosphorous and dimethylolphosphinic acids, perspective stabilizers of scale formation.

**The research objective.** Determining efficacy as a corrosion inhibitor of known substances in highly corrosive aqueous media, developing affordable, inexpensive new reagents that reliably protect metals from corrosion are areas of research that address many of the problems associated with corrosion.

**The statement of basic materials.** A new method for the synthesis of sodium dimethyl sulfonate phosphonate from sodium hypophosphite, steam form and sodium sulfite was developed, and a new inhibitor, nitriloxyethyl dimethylphosphonic

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

acid, was created by condensation of phosphorous acid with ethanol amine in the presence of formaldehyde. The obtained reagents were used as inhibitors of metal corrosion in aqueous media. They have been shown not to be inferior to the efficacy of other passivation type inhibitors in freshwater. In mineralized waters, adsorption-type inhibitors were effective.

**Conclusions.** New methods for the synthesis of dimethylsulfonate phosphinate of sodium and nitryloxyethyl dimethylphosphonic acid from available reagents have been developed.

Metal corrosion inhibitors based on sodium dimethylsulfonate phosphinate and nitryloxyethyl dimethylphosphonic acid have been investigated. They, along with other phosphonates, have been shown to be effective inhibitors of metal corrosion in freshwater. Their efficiency increases in the presence of zinc ions.

Passivation type inhibitors have been shown to be ineffective in protecting against corrosion of metals in highly mineralized waters. Corrosion protection is provided by adsorption-type inhibitors.

**Keywords:** corrosion; braking factor; the degree of protection against corrosion; phosphonic acids; corrosion inhibitors.

Table: 5. Fig.: 1. References: 9.

**Гомеля Микола Дмитрович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені І. Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

**Gomelya Mykola** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Plant Polymers Ecology and Technology, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

**E-mail:** m.gomelya@kpi.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-1165-7545>

**Scopus Author ID:** 6507653734

**Степова Олена Валеріївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної екології та природокористування, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка (просп. Першотравневий, 24, м. Полтава, 36011, Україна).

**Stepova Olena** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Applied Ecology and Environmental Management, Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk (24 Pershotravnevyy Av., 36011 Poltava, Ukraine).

**E-mail:** alenastepovaja@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-6346-5484>

**Scopus Author ID:** 57193890417

**Камасєв Віктор Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені І. Сікорського», (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

**Kamaiev Viktor** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Plant Polymers Ecology and Technology, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

## РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

УДК 528.72/73

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-284-291

Олексій Терещук, Віктор Мовенко

### ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОДОКОРИСТУВАННЯ САДІВНИЧИХ ТОВАРИСТВ ЧЕРНІГІВЩИНИ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

**Актуальність теми дослідження.** У зв'язку з введенням у дію Закону України № 1830 від 07.02.2017 року «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України, що регулюють відносини, пов'язані з одержання документів дозвільного характеру щодо спеціального водокористування» змінився порядок надання дозволів на спеціальне водокористування, що потребує досліджень та розрахунків водокористування та водовідведення відповідних водокористувачів.

**Постановка проблеми.** Для отримання дозвільних документів щодо спеціального водокористування водокористувачі повинні виконати дослідження й розрахунки потреби у воді та оцінку обсягів водокористування відповідних садівничих товариств та надати технічну документацію в дозвільний центр.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, присвячені проблемам водокористування та водовідведення в сучасних умовах.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Потреби у воді та оцінка обсягів водокористування садівничих товариств, відповідно до сучасних нормативних документів, не досліджені й не визначені.

**Постановка завдання.** Розглянуті дослідження і розрахунки потреб у воді та оцінка обсягів водокористування відповідних садівничих товариств та рекомендації щодо природоохоронних заходів.

**Виклад основного матеріалу.** У статті розглянуто питання вирішення проблем спеціального водокористування садівничих товариств, дослідження й розрахунки їхніх потреб у воді та оцінка обсягів водокористування, запропоновані необхідні природоохоронні заходи.

**Висновки відповідно до статті.** Проведені дослідження садівничих товариств дозволили визначити поливну площу, потреби у воді на поливання садівничих ділянок та обсяги їх водокористування.

**Ключові слова:** спеціальне водокористування; потреби у воді; обсяги водокористування.

Табл.: 4. Рис.: 1. Бібл.: 15.

**Актуальність теми дослідження.** У зв'язку з введенням у дію Закону України від 07.02.2017 року № 830 «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України, що регулюють відносини, пов'язані з одержанням документів дозвільного характеру щодо спеціального водокористування», відповідні дозвільні документи видаються Сектором Держводагенства України в Чернігівській області після погодження державною службою Держгеонадра. Оскільки потреби у воді та оцінка обсягів водокористування садівничих товариств, відповідно до сучасних нормативних документів, не досліджені й невідомі, необхідно проведення науково-дослідних робіт для їх визначення, що і було зроблено згідно з укладеними договорами між ЧНТУ та садівничими товариствами [1; 2].

**Постановка проблеми.** Для отримання дозвільних документів щодо спеціального водокористування водокористувачі повинні виконати дослідження й розрахунки потреби у воді та оцінювання обсягів водокористування відповідних садівничих товариств, а саме обстежити стан водозабору, визначити потреби у воді згідно з ДБН Б.2.5-64:2012, провести розрахунки обсягів водокористування, надати рекомендації щодо природоохоронних заходів, розробити технічну документацію дозвільного характеру щодо спеціального водокористування [3].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Були розглянуті дослідження та публікації у відкритому доступі [4; 5; 6; 7], присвячені проблемам водокористування та водовідведення в сучасних умовах. Матеріали розглянутих досліджень та публікацій були використані під час проведення наукових досліджень та підготовки звітів про науково-дослідні роботи «Дослідження і розрахунки потреби у воді та оцінка обсягів водокористування садівничих товариств «Здоров'я», «Динамо», «Буревісник», «Віраж».

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Потреби у воді та оцінка обсягів водокористування садівничих товариств, відповідно до сучасних нормативних

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

документів, не досліджена і невідома та потребує термінового вирішення для отримання документів дозвільного характеру щодо спеціального водокористування.

**Виклад основного матеріалу.** У 2018-2019 рр. співробітниками навчально-наукового інституту будівництва ЧНТУ в межах виконання науково-дослідних робіт, згідно з договорами № 480/155 від 04.09.2018 р., № 486/18 від 02.10.2018 р., № 489/18 від 31.10.2018 р. «Дослідження і розрахунки потреб у воді та оцінка обсягів водокористування садівничих товариств “Здоров’я”, “Динамо”, “Буревісник”, “Віраж”», були проведені дослідження проблем водокористування названих садівничих товариств та виконані розрахунки потреб у воді й визначені їхні обсяги водокористування [8; 9; 10; 11].

Об’єкти дослідження – садівничі товариства «Здоров’я», «Динамо», «Віраж» розташовані в дачному масиві «Березанка» та зареєстровані за адресою Чернігівська область, Чернігівський район, с. Березанка і розташовані на відстані 0,6-1,5 км від траси Чернігів–Новгород-Сіверський, ліворуч від дороги на Седнів, а садівниче товариство «Буревісник» за адресою Чернігівська область, Чернігівський район, с. Новий Білоус, ліворуч дороги на Гомель, напроти повороту на с. Полуботки.

Загальні площі названих садівничих товариств, визначені після вивчення кадастрових планів та дослідження територій, мають такі значення: садівниче товариство «Здоров’я» – 20,0 га; садівниче товариство «Динамо» – 19,0 га; садівниче товариство «Буревісник» – 16,0 га; садівниче товариство «Віраж» – 22,3 га.

Садівничі товариства «Здоров’я», «Динамо», «Буревісник» та «Віраж» для забезпечення власних потреб у воді на поливання присадибних ділянок експлуатують артезіанські свердловини, які розташовані в межах території товариств (табл. 1).

Таблиця 1

*Характеристики артезіанських свердловин*

№ з/п	Назва товариства	№ свердловини	Дебіт свердловини м <sup>3</sup> /год	Глибина м
1	СТ «Здоров’я»	1	10	95
		2	16	52
2	СТ «Динамо»	1	10	50
		2	10	50
3	СТ «Буревісник»	1	10	75
		2	10	75
4	СТ «Віраж»	1	10	100
		2	10	100

Відповідно до Закону України № 1830 від 07.02.2017 року «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України, що регулюють відносини, пов’язані з одержанням документів дозвільного характеру щодо спеціального водокористування» для одержання дозволу на спеціальне водокористування були досліджені потреби у воді з помісячним нормативним розрахунком водокористування й водовідведення садівничих товариств, надані описи та схеми місць забору води. Для обґрунтування потреб у воді та розрахунку водоспоживання садівничих товариств «Здоров’я», «Динамо», «Буревісник», «Віраж» використані норми водоспоживання, прийняті відповідно до ДБН Б.2.5-64:2012, п.22, додаток А2, ст. 74 (табл. 2) [3].

Нормативний розрахунок водовідведення в садівничих товариствах «Здоров’я», «Динамо», «Буревісник», «Віраж» не проводився у зв’язку з відсутністю скидання зворотних (стічних) вод.

Нормативний розрахунок водокористування у садівничих товариствах «Здоров’я», «Динамо», «Буревісник» та «Віраж» наведений у таблицях 2 та 3 [12].

## Розрахунок водоспоживання садівничих товариств

№ з/п	Найменування водоспоживачів	Один. вимір	Норми водопостачання л/ кв.м / добу	Робочих днів на рік	Кількість водоспож. проектна м <sup>2</sup> /діл	Кількість водоспож. фактична	Водоспоживання проектне	
							м <sup>3</sup> / добу	тис.м <sup>3</sup> / рік
1	Поливання присадибних ділянок СТ «Здоров'я»	кв. м	3	150	200000 /400	200000 /400	600,0	90,0
2	Поливання присадибних ділянок СТ «Динамо»	кв. м	3	150	190000 /380	190000 /380	570,0	85,5
3	Поливання присадибних ділянок СТ «Буревісник»	кв. м	3	150	160000 /400	160000 /400	480,0	72,0
4	Поливання присадибних ділянок СТ «Віраж»	кв. м	3	120	223000 /446	223000 /446	669,0	80,28

Таблиця 3

## Нормативний розрахунок водокористування

Показник	Площа м <sup>2</sup>	Норма витрат води на одиницю виміру, м <sup>3</sup> /добу / нормативний документ (підстава)	Загальний показник, м <sup>3</sup> /добу	Кількість днів роботи на рік	Загальний показник, тис. м <sup>3</sup> /рік
<b>Використання води на власні потреби, усього,</b>		0,003/ДБН Б.2.5-64:2012			
СТ «Здоров'я»	200000	Розрахунок додається (таблиця 2)	600,0	150	90,0
СТ «Динамо»	190000		600,0	150	85,5
СТ «Буревісник»	160000		570,0	150	72,0
СТ «Віраж»	223000		480,0	120	80,28
<b>у тому числі:</b>				669,0	
поливання присадибних ділянок садівничого товариства:					
СТ «Здоров'я»	200000		600,0	150	90,0
СТ «Динамо»	190000		570,0	150	85,5
СТ «Буревісник»	160000		480,0	150	72,0
СТ «Віраж»	223000		669,0	120	80,28

Помісячний нормативний розрахунок загальних показників водокористування і водовідведення в садівничих товариствах «Здоров'я», «Динамо», «Буревісник», «Віраж» наведений у табл. 4 [12].

Таблиця 4

## Помісячний нормативний розрахунок загальних показників водокористування

Показник	Місяці					Усього за рік, тис. м <sup>3</sup>
	Травень тис. м <sup>3</sup>	Червень тис. м <sup>3</sup>	Липень тис. м <sup>3</sup>	Серпень тис. м <sup>3</sup>	Вересень тис. м <sup>3</sup>	
Використання води на поливання присадибних ділянок садівничого товариства:						
СТ «Здоров'я»	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	90,0
СТ «Динамо»	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	85,5
СТ «Буревісник»	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	72,0
СТ «Віраж»	20,07	20,07	20,07	20,07	-	80,28

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Експлуатаційні характеристики артезіанських свердловин дозволяють забезпечити розрахунковий обсяг водопостачання без виснаження водоносного горизонту й повністю задовольнити потреби у воді садівничі товариства «Здоров'я», «Динамо», «Буревісник» та «Віраж».

Оскільки садівничі товариства «Здоров'я», «Динамо», «Буревісник» та «Віраж» для забезпечення власних потреб у воді на поливання присадибних ділянок експлуатують артезіанські свердловини, які розташовані в межах території товариств, вони повинні виконувати норми законодавства щодо охорони навколишнього природного середовища. Саме тому при розробці нормативної документації були передбачені такі природоохоронні заходи:

- 1) утримувати зони санітарної охорони артезіанських свердловин відповідно до вимог ДБН В.2.5-74:2013;
- 2) здійснювати підтримку повної технічної готовності обладнання і герметичності трубопроводів;
- 3) дотримуватися природоохоронних засобів, передбачених відповідними матеріалами оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС);
- 4) проводити систематичний контроль за герметичністю клапанів, арматури та з'єднань трубопроводів;
- 5) здійснювати облік забраної води з артсвердловин за допомогою лічильників;
- 6) забезпечити ведення журналу обліку води;
- 7) дотримуватися встановлених лімітів забору та використання води;
- 8) подавати звіт форми 2ТП до органів державного контролю – Чернігівського міського управління водного господарства;
- 9) здійснювати заходи, що забезпечують поліпшення екологічного стану водного об'єкта.

Природоохоронні заходи спрямовуються на охорону вод, зменшення рівня забруднення та забезпечення раціонального використання водних та інших природних ресурсів і повинні мати вимірювані критерії (показники) досягнення результативності та терміни виконання [13; 14; 15].

