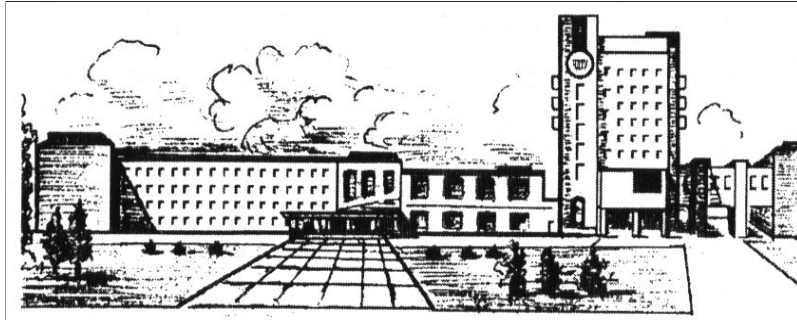


ISSN 2411-5363 (print)  
ISSN 2519-4569 (online)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**



# ***ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ***

***НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ***

***№ 3(33)***

Чернігів 2023

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 11 від 25.09.2023 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 (зі змінами від 09.02.2021 № 157), відповідно до якого журналу надано категорію «Б».

**Технічні науки та технології** : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – № 3(33). – 252 с.

У журналі вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у науковому напрямі «Технічні науки» за спеціальностями: прикладна механіка, матеріалознавство, машинобудування, інформаційно-комп'ютерні технології, електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, хімічні та харчові технології, будівництво та геодезія. 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, НУ «Чернігівська політехніка».

**Заступник головного редактора:**

Сапон С. П., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

**Члени редакційної колегії:**Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування

Бойко С. В., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Болотов Г. П., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Дмитрієв Д. О., доктор технічних наук, професор, Херсонський національний технічний університет;

Єрошенко А. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Кальченко В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Кальченко В. І., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Марков О. Є., доктор технічних наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія;

Новомлинцев О. О., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Пилипенко О. І., доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки.

Повстяной О. Ю., доктор технічних наук, доцент, Луцький національний технічний університет;

Сіра Н. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Федориненко Д. Ю., доктор технічних наук, професор, Tohoku University, Японія;

Ющенко С. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

Інформаційно-комп'ютерні технології

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

Дорош М. С., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Єременко В. С., доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»;

Зайцев С. В., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Криворучко О. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний торговельно-економічний університет;

Мелешко С. В., доктор технічних наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет;

Павленко П. М., доктор технічних наук, професор, Національний авіаційний університет;

Семенов С. Г., доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Щоцюра С. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури.

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, НУ «Чернігівська політехніка»;

Денисов Ю. О., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Приступа А. Л., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

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

Степенко С. А., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

Хімічні та харчові технології

Антонюк І. Ю., кандидат технічних наук, доцент, Державний торговельно-економічний університет;

Буяльська Н. П., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Гуменюк О. Л., кандидат хімічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Дударев І. М., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Звірко О. І., доктор технічних наук, професор, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України;

Плаван В. П., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну;

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

Сиза О. І., доктор технічних наук, професор, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка;

Трус І. М., кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»;

Цибуля С. Д., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Челябієва В. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Будівництво та геодезія

Білик С. І., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Крячок С. Д., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Михайловський Д. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Паляниця Б. Б., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Львівська політехніка»;

Савенко В. І., кандидат технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Терещук О. І., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

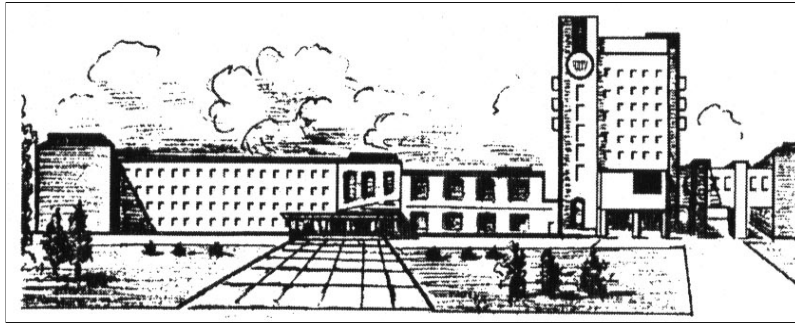
Шульц Р. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Юрченко В. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури.