Норма водоспоживання для поливання присадибних ділянок прийнята 3 л/кв. м/добу, згідно з ДБН В.2.5-64:2012, п. 22 додаток А2, ст. 74, що дозволило визначити обсяги поливної води для садівничих товариств «Здоров'я», «Динамо», «Буревісник» та «Віраж». Для порівняння опадів у поливний період на територіях названих садівничих товариств з нормою полива використаємо дані спостережень гідрометеостанції Чернігів за 1944-2018 роки та побудуємо графіки опадів у поливний період (рис. 1).

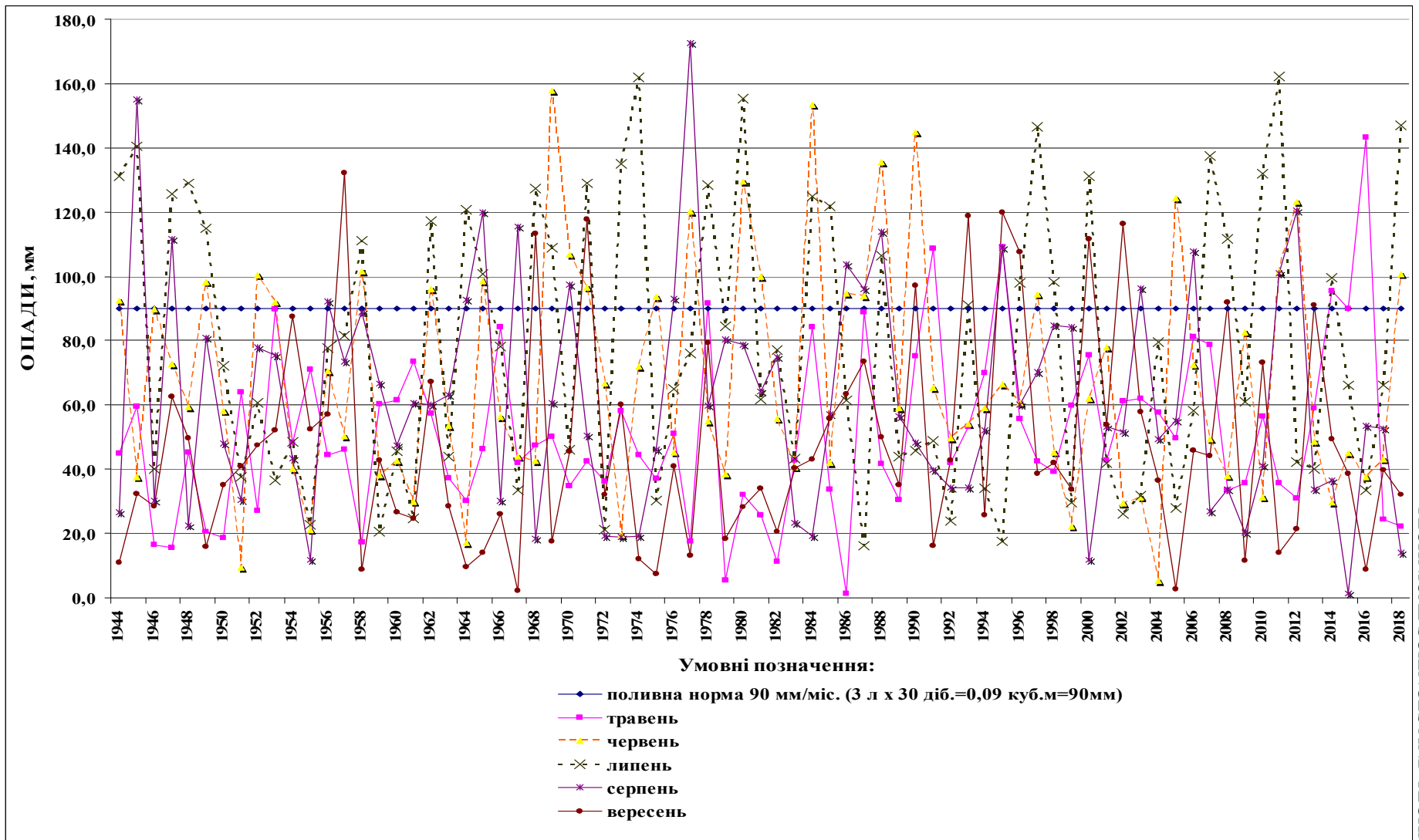


Рис. 1. Графік опадів (мм) у поливний період (травень-вересень) за даними спостережень гідрометеобюро Чернігів (1944-2018 рр.)



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

**Висновки відповідно до статті.** Виконані дослідження садівничих товариств «Здоров'я», «Динамо», «Буревісник» та «Віраж» дозволили визначити кількість садівничих ділянок та поливні площі товариств, які потребують поливання протягом 120-150 діб.

Розрахунки потреб у воді й визначені обсяги водокористування відповідно до ДБН В.2.5-64:2012 «Внутрішній водопровід та каналізація. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво», отримали такі значення:

- садівниче товариство «Здоров'я» – 600,0 м<sup>3</sup>/добу, 90,0 тис. м<sup>3</sup>/рік;
- садівниче товариство «Динамо» – 570,0 м<sup>3</sup>/добу, 85,5 тис. м<sup>3</sup>/рік;
- садівниче товариство «Буревісник» – 480,0 м<sup>3</sup>/добу, 72,0 тис. м<sup>3</sup>/рік;
- садівниче товариство «Віраж» – 669,0 м<sup>3</sup>/добу, 80,28 тис. м<sup>3</sup>/рік.

Графік опадів у поливний період (рис. 1) за 1944-2018 рр. показав, що забезпечення зволоження земель за рахунок опадів більше прийнятої поливної норми відбувалося лише частково таким чином: травень – у 4 %, червень – у 23 %, липень – у 21 %, серпень – у 15 %, вересень – у 9 % періоду спостережень. Таким чином, графік підтверджує необхідність поливання присадибних ділянок садівничих товариств та прийняту поливну норму 3 л/кв. м/добу. Враховуючи дані опадів у поливний період, як видно з графіка, можна рекомендувати садівничим товариствам збільшити поливання присадибних ділянок у травні, серпні за рахунок зменшення поливання в червні-липні, оскільки загальний обсяг водоспоживання розрахований згідно із сучасними нормами та дебітами наявних свердловин. У випадку нестачі води для поливання необхідно встановлення більш потужних насосів у артезіанських свердловинах (якщо це дозволяє дебіт скважини) або будівництво додаткових артезіанських свердловин.

Експлуатаційні характеристики артезіанських свердловин дозволяють забезпечити розрахунковий обсяг водопостачання без виснаження водоносних горизонтів і повністю задовільнити потреби у воді досліджувані садівничі товариства.

Спираючись на ст. 1, ст. 24, ст. 25 Закону України № 1268-ХІІ від 26.06.1991 «Про охорону навколишнього природного середовища» садівничим товариствам «Здоров'я», «Динамо», «Буревісник» та «Віраж» рекомендовано виконати запропоновані вище природоохоронні заходи [13].

Проведені дослідження й розрахунки оформлені та надані садівничим товариствам як технічна документація дозвільного характеру щодо спеціального водокористування для отримання дозволу на спеціальне водокористування.

#### Список використаних джерел

1. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України, що регулюють відносини пов'язані з одержанням документів дозвільного характеру щодо спеціального водокористування: Закон України № 1830 від 07.02.2017 року.
2. Про затвердження Порядку видачі дозволів на спеціальне водокористування: Постанова Кабінету Міністрів України № 321 від 13.03.2002 р. (із змінами від 16.12.2015 року).
3. Державні будівельні норми ДБН.2.5-64:2012.
4. Водний кодекс України від 06.06.1998 р. № 214/95.
5. Волосецький Б. І. Інженерна геодезія. Геодезичні роботи для проектування і будівництва водогосподарських та гідротехнічних споруд: навч. посіб. Львів: Видавництво «Львівська політехніка», 2003. 144 с.
6. Глотов В., Чижевський В., Терещук О., Мовенко В. Розроблення технології оцінки стану берегової лінії русел середніх і великих рік України. *Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК "Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва"*. 2007. Вип. 1. С. 180–184.
7. Мамонтова Л. С. Огляд існуючих методів і засобів моніторингу гідрологічних характеристик водних об'єктів. *Часопис картографії*. 2013. Вип. 2. С. 235-247.
8. Звіт про науково-дослідну роботу за договором № 480/155 від 04.09.2018 р. «Дослідження і розрахунки потреби у воді та оцінка обсягів водокористування садівничого товариства "Здоров'я"». Чернівці, 2018. 17 с.

9. Звіт про науково-дослідну роботу за договором №486/18 від 02.10.2018 р. «Дослідження і розрахунки потреби у воді та оцінка обсягів водокористування садівничого товариства “Динамо”». Чернігів, 2018. 15 с.

10. Звіт про науково-дослідну роботу за договором № 489/18 від 31.10.2018 р. «Дослідження і розрахунки потреби у воді та оцінка обсягів водокористування садівничого товариства “Буревісник”». Чернігів, 2018. 14 с.

11. Звіт про науково-дослідну роботу за договором № 494/18 від 15.01.2019 р. «Дослідження і розрахунки потреби у воді та оцінка обсягів водокористування садівничого товариства “Віраж”». Чернігів, 2019. 12 с.

12. Про затвердження Порядку ведення державного обліку водокористування: Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України № 78 від 16 березня 2015 року за погодженням з Держстатом.

13. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 року № 1264-ХІІ.

14. Василенко О. А., Литвиненко Л. Л., Квартенко О. М. Рациональное використання та охорона водних ресурсів: навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2007. 246 с.

15. Левківський С. С. Рациональное використання та охорона водних ресурсів. Київ: Либідь, 2006. 278 с.

### References

1. Pro vnesennia zmin do deiakykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy, shcho rehuliuuiut vidnosyny poviazani z oderzhanniam dokumentiv dozvil'nogo kharakteru shchodo spetsialnogo vodokorystuvannia [On making alteration in some legislative acts of Ukraine, which regulate relations related to the receipt of documents of dozvil'nogo character in relation to the special water consumption]. № 1830 (07.02.2017).

2. Pro zatverdzhennia Poriadku vydachi dozvoliv na spetsialne vodokorystuvannia [About claim of Order of delivery of permissions on the special water consumption]. № 321 (13.03.2002).

3. Derzhavni Budivelni Normy DBN.2.5-64:2012 [State Build Norms of DBN.2.5-64:2012].

4. Vodnyi kodeks Ukrainy [Water code of Ukraine]. № 214/95 (06.06.98).

5. Volosetskyi, B. I. (2003). Inzhenerna heodeziia. Heodezychni roboty dlia proektuvannia i budivnytstva vodohospodarskykh ta hidrotekhnichnykh sporud [Engineering geodesy. Geodesical works for projecting and building water supply and hydrotechnical structures]. Lviv: Vydavnytstvo - Lvivska politekhnikha [in Ukrainian].

6. Hlotov, V., Chyzhevskiy, V., Tereshchuk, O., Movenko, V. (2007). Rozroblennia tekhnolohii otsinky stanu berehovoi linii rusel serednikh i velykykh rik Ukrainy [Development of technology of estimation of the state of coastline of river-beds middle and large rivers of Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats Zakhidnogo heodezychnoho tovarystva UTHK “Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Collection of scientific works of the Western Geodetic Society of UTGK “Modern achievements of geodetic science and production, 1, 180–184 [in Ukrainian].*

7. Mamontova, L. S. (2013). Ohliad isnuuiuchykh metodiv i zasobiv monitorynhu hidrolohichnykh kharakterystyk vodnykh obiektiv [Mamontova L.S. Review of existent methods and facilities of monitoring of hydrological descriptions of water objects]. *Chasopys kartohrafi – Cartography magazine, 2, 235-247 [in Ukrainian].*

8. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu za dohovorum № 480/155 vid 04.09.2018 r. “Doslidzhennia i rozrakhunky potreby u vodi ta otsinka obsiahiv vodokorystuvannia sadivnychoho tovarystva “ZDOROVIA” [Research and calculations of requirement in water and estimation of volumes of water consumption of society of gardener of “HEALTH”] (2018). Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].

9. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu za dohovorum № 480/155 vid 04.09.2018 r. “Doslidzhennia i rozrakhunky potreby u vodi ta otsinka obsiahiv vodokorystuvannia sadivnychoho tovarystva “DYNAMO” [Research and calculations of requirement in water and estimation of volumes of water consumption of society of gardener of “DYNAMO”] (2018). Chernihiv; ChNTU [in Ukrainian].

10. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu za dohovorum № 489/18 vid 31.10.2018 r. “Doslidzhennia i rozrakhunky potreby u vodi ta otsinka obsiahiv vodokorystuvannia sadivnychoho tovarystva “BUREVISNYK” [Research and calculations of requirement in water and estimation of volumes of water consumption of society of gardener of “BUREVISNYK”]. (2018). Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

11. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu za dohovorom №492/18 vid 18.01.2019r.. "Doslidzhennia i rozrakhunky potreby u vodi ta otsinka obsiahiv vodokorystuvannia sadivnychoho tovarystva "VYRAZH" [Research and calculations of requirement in water and estimation of volumes of water consumption of society of gardener of "VYRAZH"] (2019). Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].

12. Pro zatverdzhennia Poriadku vedennia derzhavnogo obliku vodokorystuvannia [On Approval of the Procedure for Keeping the State Account of Water Use]. № 78 (16.03.2015).

13. Pro okhoronu navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha [About the guard of natural environment]. № 1264-KhII (25.06.1991).

14. Vasylenko, O. A., Lytvynenko, L. L., Kvarthenko, O. M. (2007). *Ratsionalne vykorystannia ta okhrona vodnykh resursiv [Rational use and protection of water resources]*. Rivne: NUVHP [in Ukrainian].

15. Levkivskiy, S.S. (2006). *Ratsionalne vykorystannia ta okhrona vodnykh resursiv [Rational use and security of water resources]*. Kyiv: Lybid [in Ukrainian].