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

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



# ***TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES***

***SCIENTIFIC JOURNAL***

***ISSUE № 3(33)***

Chernihiv 2023

UDC 62:67.05

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-2(32)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv Polytechnic National University (protocol № 11 dated 25.09.2023). 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 (as amended from February 9, 2021 № 157), according to which magazine is assigned a category «B».

**Technical sciences and technologies : scientific journal / Chernihiv Polytechnic National University. – Chernihiv : Chernihiv Polytechnic National University, 2023. – № 3(33). – 252 p.**

This journal contains articles devoted to theoretical and experimental research in the scientific direction "Technical Sciences" by specialties: applied mechanics, materials science and machine building, information and computer technologies, electric power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering, chemical and food technologies, construction and geodesy. 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 Polytechnic National University.

**Deputy Editor in chief:**

Sapon S.P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University.

**Members of the Editorial Board:**

Applied mechanics, materials science and machine building

Boyko S.V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Bolotov H.P., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Dmytriiiv D.O., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kherson National Technical University;

Yeroshenko A.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Kalchenko V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Kalchenko V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Markov O.Ye., Doctor of Technical Sciences, Professor, Donbaska derzhavna mashynobudivna akademiia;

Novomlynets O.O., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Pilipenko O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, leading scientific coworker, State Research Institute of Tests and Certification of Armament and Military Technique;

Povstianoi O.Yu., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Lutsk National Technical University;

Sira N.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Fedorynenko D.Yu. Doctor of Technical Sciences, Professor, Tohoku University, Japan;

Yushchenko S.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Information and computer technologies

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

Dorosh M.S., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Yeremenko V.S., Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»;

Zaitsev S.V., Doctor of Technical Sciences, Chernihiv Polytechnic National University.

Kazymyr V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Kryvoruchko O.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Trade and Economics;

Meleshko Y.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Central Ukrainian National Technical University;

Pavlenko P.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Aviation University;

Semenov S.H., Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»;

Tsiutsiura S.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture.

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; Chernihiv Polytechnic National University;

Denysov Yu.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Prystupa A.L., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

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

Stepenko S.A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Chemical and food technologies

Antoniuk I.Yu., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, State University of Trade and Economics;

Buialska N.P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Gumeniuk O.L., PhD in Chemical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Dudarev I.M., Doctor of Technical Science, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Zvirko O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine;

Plavan V.P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Technologies and Design;

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

Syza O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Taras Shevchenko National University «Chernihiv Collegium»;

Trus I. M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»;

Tsybulia S.D., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Cheliabiieva V.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Construction and geodesy

Bilyk S.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Kriachok S.D., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Mykhailovskiy D.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Palianysia B.B., PhD in Technical Sciences, PhD in Technical Sciences, Lviv Polytechnic National University;

Savenko V.I., PhD in Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Shults R.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Tereshchuk O.I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University

Yurchenko V.V., Doctor of Technical Sciences, PhD in Technical Sciences, Kyiv National University of Construction and Architecture.



## ЗМІСТ

РОЗДІЛ I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО  
ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>Солнцев О., Сапон С.</i> Обладнання для гібридних технологій формоутворення виробів з полімерних матеріалів. ....	9
<i>Беляєва А.</i> Обґрунтування конструктивних та експлуатаційних вимог до підйомника для обслуговування опор вуличного освітлення. ....	23
<i>Імбірович Н., Повстяной О.</i> Дослідження корозійної тривкості пористих проникних матеріалів зі захисними покриттями нового покоління. ....	30
<i>Кравець В., Кравець О., Адаменко Ю., Лапковський С., Кореньков В., Фролов В.</i> Аналіз розмірних зв'язків роботизованого комплексу. ....	40
<i>Miková L.</i> Design of a functional model of a three-wheeled mobile robot. ....	53
<i>Tuleja P., Danilo T.</i> Reconstruction of electro-pneumatic mechanism as part of a laboratory environment for teaching needs. ....	59
<i>Haievskiy V., Haievskiy O., Puzik O.</i> Study of the variability of the number of pores per unit length of the weld. ....	68
<i>Kovaľuk D., Semjon J., Sabol M., Rusiňák D.</i> Design of a training workplace with a collaborative and industrial robot. ....	76
<i>Коромич Ю.</i> Складання математичної моделі вібраційного столу. ....	83
<i>Mlinarček D., Jánoš R.</i> Use of the omron f150-3 camera for the positioning of randomly distributed parts. ....	97
<i>Гаєриш П., Юсіфов В.</i> Підвищення продуктивності екскаватора CAT 349D2. ....	103
<i>Protsenko P.</i> Analysis of the influence of the screw pitch of the spiral groove on the process of profiling a spiral tube by roller spinning. ....	111

## РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Костюк А.</i> Методи та алгоритми підвищення ефективності проектування інтерактивних інтерфейсів. ....	121
<i>Дифучина О.</i> Метод оптимізації параметрів паралельних обчислень. ....	130
<i>Щур В., Кулаков Ю.</i> Оптимізований адаптивний метод балансування навантаження в мережах SDN на основі ANT COLONY OPTIMIZATION. ....	141
<i>Ткач Ю., Шелест М., Синенко М., Петренко Т.</i> Історія виникнення клептографії та її місце в безпеці інформації. ....	150

## РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Ющенко Н., Буяльська Н., Челябієва В., Березкина Н.</i> Технологія кексів з додаванням калини звичайної ( <i>Viburnum opulus L.</i> ) та гарбуза звичайного ( <i>Cucurbita pepo L.</i> ). ....	162
<i>Забалуєв А., Ущановський Д., Васильєв Г., Ліночева О., Воробйова В.</i> Вплив складу електроліту та природи розчинника на фізико-механічні властивості гальванічних покриттів на основі нікелю. ....	170

## РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

<i>Зайцев С., Тіхенко В.</i> Удосконалення методів діагностування автотрансформатора із зовнішнім та внутрішнім дефектом у високовольтному уводі. ....	180
<i>Кириленко Я., Воробйов Б., Сенченко С., Кутовий Ю., Лю Хань.</i> Розробка системи керування тягового асинхронного електроприводу на основі нейромережі. ....	198

**РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ**

<i>Давибіда Л.</i> Аналіз зв'язку мінливості рівнів підземних вод та індексів метеорологічних посух засобами платформи Google Earth Engine. ....	205
<i>Колесников А., Замула М.</i> Системні механізми структуроутворення у багатокомпонентних композиційних матеріалах. ....	215
<i>Крячок С., Беленок В., Гладілін В.</i> Застосування геодезичного моніторингу для контролю деформацій відновлених споруд. ....	227
<i>Кухтар Д., Олеськів Р.</i> Метод диференціальної радарної інтерферометрії для моніторингу територій підземного сховища газу. ....	235
<i>Терещук О., Коваленко С., Сахно Є., Щербак Ю., Мовенко В.</i> Проект озеленення території паркової зони «Березовий гай» у м. Чернігів. ....	242
<b>ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ. ....</b>	<b>251</b>

## CONTENT

SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE  
AND MACHINE BUILDING

<i>Solntsev O., Sapon S.</i> Equipment for hybrid manufacturing technologies of polymer materials parts .....	9
<i>Bieliaieva A.</i> Justification of constructive and operational requirements for an elevator for maintenance of street lighting supports.....	23
<i>Imbirovych N., Povstianoi O.</i> Investigation of corrosion resistance of porous permeable materials with protective coatings of the new generation .....	30
<i>Kravets V., Kravets O., Adamenko Yu., Lapkovsky S., Korenkov V., Frolov V.</i> Analysis of dimensional relationships of the robotic complex.....	40
<i>Miková L.</i> Design of a functional model of a three-wheeled mobile robot.....	53
<i>Tuleja P., Danilo T.</i> Reconstruction of electro-pneumatic mechanism as part of a laboratory environment for teaching needs. ....	59
<i>Haievskiy V., Haievskiy O., Puzik O.</i> Study of the variability of the number of pores per unit length of the weld.....	68
<i>Koval'uk D., Semjon J., Sabol M., Rusiňák D.</i> Design of a training workplace with a collaborative and industrial robot .....	76
<i>Korotych Y.</i> Vibration table mathematical model composing.....	83
<i>Mlinarček D., Jánoš R.</i> Use of the omron f150-3 camera for the positioning of randomly distributed parts .....	97
<i>Havrysh P., Usifov V.</i> Increased productivity of excavator cat 349D2 .....	103
<i>Protsenko P.</i> Analysis of the influence of the screw pitch of the spiral groove on the process of profiling a spiral tube by roller spinning.....	111

## SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

<i>Kostyuk A.</i> Methods and algorithms for improving the efficiency of designing interactive interfaces .....	121
<i>Dyfuchyna O.</i> The method for parallel computing parameters optimization.....	130
<i>Shchur V., Kulakov Y.</i> Optimised adaptive load balancing method in SDN networks based on ANT COLONY OPTIMISATION.....	141
<i>Tkach Y., Shelest M., Synenko M., Petrenko T.</i> The history of kleptography and its place in information security .....	150