UDC 528.72/73

*Oleksii Tereshchuk, Victor Movenko*

### PROBLEMS OF WATER USE OF GARDENING SOCIETIES OF CHERNIHIVSHCHYNA IN MODERN CONDITIONS

**Urgency of the research.** Due to the enforcement of the law of Ukraine No. 1830 of 07.02.2017 "About introduction of amendments to some acts of Ukraine which govern the relations connected with obtaining documents of allowing character on special water use", the order of obtaining permissions to special water use changed that demands researches and calculations of water use and water disposal of the corresponding water users.

**Target setting.** For obtaining allowing documents for special water use water users have to execute researches and calculations of requirement of water and assessment of volumes of water use of the studied garden associations and to submit technical documentation to the allowing center.

**Actual scientific researches and issues analysis.** The last publications in open access devoted to problems of water use and water disposal in modern conditions were considered.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Requirements in water and estimation of volumes of water consumption of societies of gardener in obedience to modern normative documents not investigational.

**The research objective.** Researches and calculations of requirement of water, assessment of volumes of water use of the relevant garden associations and the recommendation about questions of conservation are considered.

**The statement of basic materials.** In article questions of the solution of problems of water use of garden associations, researches and calculations of requirement of water and assessment of volumes of water use are considered, necessary recommendations about questions of conservation are offered.

**Conclusions.** The conducted researches of territories of garden associations allowed to determine the irrigation area, requirements of water for watering of garden sites and volumes of their water use.

**Keywords:** special water use; requirements of water; water use volumes.

Table: 4. Fig.: 1. References: 15.

**Терещук Олександр Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, директор навчально-наукового інституту будівництва, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Белова, 4, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Tereshchuk Oleksiy** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Director of Education and Research Institute of Construction, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv National University of Technology (4 Bielova Str., 14035, Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** olexter1957@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6433-9351>

**ResearcherID:** <http://www.researcherid.com/rid/H-4540-2016>

**Google Scholar:** <https://scholar.google.com.ua/citations?user=vZtF4YIAAAAJ&hl=uk>

**Інші:** <http://journals.indexcopernicus.com/+++p24781806,3.html>

**Мовенко Віктор Іванович** – старший викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Белова 4, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Movenko Victor** – senior lecturer of Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv National University of Technology (4 Bielova Str., 14035, Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** viktor.movenko@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-3395-3476>

**ResearcherID:** <http://www.researcherid.com/rid/H-2364-2016>

**Google Scholar:** <https://scholar.google.com.ua/citations?user=YNglHagAAAAJ&hl=uk>

УДК 528.3

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-3(17)-292-302

Сергій Крячок, Людмила Мамонтова, Юлія Щербак

## ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩ ЗЕМЕЛЬНИХ ДІЛЯНОК ПОЛЮСНИМ МЕТОДОМ

**Актуальність теми дослідження.** Визначення площ територій є одним із головних завдань геодезичного супроводу землеустрою. Достовірність інформації про земельні ресурси безпосередньо пов'язана з точністю визначення площ земельних угідь. Необхідність у визначенні площі виникає і під час вирішення містобудівних завдань, проведення рекреаційних робіт, вертикального планування будівельних майданчиків, прогнозування територій підтоплення та лісових пожеж.

**Постановка проблеми.** Є такі методи визначення площ: графічний, інструментальний, аналітичний. Графічний метод передбачає застосування спеціально розграфлених палеток із прозорого матеріалу, які накладаються на картографічне зображення ділянки. Площу підраховують за кількістю елементарних фігур у вигляді прямокутників з відомою площею. Інструментальний метод потребує використання механічних чи електронних планіметрів. Площа ділянки на її картографічному зображенні визначається після обведення контуру спеціальним важелем з маркою за різницею відліків за шкалою планіметра. Найбільш точним є аналітичний метод. Він передбачає визначення площі ділянки за координатами точок, розташованих на контурі ділянки, з використанням відповідного математичного апарату.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, які присвячені точності визначення площ аналітичним методом.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Недослідженою є точність визначення площ земельних ділянок полюсним методом з урахуванням кореляційних залежностей між суміжними горизонтальними кутами, вимірними на межових знаках.

**Мета статті.** Головною метою статті є теоретичне обґрунтування точності визначення площ земельних ділянок полюсним методом з урахуванням кореляційної залежності між суміжними горизонтальними кутами, вимірними на межових знаках.

**Виклад основного матеріалу.** Виконано теоретичне обґрунтування визначення площ земельних ділянок у вигляді багатокутників полюсним методом з урахуванням вимірних горизонтальних кутів та довжини базису. На основі отриманих формул визначено вирази для часткових похідних. З урахуванням кореляційної залежності між горизонтальними кутами виведені формули для визначення середньої квадратичної похибки визначення площ земельних ділянок із конфігурацією меж у вигляді багатокутника. Виконано спрощення загальних формул для визначення точності площ ділянок у вигляді правильного трикутника та п'ятикутника, прямокутника, квадрата. Наведено розрахунки точності площ земельних ділянок для вказаних фігур за спрощеними формулами.

**Висновки відповідно до статті.** Виконано теоретичне обґрунтування точності визначення площ земельних ділянок полюсним методом з урахуванням кореляційної залежності між горизонтальними кутами, вимірними на межових знаках. Загальні формули спрощені для випадків конфігурації меж у вигляді правильного трикутника та п'ятикутника, прямокутника та квадрата. Наведено приклади обчислення точності визначення площ для вказаних фігур.

**Ключові слова:** полюсний метод; площа земельної ділянки; коефіцієнт кореляції.

Рис.: 3. Бібл.: 14.

**Актуальність теми дослідження.** Визначення площ територій є одним із головних завдань геодезичного супроводу землеустрою. Достовірність інформації про земельні ресурси безпосередньо пов'язана з точністю визначення площ земельних угідь. Необхідність у визначенні площі виникає і під час вирішення містобудівних завдань, проведення рекреаційних робіт, будівництва доріг, вертикального планування будівельних майданчиків, прогнозування територій підтоплення та лісових пожеж.

**Постановка проблеми.** Є такі методи визначення площ: графічний, інструментальний, аналітичний [1; 2].

Графічний метод передбачає застосування спеціально розграфлених палеток із прозорого матеріалу, які накладаються на картографічне зображення ділянки. Площу підраховують за кількістю елементарних фігур у вигляді прямокутників з відомою площею. Якщо контури ділянки утворені відрізками прямих ліній, то ділянку можна розчленувати на окремі трикутники, площі яких обчислюються за відомими формулами.

Інструментальний метод потребує використання механічних чи електронних планіметрів. Площа ділянки на її картографічному зображенні визначається після обведення її контуру спеціальним важелем із маркою за різницею відліків за його шкалою, помноженою на ціну поділки шкали планіметра.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Найбільш точним є аналітичний метод. Він передбачає визначення площі ділянки за координатами точок, розташованих на контурі ділянки з використанням відповідного математичного апарату.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У публікації [3] проведено аналіз формул із розрахунку середніх квадратичних похибок (СКП) визначення площ земельних ділянок за координатами межових знаків. Встановлено, що наведені в цьому джерелі формули, по суті, є подібними, але відрізняються різними аргументами (площа ділянки, довжина межі, довжина діагоналі). Запропоновано нову формулу для визначення площі земельної ділянки, координати межових знаків якої визначаються за допомогою GPS, а саме

$$m_p = \frac{m}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n l_i^2}, \quad (1)$$

де  $m_p$  – СКП визначення площі ділянки,  $m$  – СКП визначення координат межових знаків,  $l$  – горизонтальні відстані між межовими знаками.

У статті [4] наведено формулу для обчислення СКП площі:

$$m_p = \frac{m}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum d_i^2 - \sum d_{i-1} d_{i+1} \cos \beta}, \quad (2)$$

де  $d_i$  – довжина межі земельної ділянки,  $\beta$  – кут між суміжними межами.

На нашу думку, формула (2) дозволяє точніше визначити СКП площі, оскільки враховує значення кутів на поворотах меж.

У публікації [5] виконана прив'язка точності планового положення межового знаку  $m_t$  до вартості земельної ділянки прямокутної форми та виведена формула:

$$m_t = \frac{m_{\mathcal{U}_0}}{4 \cdot \mathcal{U}_0} \sqrt{\frac{2P \cdot k}{1 + k^2}}, \quad (3)$$

де  $m_{\mathcal{U}_0}$  – СКП визначення ціни 1 м<sup>2</sup> земельної ділянки;  $\mathcal{U}_0$  – ціна 1 м<sup>2</sup> земельної ділянки;  $k$  – коефіцієнт видовження (відношення довжини земельної ділянки до її ширини).

Праця [6] присвячена визначенню площ і точності визначення площ об'єктів нерухомості: багатокутної форми за координатами вершин; за кутовими, лінійними вимірами та за визначенням різниць координат, що мають форму елементарних фігур. Розглянуто питання редукації площ на поверхню земного еліпсоїда, обчислення площі горизонтальної проекції ділянки та площі фізичної поверхні ділянки. Звернуто увагу на визначення площ ділянок на планах і картах.

У монографії [7] висвітлено стан та проблеми визначення площ територій. Запропоновано провести класифікацію земель за величиною їх територій. Також наведено класифікацію методів визначення площ за інструментальними засобами вимірювань та способом редукування територій на поверхню відносності. Виконано обґрунтування строгих математичних методів визначення та оцінки точності визначення площ земель за координатами вершин контурів. Враховано редукацію територій на горизонтальну площину методом ортогонального проектування, на площини картографічних проекцій та на поверхню земного еліпсоїда.

У джерелі [8] виконано теоретичне обґрунтування полюсного методу визначення площ земельних ділянок. Метод ґрунтується на вимірюванні горизонтальних кутів на кожному межовому знаку в напрямку на два суміжні межові знаки та на висотний орієнтир у середині ділянки – полюс. Щоб задати масштаб полюсній фігурі, визначають як мінімум одну відстань між двома межовими знаками. Для прив'язки до систем координат визначають координати одного чи кількох межових знаків.

Приклад реалізації полюсного методу для визначення координат межових знаків та площі земельної ділянки за цими координатами наведено у джерелі [9].

Подальший розвиток полюсного методу з метою визначення відмітки висотної споруди – полюсу на приаеродромній території, наведено у статті [10]. Для цього на станції, крім відліків за горизонтальним кругом теодоліта чи електронного тахеометра, беруть відліки за вертикальним кругом та обчислюють кути нахилу в напрямку на висотну споруду. Визначення відміток (висот) висотних перешкод на приаеродромній території є актуальним для безпеки польотів повітряних суден [11].

Однак у публікаціях, присвячених теоретичному обґрунтуванню та реалізації полюсного методу, відсутня інформація про визначення точності площ земельних ділянок. Можна було б обчислювати точність визначення площі за відомими формулами, наприклад (2), які відповідають визначенню координат межових знаків через прокладання теодолітного чи полігонометричного ходу по знаках. У цьому випадку горизонтальні кути вимірюють способом прийомів і на кожному межовому знакові отримують один кут. У цьому випадку кожен кут вимірюється окремо та є незалежною величиною. Але в полюсному методі на кожному межовому знаку маємо три напрямки: два – на суміжні знаки та один в напрямку на полюс. Тому кути вимірюють способом кругових прийомів, отримують значення двох кутів, які через спільний напрямок – на полюс, корелюють між собою [12].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Недослідженою є точність визначення площ земельних ділянок полюсним методом з урахуванням кореляційних залежностей між суміжними горизонтальними кутами, виміряними способом кругових прийомів на межових знаках.

**Мета статті.** Головною метою цієї статті є теоретичне обґрунтування точності визначення площ земельних ділянок полюсним методом з урахуванням кореляційної залежності між суміжними горизонтальними кутами, виміряними на межових знаках.

**Виклад основного матеріалу.** Нехай полюсна мережа має форму трикутника (рис. 1). Земельні ділянки такої форми, безумовно, рідкість, наприклад, у центрі ділянки розташована висока щогла, а в точках  $A$ ,  $B$ ,  $C$  знаходяться її розтяжки. Проте це одна з найпростіших фігур, з якої варто розпочати дослідження точності визначення площ земельних ділянок полюсним методом.

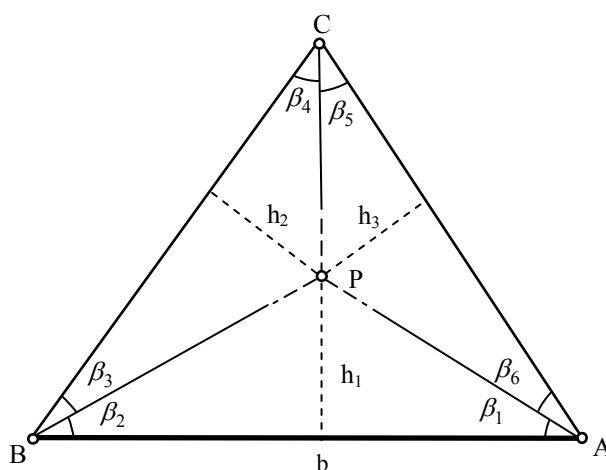


Рис. 1. Полюсна мережа у формі трикутника

Площа першого трикутника  $ABP$  (рис. 1) дорівнює

$$S_1 = \frac{b \cdot h_1}{2} = \frac{b \cdot AP \sin \beta_1}{2} = \frac{b^2 \sin \beta_1 \sin \beta_2}{2 \sin(\beta_1 + \beta_2)}. \quad (1)$$

Використовуючи такий же алгоритм обчислень, площі другого та третього трикутників дорівнюють

$$S_2 = \frac{b^2 \sin^2 \beta_1 \sin \beta_3 \sin(\beta_3 + \beta_4)}{2 \sin^2(\beta_1 + \beta_2) \sin \beta_4}, \tag{2}$$

$$S_3 = \frac{b^2 \sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_3 \sin \beta_5 \sin(\beta_5 + \beta_6)}{2 \sin^2(\beta_1 + \beta_2) \sin^2 \beta_4 \sin \beta_6}. \tag{3}$$

Площа всієї фігури

$$P_3 = S_1 + S_2 + S_3. \tag{4}$$

На рис. 2 показано полюсні мережі у формі чотирикутника та п'ятикутника. Площа чотирикутника визначається за формулою

$$P_4 = \frac{b^2}{2} \left[ \frac{\sin \beta_1 \sin \beta_2}{\sin(\beta_1 + \beta_2)} + \frac{\sin^2 \beta_1 \sin \beta_3 \sin(\beta_3 + \beta_4)}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2) \sin \beta_4} + \frac{\sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_3 \sin \beta_5 \sin(\beta_5 + \beta_6)}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2) \sin^2 \beta_4 \sin \beta_6} + \frac{\sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_3 \sin^2 \beta_5 \sin \beta_7 \sin(\beta_7 + \beta_8)}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2) \sin^2 \beta_4 \sin^2 \beta_6 \sin \beta_8} \right]. \tag{5}$$

Площа п'ятикутника дорівнює

$$P_5 = \frac{b^2}{2} \left[ \frac{\sin \beta_1 \sin \beta_2}{\sin(\beta_1 + \beta_2)} + \frac{\sin^2 \beta_1 \sin \beta_3 \sin(\beta_3 + \beta_4)}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2) \sin \beta_4} + \frac{\sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_3 \sin \beta_5 \sin(\beta_5 + \beta_6)}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2) \sin^2 \beta_4 \sin \beta_6} + \frac{\sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_3 \sin^2 \beta_5 \sin \beta_7 \sin(\beta_7 + \beta_8)}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2) \sin^2 \beta_4 \sin^2 \beta_6 \sin \beta_8} + \frac{\sin^2 \beta_1 \sin^2 \beta_3 \sin^2 \beta_5 \sin^2 \beta_7 \sin \beta_9 \sin(\beta_9 + \beta_{10})}{\sin^2(\beta_1 + \beta_2) \sin^2 \beta_4 \sin^2 \beta_6 \sin^2 \beta_8 \sin \beta_{10}} \right]. \tag{6}$$

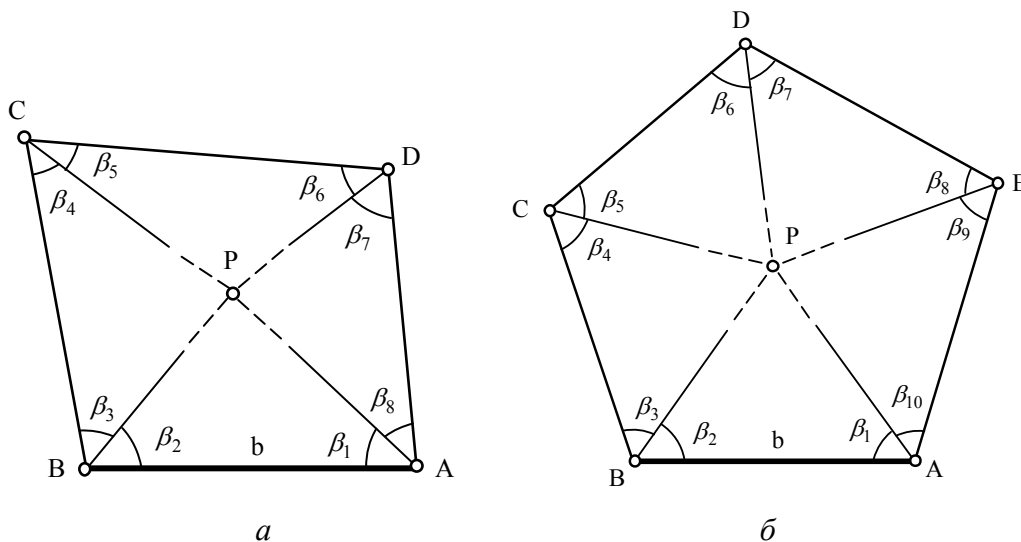


Рис. 2. Полюсні мережі у формі:  
а – чотирикутника; б – п'ятикутника

З огляду на формули (3), (5), (6) можна помітити закономірність для написання формули площі полюсної фігури. Якщо нумерацію кутів у трикутнику виконувати згідно з рис. 3, то кожна наступна фігура буде прибавляти доданок, що містить у чисельнику добутки: квадратів синусів непарних кутів, починаючи з першого до передостаннього та синуса останнього непарного кута на синус суми двох останніх кутів. У знаменнику знаходяться

добутки: квадрата синуса суми першого та другого кутів на квадрати синусів парних кутів, починаючи з другого до передостаннього та синуса останнього парного кута.

Для обчислення середньої квадратичної похибки визначення площі ділянки за результатами вимірів полюсним методом необхідно знайти часткові похідні площі за окремими аргументами, користуючись формулами (3), (5) та (6). Тоді для полюсної мережі у вигляді багатокутника з  $n$ -сторонами можна записати

$$\frac{dP_n}{db} = 2P_n \frac{1}{b}, \quad (7)$$

$$\frac{dP_n}{d\beta_1} = (S_1 + 2S_2 + \dots + 2S_n)[ctg\beta_1 - ctg(\beta_1 + \beta_2)], \quad (8)$$

$$\frac{dP_n}{d\beta_2} = S_1 ctg\beta_2 - (S_1 + 2S_2 + \dots + 2S_n) ctg(\beta_1 + \beta_2), \quad (9)$$

$$\frac{dP_n}{d\beta_3} = S_2 ctg(\beta_3 + \beta_4) + (S_2 + 2S_3 + \dots + 2S_n) ctg\beta_3, \quad (10)$$

$$\frac{dP_n}{d\beta_4} = S_2 ctg(\beta_3 + \beta_4) - (S_2 + 2S_3 + \dots + 2S_n) ctg\beta_4, \quad (11)$$

$$\frac{dP_n}{d\beta_{(2i-1)}} = S_i \cdot ctg(\beta_{2i-1} + \beta_{2i}) + (S_i + 2 \sum_{k=i+1}^n S_k) ctg\beta_{(2i-1)}, \quad (12)$$

$$\frac{dP_n}{d\beta_{2i}} = S_i \cdot ctg(\beta_{2i-1} + \beta_{2i}) - (S_i + 2 \sum_{k=i+1}^n S_k) ctg\beta_{2i}, \quad (13)$$

де  $i$  – номер трикутника.

Необхідно врахувати попарні кореляційні зв'язки між парними та непарними номерами горизонтальних кутів, розташованих при кожній вершині (рис. 1 та 2). Такі кути вимірюються не окремо (незалежно один від одного), а способом кругових прийомів. У цьому випадку їх зв'язок визначається коефіцієнтом кореляції, який дорівнює  $-0,5$  [13].

Загальна формула з визначення СКП площі за полюсним методом має вигляд:

$$m_{P_n}^2 = 4P_n^2 \frac{m_b^2}{b^2} + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \left[ \sum_{m=1}^{2n} \left( \frac{dP_n}{d\beta_m} \right)^2 - \sum_{m=1}^n \left( \frac{dP_n}{d\beta_{2m}} \right) \left( \frac{dP_n}{d\beta_{2m+1}} \right) \right], \quad (14)$$

де  $P_n$  – площа полюсної мережі, яка складається з  $n$  трикутників,  $m_b$  – СКП визначення довжини базису  $b$ ,  $m_\beta$  – СКП вимірювання горизонтальних кутів,  $\rho = 206265''$ ,  $m$  – поточний номер кута.

Спростити формулу (14) можна для фігур з рівними сторонами та вважати, що полюс  $P$  знаходиться в центрі фігури. Тоді внутрішні трикутники будуть рівнобедреними, а кути  $\beta_i$  – рівними. Оскільки сума внутрішніх кутів у замкненої фігури з  $n$  кутами дорівнює  $180(n-2)$ , а число виміряних кутів у полюсній мережі  $2n$ , то в цьому випадку величина кута становитиме

$$\beta = \frac{180^\circ(n-2)}{2n}. \quad (15)$$

Для рівностороннього трикутника  $\beta = 30^\circ$ ,  $\beta_1 + \beta_2 = 2\beta = 60^\circ$ , а  $ctg30^\circ = \sqrt{3}$ ,  $ctg60^\circ = \sqrt{3}/3$ . Площі внутрішніх трикутників  $S_1 = S_2 = S_3 = S$ . Тоді формула (14) для



рівносторонньої трикутної полюсної мережі з полюсом, розташованим у центрі мережі, набуде вигляду для  $S = P_3/3$

$$m_{P_3} = \sqrt{4P_3^2 \frac{m_b^2}{b^2} + \frac{320}{3} S^2 \frac{m_\beta^2}{\rho^2}} = 2P_3 \sqrt{\frac{m_b^2}{b^2} + \frac{80}{27} \cdot \frac{m_\beta^2}{\rho^2}}. \tag{16}$$

Земельні ділянки в багатьох випадках мають форму прямокутника або конфігурацію, близьку до нього. Тому варто зупинитись на прямокутній полюсній мережі (рис. 3) з розмірами сторін  $a$  та  $b$ . Для подальших розрахунків необхідно ввести коефіцієнт видовження  $k$ , який характеризує відступ прямокутника від квадрата ( $b > a$ ):

$$k = \frac{b}{a}. \tag{17}$$

З рис. 3 зрозуміло, що

$$\text{ctg} \beta_1 = \frac{b}{a} = k, \tag{18}$$

$$\text{ctg} \beta_2 = \frac{a}{b} = \frac{1}{k}. \tag{19}$$

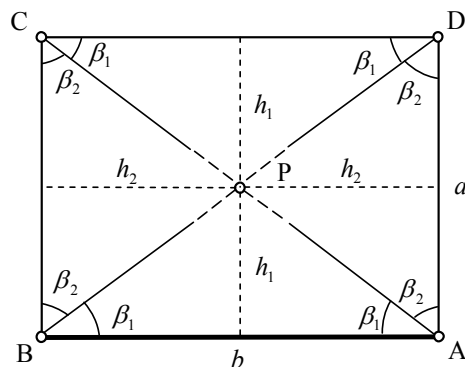


Рис. 3. Полюсна мережа у формі прямокутника

З елементарної математики відомо, що

$$\text{ctg} 2\beta = \frac{\text{ctg}^2 \beta - 1}{2 \text{ctg} \beta}. \tag{20}$$

Тоді, з урахуванням формул (18) - (20) суми кутів  $\text{ctg}(\beta_{2i-1} + \beta_{2i})$  у формулах часткових похідних (8) – (13) будуть дорівнювати:

$$\text{ctg} 2\beta_1 = \frac{k^2 - 1}{2k}, \tag{21}$$

$$\text{ctg} 2\beta_2 = \frac{1 - k^2}{2k}. \tag{22}$$

Площі внутрішніх трикутників (див. рис. 3), утворені сторонами прямокутника та напрямками на полюс та з врахуванням коефіцієнта видовження  $k$ , дорівнюють:

$$S = S_i = \frac{b \cdot h_1}{2} = \frac{a \cdot h_2}{2} = \frac{a^2 k}{4}. \tag{23}$$

З урахуванням формул (7) – (13) та (18) – (23) значення часткових похідних по вимірних кутах прямокутної полюсної мережі приймуть вигляд:

$$\frac{dP_4}{d\beta_1} = \frac{7a^2(k^2 + 1)}{8}, \quad (24)$$

$$\frac{dP_4}{d\beta_2} = \frac{a^2(-5k^2 + 7)}{8}, \quad (25)$$

$$\frac{dP_4}{d\beta_3} = \frac{a^2(-k^2 + 11)}{8}, \quad (26)$$

$$\frac{dP_4}{d\beta_4} = \frac{-a^2(k^2 + 9)}{8}, \quad (27)$$

$$\frac{dP_4}{d\beta_5} = \frac{a^2(7k^2 - 1)}{8}, \quad (28)$$

$$\frac{dP_4}{d\beta_6} = \frac{-a^2(5k^2 + 1)}{8}, \quad (29)$$

$$\frac{dP_4}{d\beta_7} = \frac{a^2(-k^2 + 3)}{8}, \quad (30)$$

$$\frac{dP_4}{d\beta_8} = \frac{-a^2(k^2 + 1)}{8}. \quad (31)$$

Тоді, з урахуванням формул (14), (24)–(31) та значення площі прямокутника  $P_{II} = a^2k$  ( $a = \sqrt{\frac{P_{II}}{k}}$ ), СКП визначення площі полюсної мережі у формі прямокутника та полюсом у центрі мережі визначається за формулою:

$$m_{II} = P_{II} \sqrt{4 \frac{m_b^2}{b^2} + \frac{m_\beta^2}{64\rho^2} (156k^2 + 168 + \frac{236}{k^2})}. \quad (32)$$

Оскільки існує обмеження на величини кутів  $\beta \leq 30^\circ$ , то значення коефіцієнта видовження не повинно перевищувати значення  $k = \text{ctg}30^\circ = \sqrt{3}$ , обчисленого за формулою (18).