## SECTION III. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

<i>Yushchenko N., Buialska N., Cheliabiieva V., Berezkina N.</i> Technology for cupcakes with addition of Guelder-rose ( <i>Viburnum opulus</i> l.) and Pumpkin ( <i>Cucurbita pepo</i> l.).....	162
<i>Zabaluyev A., Uschapovskiy D., Vasiliev G., Linyucheva O., Vorobyova V.</i> Influence of the electrolyte composition and the solvent nature on the physical-mechanical characteristics of nickel-based galvanic coatings.....	170

## SECTION IV. ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

<i>Zaitsev S., Tikhenko V.</i> Improvement of methods of diagnosing a autotransformer with an external and internal defect in the high-voltage bushing.....	180
<i>Kyrylenko Y., Vorobiov B., Senchenko S., Kutovoi Y., Khan Liu.</i> Design of the control system of traction asynchronous electric drive based on neurocontroller .....	198

**SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY**

<b><i>Davybida L.</i></b> Analysis of the relationship between the variability of groundwater levels and indices of meteorological droughts using the google earth engine platform.....	205
<b><i>Kolesnikov A., Zamula M.</i></b> System mechanisms of structure formation in multicomponent composite materials.....	215
<b><i>Kryachok S., Belenok V., Gladilin V.</i></b> Application of geodetic monitoring to control deformations of reconstructed structures.....	227
<b><i>Kukhtar D., Oleskiv R.</i></b> Differential radar interferometry method for monitoring the areas of underground gas storage station.....	235
<b><i>Tereshchuk O., Kovalenko S., Sakhno Y., Shcherbak Y., Movenko V.</i></b> Implementation of the project of landscaping of territory of the park zone "Berezovyy Hay" in Chernihiv.....	242
<b>BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES.....</b>	<b>251</b>



# РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-9-22

УДК 678.05

*Олексій Солнцев<sup>1</sup>, Сергій Сапон<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> аспірант кафедри конструювання машин, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [solntsevalex315@gmail.com](mailto:solntsevalex315@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3645-236X>

ResearcherID: ITU-5210-2023

<sup>2</sup> кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій машинобудування та деревообробки Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [s.sapon@gmail.com](mailto:s.sapon@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>.

ResearcherID: G-7764-2014. Scopus Author ID: 56736964700

## ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ГІБРИДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ФОРМОУТВОРЕННЯ ВИРОБІВ З ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

*В роботі проведено аналіз існуючих розробок і досліджень гібридних технологій формоутворення поверхонь, які поєднують 3D-друк з постобробкою. Потенціал гібридних технологій формоутворення полягає у створенні деталей зі складною просторовою геометрією та покращеною якістю і точністю виконавчих і базових поверхонь. Більш детально сконцентровано увагу на реалізації гібридних технологій на обладнанні з паралельною кінематикою. Виявлено проблематику, невирішені задачі та сформульовано перспективи подальших досліджень. Представлена в статті інформація має оглядовий характер.*

**Ключові слова:** гібридні технології формоутворення, адитивні технології, обладнання з паралельною кінематикою, полімерні матеріали.

*Рис.: 11. Бібл.: 17.*

**Актуальність теми дослідження.** Гібридні технології формоутворення на основі полімерів (Hybrid polymer-based manufacturing technology) викликали значний інтерес в останні роки завдяки їх потенціалу до виробництва деталей зі складною геометрією та функціональними характеристиками, яких неможливо досягти традиційними методами виробництва. Одним з різновидів гібридних технологій формоутворення є поєднання на одному обладнанні процесів адитивного виробництва (Additive Manufacturing) і субтрактивного виробництва (Subtractive Manufacturing) для виготовлення кінцевої деталі. Огляду саме таких технологій присвячена дана стаття.