Для полюсної мережі у формі квадрату ( $k = b/a = a/a = 1$ ) з формули (32) впливає значення СКП визначення площі

$$m_K = a^2 \sqrt{4 \frac{m_a^2}{a^2} + 8,75 \frac{m_\beta^2}{\rho^2}} = P_K \sqrt{4 \frac{m_a^2}{P_K} + 8,75 \frac{m_\beta^2}{\rho^2}}. \quad (33)$$

Для полюсної мережі з п'ятьма рівними сторонами та полюсом у центрі мережі (рис. 2, б) величина кута згідно з формулою (15) становитиме  $\beta = 54^\circ$ , а  $\text{ctg}54^\circ = 0,7265$ ,  $\text{ctg}(2 \cdot 54^\circ) = -0,3249$ . Для цього випадку та для однакових за величиною площ внутрішніх трикутників  $S_i = S$ , СКП визначення площі відповідно до формули (14) становитиме:

$$m_{P_3} = \sqrt{4P_5^2 \frac{m_b^2}{b^2} + 211,2S^2 \frac{m_\beta^2}{\rho^2}}. \quad (34)$$

З розрахунків числових значень формули (34) встановлено, що внесок корельованих членів у коефіцієнт 211,2 становить всього 18,8. Тоді залишковий коефіцієнт дорівнює

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

192,4. Відсоток відкинутої частини коефіцієнта відносно збереженої становить  $(18,8/192,4) \cdot 100\% = 9,8\%$ . Зрозуміло, що з урахуванням цієї обставини та наявності першого доданку під знаком радикалу у формулі (34), можна стверджувати, що для  $S = P_5/5$

$$m_{P_5} \approx \sqrt{4P_5^2 \frac{m_b^2}{b^2} + 192,4 \cdot S^2 \frac{m_\beta^2}{\rho^2}} = P_5 \sqrt{4 \frac{m_b^2}{b^2} + 7,696 \frac{m_\beta^2}{\rho^2}}. \quad (35)$$

Для полюсної мережі у вигляді трикутника з рівними сторонами та полюсом у центрі мережі внесок корельованих членів у значення названого коефіцієнта становить 43%. Отже, збільшення кількості сторін полюсної мережі веде до зменшення відсотка внеску корельованих членів у доданок формули для розрахунку СКП площі, який відповідає за точність вимірювання горизонтальних кутів полюсної мережі. Тому формулу (14) можна подати у скороченому вигляді, що відповідає точності визначення площі полюсної побудови, починаючи з п'ятикутника

$$m_{P_n}^2 \approx 4P_n^2 \frac{m_b^2}{b^2} + \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \left[ \sum_{i=1}^{2n} \left( \frac{dP_n}{d\beta_i} \right)^2 \right]. \quad (36)$$

Можна показати застосування отриманих формул для визначення СКП площі на прикладі земельної ділянки для ведення особистого селянського господарства площею 2,0 гектара [14]. У випадку, коли ділянка має форму квадрату, то його сторона  $a = \sqrt{20000} \approx 141$  м. Якщо для визначення довжини базису застосувати топографічний світловіддалемір СТ-5 «Блеск» і теодоліт 3Т5КП, то  $m_a = 10$  мм +  $5$  мм  $\cdot 0,141 = 10,7$  мм, а  $m_\beta = 5''$ . За формулою (33)  $m_k = 3,4$  м<sup>2</sup>. Згідно з [4] обліковою одиницею площі у селах є 100 м<sup>2</sup>. Тоді, для довірчої ймовірності  $P=0,95$  похибка визначення вказаної площі полюсним методом становить  $\Delta P = 2m_k = 2 \cdot 3,4 = 6,8$  м, що значно менше наведеної облікової одиниці. Якщо ділянка має форму прямокутника, то для граничного значення  $k = \sqrt{3}$ , величини базису  $b = ka = k \cdot \sqrt{P_{II}}/k = \sqrt{kP_{II}} = \sqrt{\sqrt{3} \cdot 20000} = 186,1$  м,  $m_b = 10$  мм +  $5$  мм  $\cdot 0,186 = 10,93$  мм і за формулою (32) значення СКП площі ділянки становитиме  $m_{II} = 2,8$  м<sup>2</sup>. Для п'ятикутника з рівними сторонами та полюсом у центрі мережі площа окремого трикутника дорівнює  $S = P_5/5$ . З іншого боку, площа окремого трикутника полюсної мережі з рівними сторонами  $b$  та полюсом у центрі мережі, дорівнює:

$$S = \frac{b}{2} h = \frac{b^2}{4} \operatorname{tg} \beta, \quad (37)$$

звідки

$$b = 2 \cdot \sqrt{\frac{S}{\operatorname{tg} \beta}}. \quad (38)$$

Для  $n=5$  з (15)  $\beta=54^\circ$ , а з (38) довжина базису  $b=107,8$  м. Тоді,  $m_b = 10$  мм +  $5$  мм  $\cdot 0,108 = 10,54$  мм і для  $P = 20000$  м<sup>2</sup> за формулою (35)  $m_{P_5} = 4,1$  м<sup>2</sup>. Для полюсної мережі у формі трикутника з полюсом у центрі мережі: для  $n = 3$  з (15) кут  $\beta=30^\circ$ ; сторона  $b$  для  $S = P_3/3$  та  $P = 20000$  м<sup>2</sup> за формулою (38)  $b = 214,9$  м<sup>2</sup>;  $m_b = 10$  мм +  $5$  мм  $\cdot 0,2149 = 11,07$  мм; з (16)  $m_{P_3} = 2,7$  м<sup>2</sup>.

**Висновки відповідно до статті.** Виконано теоретичне обґрунтування точності визначення площ земельних ділянок полюсним методом з урахуванням кореляційної

залежності між горизонтальними кутами, вимірними на межових знаках способом кругових прийомів. Загальні формули спрощені для випадків конфігурації меж у вигляді правильного трикутника та п'ятикутника, прямокутника та квадрата. Наведено приклади обчислення точності визначення площ для вказаних фігур.

### Список використаних джерел

1. Войтенко С. П. Інженерна геодезія: підручник. Вид. 2-ге виправл. і допов. Київ, 2012. 574 с.
2. Островський А. Л., Мороз О. І., Тартачинська З. Р., Герасимчук І. Ф. Геодезія. Частина перша. Топографія: навч. посіб. Львів: Видавництва Львівської Політехніки, 2011. 440 с.
3. Боровий В. О., Бурачек В. Г., Нисторяк І. О. Ще раз до точності визначення площ земельних ділянок. *Вісник Криворізького національного університету*. 2012. Вип. 33. С. 264-268.
4. Смірнов Є. І. Точність визначення площ земельних ділянок місцевості. *Геодезія, картографія і аерознімання*. 2009. Вип. 72. С. 142-143.
5. Губар Ю. Визначення необхідної точності координат межових знаків для оцінки земель населених пунктів. *Геодезія, картографія і аерознімання*. 2009. Вип. 74. С. 132-135.
6. Определение площадей объектов недвижимости / В. И. Баландин и др.; под ред. В. А. Коугия. Санкт-Петербург, 2013. 112 с.
7. Барановський В. Д., Карпінський Ю. О., Ляшенко А. А. Топографо-геодезичне забезпечення ведення державного земельного кадастру. Визначення площ територій / за заг. ред. Ю. О. Карпінського. Київ: НДІГК, 2009. 92 с.
8. Романчук С. В., Кирилюк В. П., Шемякін М. В. Геодезія: навч. посіб. Київ: Центр учбової літератури, 2008. 296 с.
9. Крячок С. Д., Мамонтова Л. С., Щербак Ю. В. Визначення площ земельних ділянок довільної форми полюсним методом. *Ресурсозберігаючі технології в проектуванні, землевпорядкуванні та будівництві: матеріали міжнародної наук.-прак. інтернет-конф., 26–27 березня 2019 р.* Кременчук: КрНУ, 2019. С. 94–102.
10. Крячок С. Д., Мамонтова Л. С., Щербак Ю. В. Застосування полюсного методу визначення координат на приаеродромній території. *Технічні науки та технології*. 2018. № 3 (13). С. 258-268.
11. Про затвердження Інструкції з експлуатації аеродромів державної авіації України. Наказ Міністерство оборони України від 01.07.2013: веб-сайт. URL: [http://search.ligazakon.ua/l\\_doc2.nsf/link1/RE23761.html](http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE23761.html).
12. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500: ГКНТА – 2.04-02-98: офіц. вид. Київ: Укргеоінфом, 1999. 155 с.
13. Войтенко С. П. Математична обробка геодезичних вимірів. Теорія похибок вимірів: навч. посіб. Київ: КНУБА, 2003. 216 с.
14. Земельний кодекс України / Юрист-UA.Net. URL: [https://urist-ua.net/кодекси/земельний\\_кодекс\\_України](https://urist-ua.net/кодекси/земельний_кодекс_України).

### References

1. Voytenko, S. P. (2012). *Inzhenerna heodeziia [Engineering Geodesy]*. (2<sup>nd</sup> ed., corrected and supplemented). Kyiv: KNUBA [in Ukrainian].
2. Ostrovskiy, A. L., Moroz, O. I., Tartachynska, Z. R., Herasymchuk, I. F. (2011). *Heodeziia. Chastyna persha. Topohrafiia [Geodesy. Part One. Topography]*. Lviv: Vydavnytstva Lvivskoi Politekhniky [in Ukrainian].
3. Borovyi, V. O., Burachek, V. H., Nystoriak I. O. (2012). Shche raz do tochnosti vyznachennia ploshch zemelnykh dilianok [Once again to the accuracy of determining the area of land]. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu – Bulletin of Kryvyi Rih National University*, 33, 264–268 [in Ukrainian].
4. Smirnov, Ye. I. (2009). Tochnist vyznachennia ploshch zemelnykh dilianok mistsevosti. [The accuracy of determining the area of land]. *Heodeziia, kartohrafiia i aeroznimannia – Geodesy, cartography and aerial photography*, 72, 142–143 [in Ukrainian].
5. Hubar, Yu. (2009). Vyznachennia neobkhdnoi tochnosti koordynat mezhovykh znakov dlia otsinky zemel naselenykh punktiv [Determining the necessary precision coordinates of landmarks for assessment of land settlements]. *Heodeziia, kartohrafiia i aeroznimannia – Geodesy, cartography and aerial photography*, 74, 132–135 [in Ukrainian].

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

6. Balandin, V. I., Kougiia, V. A. (Ed.), Bryn, M. Ia. (2013). *Opređenje ploshchadei obektov nedvizhimosti [Determination of the area of real estate]*. St. Petersburg [in Russian].

7. Baranovskiy, V. D., Karpinskyi, Yu. O. (Ed.), Liashenko, A. A. (2009). *Topografo-heodezychne zabezpechennia vedennia derzhavnogo zemelnogo kadastru. Vyznachennia ploshch terytorii [Topographic and geodetic maintenance of state land cadastre. Determination of areas of territories]*. Kyiv: NDIHK [in Ukrainian].

8. Romanchuk, S. V., Kyryliuk, V. P., Shemiakin, M. V. (2008). *Heodeziia [Geodesy]*. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury [in Ukrainian].

9. Shcherbak, Yu. V., Kriachok, S. D., Mamontova, L. S. (2019). Vyznachennia ploshch zemelnykh dilianok dovilnoi formy poliusnym metodom [Determination of areas of arbitrary land plots by pole method]. *Resursozberihaiuchi tekhnologii v proektuvanni, zemlevporiadkuvanni ta budivnytstvi nauk.-prak. Internet Conference – Resource Conservation Technologies in Design, Land Management and Construction: Proceedings of an International Scientific and Practical Internet Conference* (Kremen-chuk, March 26-27, 2019). KrNU [in Ukrainian].

10. Kriachok, S. D., Shcherbak, Yu. V., Mamontova, L. S. (2018). Zastosuvannia poliusnogo metodu vyznachennia koordynat na pry aerodromnii terytorii. Application of the pole method for determining coordinates in the aerodrome territory]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, 3 (13), 258–268 [in Ukrainian].

11. Pro zatverdzhennia Instruksii z ekspluatatsii aerodromiv derzhavnoi aviatsii Ukrainy [On approval of the Instruction on the operation of state aviation aerodromes of Ukraine.]. (July 1, 2013).

12. Instruksiia z topografichnogo znimannia u masshtabakh 1:5000, 1:2000, 1:1000 ta 1:500 [Instructions topographic removing the scale of 1: 5000, 1: 2000, 1: 1000 and 1: 500]. HKNTA – 2.04-02-98 (1999).

13. Voytenko, S. P. (2003). *Matematychna obrobka heodezychnykh vymiriv. Teoriya pokhybok vymiriv [Mathematical processing of geodetic measurements. Theory of measurement errors]*. Kyiv: KNUBA [in Ukrainian].

14. Zemelnyi kodeks Ukrainy [Land Code of Ukraine]. № 2768-III (October 25, 2001).

UDC 528.3

Sergiy Kryachok, Liudmyla Mamontova, Yuliya Shcherbak

## THEORETICAL RATIONALE OF THE ACCURACY OF DETERMINATION OF LAND PLOTS BY POLAR METHOD

**Urgency of the research.** Determining the area of territories is one of the main tasks of geodetic support for land management. The reliability of information on resources is directly related to the accuracy of determining the area of land. The need to determine the area arises when solving urban problems, conducting recreational work, vertical planning of construction sites, forecasting areas of flooding and forest fires.

**Target setting.** There are the following methods for determining the area: graphic, instrumental, analytical. The graphical method involves the use of specially laid out palettes made of transparent material, which are superimposed on the cartographic image of the area. The area is calculated by the number of elementary figures in the form of rectangles with a known area. The instrumental method needs the use of mechanical or electronic planimeters. The area of the plot on its cartographic image is determined after the contour has been circled by a special lever with a mark according to the difference in readings on the planimeters scale. The most accurate is the analytical method. It provides for determining the area of the plot by the coordinates of points located on the contour of the site, using the appropriate mathematical apparatus.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Recent publicly available publications were reviewed on the accuracy of area determination by analytical method.

**Unexplored parts of a common problem.** Unexplored is the accuracy of determining the area of land plots by the polar method, taking into account the correlation dependencies between adjacent horizontal angles, measured at the boundary mark.

**The research objective.** The main goal of the article is a theoretical justification for the accuracy of determining the area of land plots by the polar method, taking into account the correlation between adjacent horizontal angles measured at each boundary mark.

**The statement of basic materials.** The theoretical substantiation of determining the area of land plots by the polar method in the form of polygons is carried out taking into account the measured horizontal angles and the length of the basis was made. Based on the formulas obtained, partial differential expressions are defined. Taking into account the correlation dependence between horizontal angles, formulas were derived for determining the mean square error of determining the area of land plots with the configuration of the boundaries in the form of a polygon. Simplifications of general formulas for determining the accuracy of areas in the form of a regular triangle and pentagon, rectangle and square are made. Calculations of the accuracy of land areas for these figures using simplified formulas are presented.

**Conclusions.** The theoretical substantiation of the accuracy of determining the area of land plots by the polar method is carried out, taking into account the correlation between adjacent horizontal angles measured at the boundary marks. The

general form of the formulas is simplified for cases of boundary configuration in the form of a regular triangle and pentagon, rectangle and square. Examples of calculating the accuracy of determining the area for these figures are given.

**Keywords:** polar method; land area; correlation coefficient.

**Fig.:** 3. **References:** 14.

**Крячок Сергій Дмитрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Kryachok Serhiy** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** geodesist2015@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5633-1501>

**ResearcherID:** N-3061-2016

**Мамонтова Людмила Степанівна** – старший викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Mamontova Lyudmila** - Senior Lecturer of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** liudmila.mamontova@yandex.ua

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-4144-5261>

**ResearcherID:** N-3070-2016

**Щербак Юлія Володимирівна** – магістр, викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Shcherbak Yuliya** – master, lecturer of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv National University of Technology. (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** shch.yu15@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-3439-3792>

**ResearcherID:** H-4199-2016

Олександр Менеїлюк, Олексій Нікіфоров

## ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ НОРМУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ РОБІТ

**Актуальність теми дослідження.** Є висока необхідність наявності ринково обґрунтованих показників вартості та тривалості виконання будівельних робіт. Вивчені нормативні документи мають суттєві недоліки, зокрема високу трудомісткість методів, що рекомендуються, та відсутність статистичного обґрунтування точності досліджень з нормування. Розробка методу з усуненням зазначених недоліків є ефективною із соціального, економічного та технічного погляду.

**Постановка проблеми.** В умовах ринкової економіки стає недоцільним централізоване нормування витрат праці державними установами, тому будь-яке підприємство в Україні є зацікавленим у методі нормування, який би мав низьку трудомісткість використання, високу адаптивність до організаційних умов будівництва та достатню для інженерних та економічних розрахунків точність.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Були розглянуті чинні нормативні документи зі встановлення норм праці, проаналізовані відомі методи нормування.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Актуальним є розробка методу нормування, що був би менш трудомістким, більш точним та статистично обґрунтованим. Цього можливо досягти за рахунок комбінування сумарних та дослідницьких методів нормування із використанням методів математичної статистики.

**Постановка завдання.** Розробка методики нормування витрат праці будівельних робіт на основі найбільш ефективних методів, точність та кількість натурних дослідів якої обґрунтована статистичними методами.

**Виклад основного матеріалу.** Багатокритеріальний аналіз методів нормування дає змогу на основі інформаційних джерел вибрати найбільш ефективний метод, у тому числі за допомогою ранжування важливості показників. Запропонована методика, що являє собою комбінацію сумарних і дослідницьких методів зі статистичним обґрунтуванням кількості натурних досліджень трудомісткості.

**Висновки відповідно до статті.** Запропонована методика дозволяє обґрунтувати точність, знизити трудовитрати розробки норм праці.

**Ключові слова:** норма праці; будівельні роботи; удосконалення; зниження витрат праці; індустріалізація будівництва.

Рис.: 5. Табл.: 2. Бібл.: 13.

**Актуальність теми дослідження.** Зважаючи на великі обсяги будівництва в Україні, є висока необхідність наявності ринково обґрунтованих показників вартості та тривалості виконання будівельних робіт, а відповідно, і норм праці. Вивчені державні нормативні документи України з цього питання мають суттєві недоліки, зокрема високу трудомісткість методів, що рекомендуються, та відсутність статистичного обґрунтування точності досліджень з нормування. Можливо усунути ці недоліки таким чином: комбінування сумарних та дослідницьких методів нормування з використанням методів математичної статистики для обґрунтування необхідної кількості натурних дослідів із заданим рівнем достовірності результатів. Розробка методу з усуненням зазначених недоліків може бути ефективною із соціального, економічного та технічного погляду.

**Постановка проблеми.** Нормування витрат праці в будівництві завжди залишається одним з основних завдань при визначенні та підвищенні виробничої ефективності підприємства. Причиною цього є два основні фактори: необхідність запровадження справедливих соціально-трудових відносин для різних організаційних форм будівельної діяльності; велика складність технологічних процесів у будівництві, їхня взаємопов'язаність та несприятливість природних, організаційних та економічних умов, в яких вони проходять. В умовах ринкової економіки стає недоцільним централізоване нормування витрат праці державними установами, тому будь-яке підприємство в Україні є зацікавленим у методі нормування, який би мав низьку трудомісткість використання, високу адаптивність до організаційних умов будівництва та достатню для інженерних та економічних розрахунків точність. Удосконалення нормативного методу нормування є актуальним через наступні основні причини: відсутність статистичного обґрунтування достовірності польових досліджень зі встановлення норм трудовитрат; необхідність встановлення різних норм трудовитрат для різних соціально-трудових відносин для визначення адекватних показників строків та вартості робіт; уточнення окремих технічних деталей.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Актуальними в Україні нормативними документами з питань нормування праці є:

1. Рекомендації щодо нормування праці в галузях народного господарства [11].
2. Методичні рекомендації з формування собівартості будівельно-монтажних робіт [9].
3. ДСТУ-Н Б Д.1.1-6:2013 «Настанова щодо розроблення ресурсних елементних кошторисних норм на будівельні роботи» [4].

Перший документ містить загальні рекомендації щодо нормування праці. У зазначених Рекомендаціях передбачено використання аналітичних дослідницьких та аналітичних розрахункових методів без уточнення конкретних способів, лише зазначено, що використання знижуючих та підвищуючих коефіцієнтів рекомендовано лише для тимчасового використання. Регламентовано використання операційних, комплексних та укрупнених норм із визначенням цих понять.

Другий документ детально описує перелік та класифікацію витрат будівельного підприємства і зазначає, що витрати на оплату праці формуються згідно з нормами часу, визначеного для конкретної роботи. Третій документ є найбільш повним та докладним керівництвом з розроблення ресурсних елементних кошторисних норм.

Аналіз методів нормування виконувався за допомогою вивчення наступних джерел [2, 3, 5, 7, 10, 12, 13].

Вивчені інформаційні джерела містять вкрай мало довідок зі статистичного обґрунтування необхідної достовірності нормування праці. Затверджені нормативні документи не регламентують кількість необхідних натурних спостережень. Знайдені джерела або регламентують кількість спостережень без прив'язки до специфіки будівельного виробництва [8, таблиця 2], або користуються стандартними підходами математичної статистики [6]. Статистична достовірність натурних спостережень за нормами праці загалом описується стандартними рекомендаціями довідників із математичної статистики [1].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Аналіз чинних державних документів із нормування праці показав, що рекомендованими є дослідницькі методи: хронометраж та фотографія робочого дня. При цьому відсутній розрахунок статистичної достовірності норм, що розроблюються. Актуальним є розробка методу нормування, що був би менш трудомістким, більш точним та статистично обґрунтованим. Цього можливо досягти за рахунок комбінування сумарних та дослідницьких методів нормування з використанням методів математичної статистики.

**Постановка завдання.** Метою статті є розробка методики нормування витрат праці будівельних робіт на основі найбільш ефективних методів, точність та кількість натурних дослідів якої обґрунтована статистичними методами. Поставлені відповідні завдання:

1. Аналіз інформаційних джерел з теми визначення та значень відповідних критеріїв для відомих методів нормування.
2. Багатокритеріальний аналіз методів нормування, вибір найбільш ефективних.
3. Розробка методики нормування зі статистичним обґрунтуванням мінімально необхідної кількості натурних дослідів.

**Виклад основного матеріалу.** Для різних організаційних форм будівництва виділимо такі види норм праці:

- Операційна норма – встановлюється в межах окремої операції та не включає в себе витрати на управління.

- Укрупнена норма – встановлюється на декілька операцій, пов'язаних однією готовою будівельною продукцією. Включає в себе витрати на управління комплексом операцій (роботою).

- Комплексна норма – встановлюється на декілька комплексів операцій (робіт), результатом яких є готовий об'єкт будівництва або його значна виокремлена частина. Включає в себе витрати на управління комплексом робіт.



Класифікація відомих методів нормування праці представлена на рис. 1. Норми витрат праці можуть бути встановлені двома групами методів: на основі детального аналізу, що здійснюється на будівельному підприємстві, і проектування оптимального трудового процесу (аналітичні методи); або на основі статистичних звітів про виробіток, витрати часу на виконання роботи за попередній період або експертних оцінок (сумарні методи).

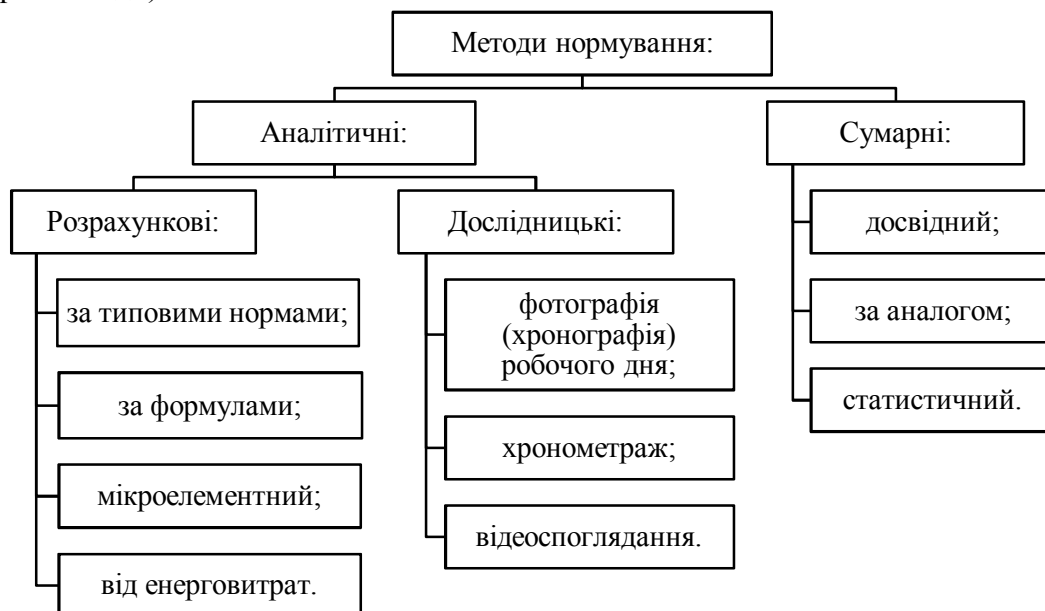


Рис. 1. Класифікація методів нормування будівельно-монтажних робіт

При використанні *аналітичних розрахункових методів* витрати робочого часу на нормовану операцію/роботу визначають за нормативами, розробленими раніше, або за розрахунком, зважаючи на прийняті режими оптимальної роботи технологічного обладнання. При використанні *аналітичних дослідницьких методів* необхідні витрати робочого часу по кожному елементу нормованої операції/роботи визначають на основі аналізу даних, отриманих у результаті безпосереднього спостереження за виконанням цієї операції на робочому місці, на якому організація праці відповідає прийнятим умовам. *Сумарна група методів* спирається на аналіз фактичних даних будівельного підприємства.

Аналітична група методів дозволяє визначати обґрунтовані норми, впровадження яких сприяє підвищенню продуктивності праці й загалом ефективності виробництва – тобто спрямована на індустріально ефективне планування виробництва. Сумарна група методів фіксує фактичні витрати праці – тобто спрямована на аналіз фактичного положення справ.

Як критерії оцінки методів нормування будівельно-монтажних робіт приймемо такі:

- ступінь диференціації норм – якісний критерій, полягає в тому, для складання якої норми (операційна/укрупнена/комплексна) може бути використаний метод;
- індустріальність норм – якісний критерій, демонструє ступінь урахування принципів наукової організації праці та управління;
- масштаб вибірки – кількісний критерій;
- трудомісткість – кількісний критерій;
- точність – кількісний критерій;
- залежність від професіоналізму нормувальника – кількісний критерій.

Оцінки за вказаними критеріями зведені в табл. 1. У ній для кількісних критеріїв натурні значення винесені в чисельник, відповідні бальні – у знаменник. Графічна візуалізація оцінок за кількісними критеріями показана на рис. 2.

Таблиця багатокритеріального аналізу методів нормування будівельно-монтажних робіт

Критерій	Ступінь диференціації норм	Індустріальність норм	Масштаб вибірки	Трудомісткість	Точність	Професіоналізм
Нормування за типовими нормами	Укрупнена, комплексна, операційна	Посередня	Високий	Середня	Середня	Дуже значний
			10	6,67	5	1
Нормування за формулами	Комплексна, операційна	Посередня	Високий	Середня	Середня	Значний
			10	6,67	5	6,67
Мікро-елементний метод	Операційна	Надійна	Малий	Дуже значна	Значна	Низький
			1	1	10	10
Нормування від енерговитрат	Операційна	Посередня	Малий	Дуже значна	Значна	Низький
			1	1	10	10
Фотографія (хронографія) робочого дня	Комплексна, операційна	Надійна	Стат. значущий	Значна	Значна	Середній
			5	3,33	10	3,33
Хронометраж	Комплексна, операційна	Надійна	Стат. значущий	Значна	Значна	Середній
			5	3,33	10	3,33
Досвідний метод	Укрупнена, комплексна, операційна	Не забезпечена	Високий	Низька	Низька	Дуже значна
			10	10	1	1
Нормування за аналогом	Укрупнена, комплексна	Не забезпечена	Високий	Середня	Низька	Дуже значний
			10	6,67	1	1
Статистичний метод	Укрупнена, комплексна, операційна	Не забезпечена	Високий	Середня	Середня	Дуже значний
			10	6,67	5	1

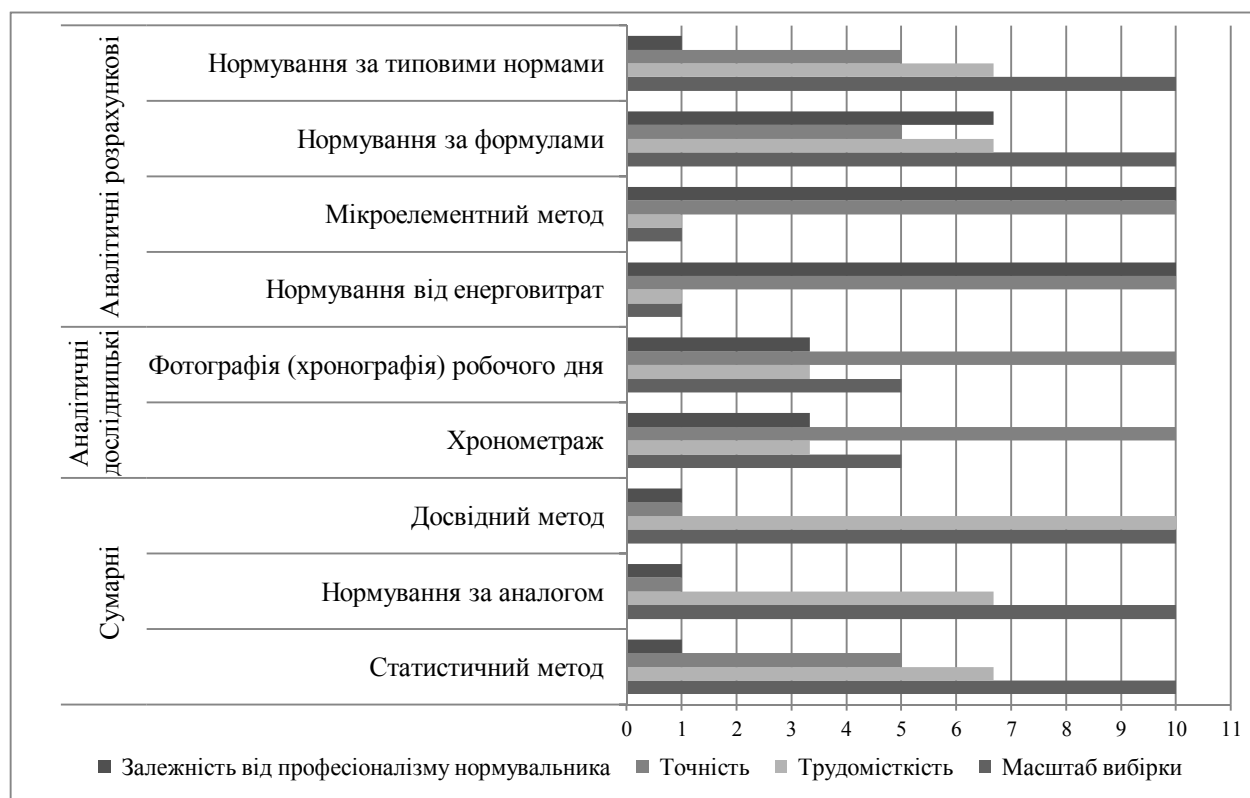


Рис. 2. Класифікація методів нормування будівельно-монтажних робіт

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Згідно з даними, представленими на рис. 2, можна зробити висновок, що найбільш ефективними методами нормування є аналітичні дослідницькі (фотографія (хронографія) робочого дня, хронометраж) та деякі аналітичні розрахункові (нормування за типовими нормами, за формулами). Проте має сенс поділити аналіз на категорії за ступенем диференціації норм та додати оцінки з їхньої індустріальності (рис. 3-5).

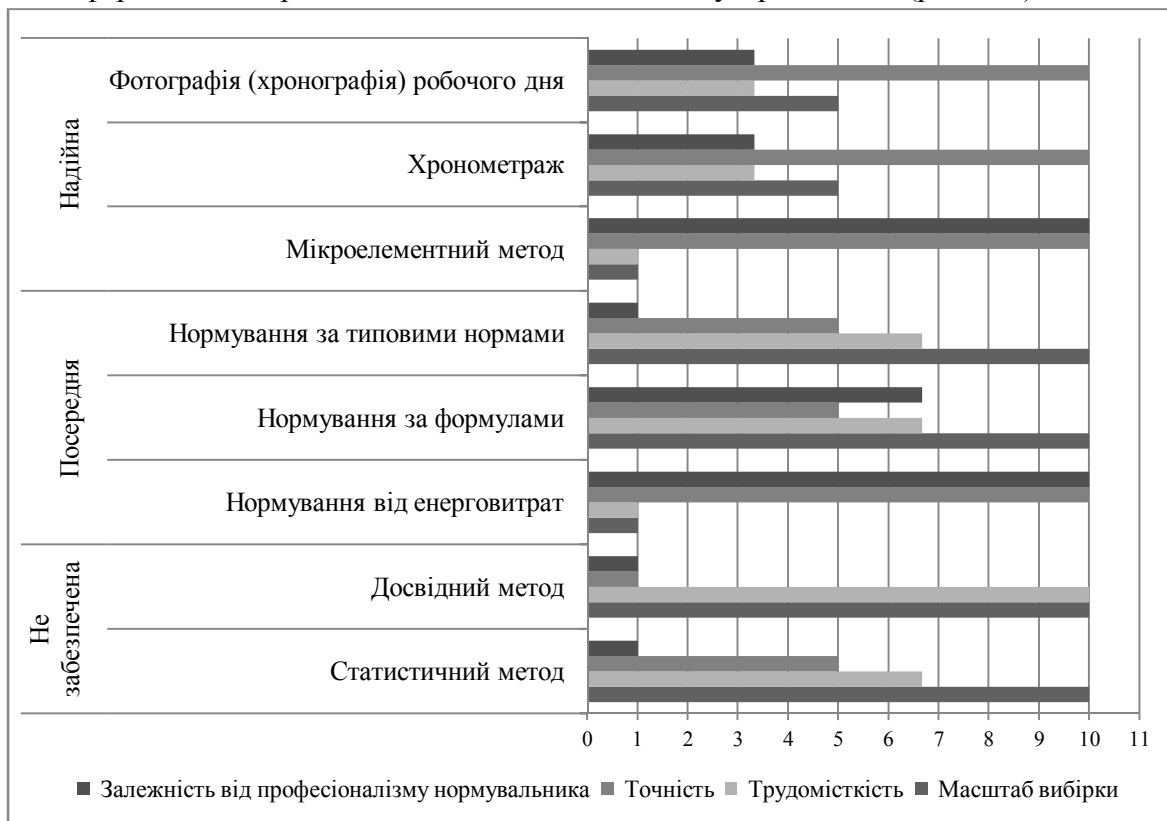


Рис. 3. Оцінка методів визначення операційних норм, згрупованих за ступенем індустріальності норм

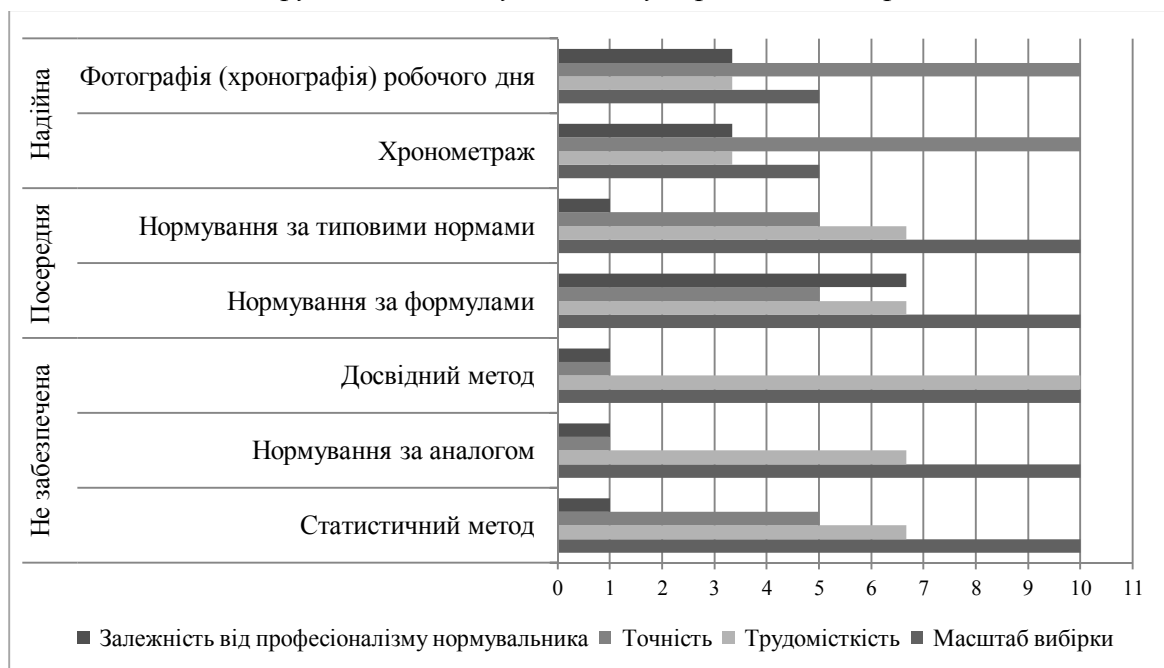


Рис. 4. Оцінка методів визначення комплексних норм, згрупованих за ступенем індустріальності норм

Аналізуючи рис. 3, можна сказати, що методом із найбільшими кількісними оцінками є нормування за формулами. Проте цей метод не забезпечує високого ступеня індустріальності, що є критичним на рівні операційного нормування. При цьому мікроелементний метод є дуже трудомістким і за своєю суттю не здатен оцінити реальний рівень ефективності виробітку наявних робочих. Таким чином, можна рекомендувати вибір одного з аналітичних дослідницьких методів (фотографія (хронографія) робочого дня, хронометраж) залежно від тривалості технологічного циклу з виготовлення готової будівельної продукції.

Розглянемо рис. 4, на якому показані методи визначення комплексних норм, згрупованих за ступенем індустріальності норм. Враховуючи, що для розробки комплексних норм ступінь індустріальності не є критично важливим, відкидаємо групу сумарних методів, для яких індустріальність не забезпечена. Для методів, що залишилися, розраховуємо (табл. 2) інтегральну оцінку ефективності, що є сумою оцінок за критеріями, помножених на коефіцієнт значущості критерію (коефіцієнт для критерію «точність» – 4; «трудомісткість» – 3; «масштаб вибірки» – 2; «залежність від професіоналізму нормувальника» – 1; визначені шляхом ранжування критеріїв за значущістю). Розрахунок показує, що найбільш ефективним методом є нормування за формулами, однак зважаючи на близькість інтегральних оцінок, цей метод раціонально комбінувати з хронометражем або фотографією робочого дня таким чином: розраховуються внутрішні для підприємства операційні норми для найбільш типових операцій/робіт, на їхній основі шляхом розрахунку виводяться операційні норми для однотипних операцій/робіт та комплексні норми для робіт.

Таблиця 2

*Інтегральні оцінки методів визначення комплексних норм, що забезпечують достатній ступінь індустріальності норм*

Методи	Тип оцінки	Хронометраж	Фотографія (хронографія) робочого дня	Нормування за формулами	Нормування за типовими нормами
Точність	вихідна	10	10	5	5
	з коефіцієнта значущості	40	40	20	20
Трудомісткість	вихідна	3,33	3,33	6,67	6,67
	з коефіцієнта значущості	9,99	9,99	20,01	20,01
Масштаб вибірки	вихідна	5	5	10	10
	з коефіцієнта значущості	10	10	20	20
Залежність від професіоналізму нормувальника	вихідна	3,33	3,33	6,67	1
	з коефіцієнта значущості	3,33	3,33	6,67	1
Інтегральна оцінка		63,32	63,32	66,68	61,01

Аналіз рис. 5 показує, що єдиним методом, що забезпечує індустріальність укрупнених норм, є нормування за типовими нормами. Крім іншого, оцінки цього методу є вищими за оцінки методів сумарної групи. Підвищення об'єктивності укрупнених норм доцільно проводити таким чином: розробляються операційні та комплексні норми шляхом хронометражу або фотографії робочого дня, потім за об'єктом-аналогом розраховується укрупнена норма на будівельний об'єкт. Така норма надалі використовується як конструктивно-технологічний шаблон.

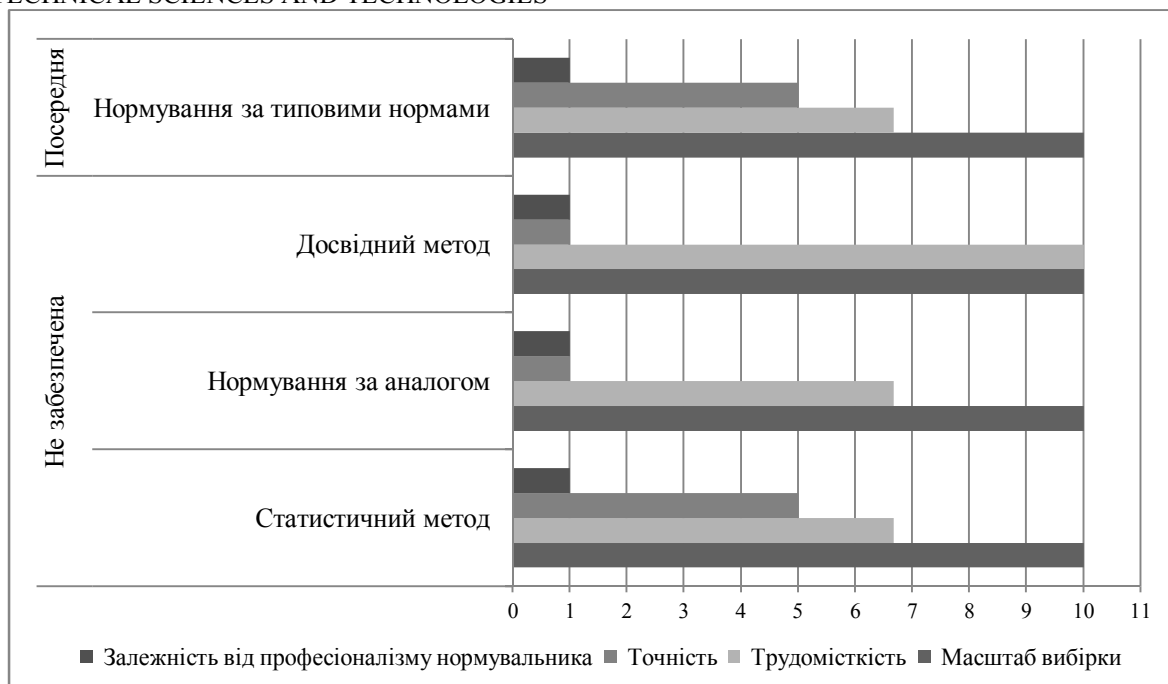


Рис. 5. Оцінка методів визначення укрупнених норм, згрупованих за ступенем індустріальності норм

Оскільки будівельне виробництво можна охарактеризувати як малосерійне, а номенклатура операцій зазвичай велика, виникає необхідність мінімізувати витрати праці на здійснення натурних спостережень, тобто виміряти інженерно достовірну норму трудовитрат при найменшій кількості спостережень.

Запропонуємо порядок встановлення норм трудовитрат за мінімально необхідної кількості спостережень. Його можна описати таким алгоритмом:

1. Провести попередні виміри норм праці за допомогою статистичного методу нормування (у комбінації з методами «розрахунковий за типовими нормами», «розрахунковий за формулами»).

2. Розрахувати дисперсію пронормованої вибірки:

$$S^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}, \tag{1}$$

де  $x_i$  – виміри норми праці на одиницю операції/роботи;  $\bar{x}$  – середнє арифметичне вибірки;  $n$  – кількість вимірів норми праці у вибірці.

3. Розрахувати стандартну помилку пронормованої вибірки:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{S^2}{n}}. \tag{2}$$

4. Знайти значення критерію Стюдента  $t$  за стандартними довідниками (наприклад, за [1, додаток 1]). Для інженерних розрахунків рекомендується приймати рівень значущості  $\alpha = 0,05$ .

5. Розрахувати довірчий інтервал малої вибірки:

$$\Delta x = t S_{\bar{x}}. \tag{3}$$

6. Розрахувати мінімально необхідну чисельність вибірки, для якої проводитиметься натурне нормування за допомогою дослідницьких методів:

$$n_x = \frac{t^2 S^2}{\Delta x^2} \tag{4}$$

7. Провести необхідну кількість натурних досліджень та обробити результати згідно з рекомендаціями нормативних документів.

Найбільш поширеною причиною великої розрахункової кількості необхідних спостережень будівельних робіт є недостовірність результатів попередніх вимірів. Це відбувається через різні непродуктивні простоти при виконанні робіт, що спостерігаються. У цьому випадку слід провести серію з 3-5 натурних спостережень та затвердити норму, виходячи з отриманих результатів.

#### **Висновки відповідно до статті.**

За допомогою багатокритеріального аналізу було класифіковано, охарактеризовано та вибрано методи нормування для кожного ступеня диференціації – операційної (фотографія робочого дня, хронометраж), комплексної (нормування за формулами разом із дослідницькими методами), укрупненої норми (нормування за типовими нормами разом із дослідницькими методами).

Запропоновано підхід до розробки норм, що поєднує різні методи: дослідницькі методи є основними для розробки норм; аналітичні методи із використанням розрахункових формул та типових норм є допоміжними; статистичні методи використовуються для грубої оцінки та підтвердження норм.

Розроблена методика забезпечує статистичну достовірність натурних спостережень із нормування витрат праці та дозволяє обґрунтувати мінімально необхідну кількість натурних спостережень, а відповідно, – найменші витрати праці на нормування.

#### **Список використаних джерел**

1. Бараз В. Р. Выборочный метод статистического анализа. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет – УПИ, 2008. 67 с.
2. Васильков В. Г. Организация производства. Київ: Київський національний економічний університет, 2003. 524 с.
3. Генкин Б. М. Организация, нормирование и оплата труда на промышленных предприятиях. Москва: Издательство НОРМА, 2002. 434 с. URL: <http://ural-education.ru/wp-content/uploads/2016/12/Генкин-Б.М.-Организация-нормирование-и-оплата-труда-на-промышленных-предприятиях.pdf>.
4. ДСТУ-Н Б Д.1.1-6:2013 Настанова щодо розроблення ресурсних елементних кошторисних норм на будівельні роботи. [Чинний від 2014-01-1]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2013. 26 с.
5. Капінос Г. І., Бабій І. В. Операційний менеджмент. Київ: Центр учбової літератури, 2013. 352 с.
6. Кузнецов С. М. Совершенствование обработки результатов натурных испытаний при техническом и тарифном нормировании. *Экономика железных дорог*. 2013. № 7. С. 90–97.
7. Курочкин В. Н. Организация, нормирование и оплата труда. Москва-Берлин: Директ-Медиа, 2014. 234 с.
8. Лучанинов С. Нормирование труда: просто о серьезном. *Управление персоналом*. 2011. С. 71–78. URL: <https://hrliga.com/index.php?module=profession&op=view&id=1297>.
9. Методичні рекомендації з формування собівартості будівельно-монтажних робіт. [Чинний від 2010-12-31]. Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. 30 с.
10. Одегов Ю. Г., Бычин В. Б., Малинин С. В., Шубенкова Е. В. Организация и нормирование труда. Москва: РУСАЙНС, 2017. 272 с.
11. Рекомендації щодо нормування праці в галузях народного господарства. [Чинний від 1995-04-19]. Київ: Міністерство праці України, 1995. 19 с.
12. Рофе А. И. Организация и нормирование труда. Москва: КНОРУС, 2014. 224 с. URL: <http://library.asue.am/open/4581.pdf>.
13. Тихомирова Т. П., Чучкалова Е. И. Организация, нормирование и оплата труда на предприятии. Екатеринбург: ГОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», 2008. 185 с. URL: [https://www.rsvpu.ru/biblioteka/materialy-konf/filedirectory/3468/4u4kalova\\_normirov.pdf](https://www.rsvpu.ru/biblioteka/materialy-konf/filedirectory/3468/4u4kalova_normirov.pdf).

## References

1. Baraz, V. (2008). *Vyborochnyi metod stati-sticheskogo analiza [Selective Statistical Analysis Method]*. Ekaterinburg: Ural State Technical University – UPI [in Russian].
2. Vasilkov, V. (2003). *Orhanizatsiia vyrobnytstva [Organization of production]*. Kyiv: Kyiv National University of Economics [in Ukrainian].
3. Genkin, B. (2002). *Organizatsiia, normirovanie i oplata truda na promyshlennykh predpriatiakh [Organization of rationing and remuneration at industrial enterprises]*. Moscow: NORMA Publishing House [in Russian].
4. Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine (2013). DSTU-N B D.1.1-6:2013 Nاستanova shhodo rozroblennja resursnih elementnih koshtorisnih norm na budivel'ni roboti [Guidelines for resource elementary estimates development for construction work]. Kyiv [in Ukrainian].
5. Kapinos, G., & Babij, I. (2013). *Operatsiiniy menedzhment [Operational management]*. Kyiv: Center for Educational Literature [in Ukrainian].
6. Kuznetsov, S. (2013). Sovershenstvovanie obrabotki rezultatov naturnykh ispytaniy pri tehničeskom i tarifnom normirovanii [Improving the processing of results of field tests in technical and tariff regulation]. *Ekonomika zheleznykh dorog – Rail Economics*, 7, 90-97 [in Russian].
7. Kurochkin, V. (2014). *Organizatsiia, normirovanie i oplata truda [Organization, rationing and remuneration]*. Moscow-Berlin: Direct Media [in Russian].
8. Luchaninov, S. (2019). Normirovanie truda: prosto o sereznom [Labor rationing: just about serious]. *Upravlenie personalom – Human Resources Management*, 10, 71-78. Retrieved from <https://hrliga.com/index.php?module=profession&op=view&id=1297>.
9. Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine. (2010). Metodichni rekomendacii z formu-vannja sobivartosti budivel'no-montazhnykh robot [Methodical recommendations in the form of self-service and installation and assembly hours]. Kyiv [in Ukrainian].
10. Odegov, Y., Bychin, V., Malinin, S., & Shubenkova, E. (2017). *Organizatsiia i normirovanie truda [Organization and regulation of labor]*. Moscow: RUSAYNS [in Russian].
11. Ministry of Labor of Ukraine. (1995). *Rekomendatsii shhodo normuvannia pratsi v galuziakh narodnogo gospodarstva [Recommendations on the normalization of labor in the sectors of the national economy]*. Kyiv [in Ukrainian].
12. Rofe, A. (2014). *Organizatsiia i normirovanie truda [Organization and regulation of labor]*. Moscow: KNORUS [in Russian].
13. Tihomirova, T., & Chuchkalova, E. (2008). *Organizatsiia, normirovanie i oplata truda na predpriatii [Organization, rationing and remuneration at the enterprise]*. Ekaterinburg: State Educational Institution of Higher Professional Education «Russian State Vocational Pedagogical University». Retrieved from [https://www.rsvpu.ru/biblioteka/materialy-konf/filedirectory/3468/4u4kalova\\_normirov.pdf](https://www.rsvpu.ru/biblioteka/materialy-konf/filedirectory/3468/4u4kalova_normirov.pdf).

UDC 69.003:69.05

*Aleksandr Menejlyuk, Aleksey Nikiforov*

## IMPROVEMENT OF RELIABILITY OF CONSTRUCTION WORKS NORMALIZATION

**Urgency of the research.** There is a high need for market-based indicators of the cost and duration of construction work. The studied normative documents have significant drawbacks, in particular the high complexity of the recommended methods and the lack of statistical justification for the accuracy of the labor standardization studies. Developing a method to address these shortcomings is effective from a social, economic and technical point of view.

**Target setting.** It becomes inappropriate to centralize labor cost regulation by government agencies in a market economy, so any enterprise in Ukraine is interested in a method of labor standardization that would have low complexity of use, high adaptability to organizational construction conditions, and precision for engineering and economic calculations.

**Actual scientific researches and issues analysis.** The existing normative documents for setting labor standards were considered, known methods of norming were analyzed.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** It is important to develop a labor standardization method that would be less time consuming, more accurate and statistically valid. This can be achieved by combining summary and research methods of labor standardization using mathematical statistics.

**The research objective.** Development of labor standardization method of the construction work cost on the basis of the most effective methods, the accuracy and number of field experiments of which is substantiated by statistical methods.

**The statement of basic materials.** Multicriteria analysis of labor standardization methods allows choosing the most effective method, based on information sources, including importance ranking of indicators. A technique is proposed that represents a combination of summary and research methods with a statistical justification for the full-scale studies number.

**Conclusions.** The proposed method allows justifying the accuracy, reducing the complexity of labor standards developing.

**Keywords:** labor standard; construction work; improvement; reduction of labor costs; industrialization of construction.

Fig.: 5. Tables: 2. References: 13.

**Менейлюк Олександр Іванович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології будівельного виробництва, Одеська державна академія будівництва та архітектури (вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна).

**Menejljuk Aleksandr** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of department of technology of building industry, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture (4 Didrikhsona Str., 65029 Odesa, Ukraine).

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1007-309X>

**Нікіфоров Олексій Леонідович** – кандидат технічних наук, асистент кафедри технології будівельного виробництва, Одеська державна академія будівництва та архітектури (вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна).

**Nikiforov Aleksey** – Doctor of Philosophy, assistant of department of technology of building industry, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture (4 Didrikhsona Str., 65029 Odesa, Ukraine).

**E-mail:** [aleksey-nikiforov@mail.ua](mailto:aleksey-nikiforov@mail.ua)

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7002-7055>

**ResearcherID:** A-8557-2016



**ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ  
НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ  
«ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**

**Шановні дописувачі!**

Для подання статті необхідно спочатку надіслати на електронну адресу [tst.technical.sj@gmail.com](mailto:tst.technical.sj@gmail.com) Вашу статтю, рецензію та довідку про автора (ів) для попереднього розгляду редакційною колегією журналу «Технічні науки та технології».

Після отримання позитивного відгуку прохання сплатити вартість публікації і відправити весь пакет документів.

Для публікації статті у журналі «Технічні науки та технології» необхідно в обов'язковому порядку подати:

- електронний варіант статті, оформленої за зразком;
- рецензію на статтю за підписом доктора наук;
- довідку про авторів;
- квитанцію (скановану) про сплату вартості публікації наукової статті.

Опублікування наукових статей у журналі «Технічні науки та технології» є платним. Вартість публікації 1 сторінки наукової статті становить **55 грн** (прохання обов'язково уточнювати вартість публікації). Оплата підтверджується квитанцією.

**УМОВИ ПУБЛІКАЦІЇ, ВИМОГИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ, РЕКВІЗИТИ  
ОПЛАТИ ТА ОСТАННІ НОМЕРИ НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ  
ТА ТЕХНОЛОГІЇ» РОЗМІЩЕНО НА САЙТІ ЧЕРНІГІВСЬКОГО  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ:**

**<http://tst.stu.cn.ua/>**

**Контактна інформація.**

Матеріали необхідно надсилати на адресу: 14035, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95, корп. 1, к. 242 (науково-дослідна частина).

Контактна особа: **Кормило Ірина Миколаївна.**

Тел. роб.: (0462) 66-51-15

Тел. моб.: (093) 592-78-12

E-mail: [tst.technical.sj@gmail.com](mailto:tst.technical.sj@gmail.com)

**Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор.  
Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи,  
що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.**

*Редакція розглядає надходження публікації та супровідних документів (рецензії, довідки про авторів тощо) як згоду дописувача (ів) щодо передачі авторського права на використання твору (тиражування, розповсюдження тощо).*

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ**

*НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ*

*№ 3 (17)*

Відповідальний за випуск  
Редактор  
Комп'ютерне складання та верстання

С. П. Сапон  
О. С. Смелова  
Т. М. Колот

Підписано до друку 03.10.2019. Формат 60×84/8. Друк різнографія.  
Ум. друк. арк. – 36,5. Тираж 100 пр. Замовлення № 484/19.

---

Редакційно-видавничий відділ Чернігівського національного технологічного університету  
14035, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,  
вигоцівників і розповсюджувачів видавничої продукції  
серія ДК № 4802 від 01.12.2014 р.