На відміну від класичних методів 3D-друку, гібридні технології формоутворення на основі полімерів дозволяють використовувати традиційні конструкційні матеріали, що використовуються в технологіях масового виробництва, наприклад термопласти, а не їх аналоги (фотополімери, порошкові полімери), що значно розширює застосування технології. Але у класичних екструзійних методах 3D-друку із застосуванням термопластів суттєвою проблемою є якість та точність поверхонь виробів. В гібридних технологіях формоутворення основною функцією адитивного процесу (3D-друк) є створення конструкцій з просторово-складним геометричним профілем з необхідною точністю і мінімальною матеріаломісткістю. А функцією субтрактивного процесу, яким є механічна обробка з ЧПУ, є забезпечення кінцевої геометричної точності та якості поверхні виробів. Таким чином, гібридне виробництво створює можливості виготовлення деталей зі складною просторовою геометрією, але з покращеною якістю і точністю виконавчих поверхонь, основних і допоміжних баз. [1, 2]

Гібридні технології формоутворення на основі полімерів мають значний потенціал у низці специфічних сфер застосування та індустріальних секторів і тісно пов'язані з напрямками Індустрії 4.0. [3] (таблиця 1)

Таблиця 1 – Індустріальні сектори та приклади застосування гібридних технологій

Індустріальний сектор	Застосування гібридних технологій формоутворення
Робототехніка та автоматизація	Виробництво компонентів для робототехніки та систем автоматизації, таких як захвати, датчики та системи керування. Поєднання адитивних і субтрактивних процесів дозволяє виготовляти деталі з інтегрованими функціями, такими як різбові вставки або електричні контакти, які можуть спростити складання та підвищити продуктивність системи. Виготовлення інструментів та устаткування для автоматизації процесу складання вузлів.
Виробництво верстатів та машин	Виготовлення компонентів верстатів та машин зі складною геометрією поверхонь. Виготовлення спеціальних затискачів складної форми для верстатних пристроїв.
Аерокосмічна промисловість	Виготовлення складних, точних, полегшених деталей за допомогою топологічної оптимізації на етапі проектування та використання можливостей адитивного виробництва для виготовлення деталей з частковим заповненням внутрішньої структури.
Медична галузь	Виготовлення імплантів та протезів з високою точністю та мінімальною шорсткістю складних поверхонь.

Джерело: розроблено авторами.

Загалом використання гібридних технологій формоутворення має наступні переваги:

- підвищення ефективності за рахунок зменшення кількості технологічних операцій, необхідних для виготовлення деталі, кількості одиниць обладнання та необхідних людських ресурсів для обслуговування цього обладнання, що сумарно призводить до скорочення часу виготовлення та зниження витрат;

- підвищення геометричної точності та якості поверхонь деталей за рахунок поєднання на одній технологічній операції адитивних технологій для швидкого формоутворення та субтрактивних технологій для чистової обробки виконавчих та базових поверхонь деталі.

- виробництво деталей з кастомізованими функціями, які неможливо виготовити лише за допомогою традиційних методів виробництва.

**Постановка проблеми.** Впровадження гібридних технологій формоутворення деталей з полімерних матеріалів має низку проблемних моментів. Перш за все це проблематика обладнання для гібридного формоутворення поверхонь з полімерних матеріалів. Класичне обладнання адитивного виробництва із застосуванням полімерів - 3D принтери для екструзійного друку - не мають достатньої жорсткості для реалізації субтрактивних процесів з високими показниками точності та якості оброблених поверхонь. Відомі рішення з інтеграції адитивних та субтрактивних процесів на металообробних верстатах з ЧПУ [4,5]. Однак, через високу вартість подібного обладнання такі рішення не можна вважати широкодоступними технологіями для кінцевого виробника. А надлишкова жорсткість такого обладнання, закладена для чорнкової обробки металів, не потрібна для постобробки полімерів.

Процеси механічної обробки полімерів є недостатньо дослідженою темою в порівнянні з процесами механічної обробки металів. Крім того значний ступінь невизначеності додають анізотропність та складнопередбачувані дефекти деталей формоутворених технологіями 3D-друку. Тому існує проблема фізико-механічних особливостей процесів постобробки полімерних виробів утворених адитивним способом. Вирішення цієї проблеми потребує додаткових досліджень, як теоретичних так і експериментальних.

Проблема програмного забезпечення. На сьогоднішній день генерація керуючої програми для адитивного та субтрактивного виробництва значно відрізняються. Тому задача управління процесом гібридного формоутворення для підвищення точності деталей за

рахунок постобробки є актуальною. Адитивне виробництво допускає роботу з stl-файлами (сіточними форматами) а утворення формоутворюючих рухів здійснюється виключно по прямим траєкторіям, які лінійно апроксимують необхідний контур.

Ще однією проблемою гібридних технологій формоутворення є необхідність інтеграції кількох різних технологічних процесів, що створює бар'єри зі сторони апаратного забезпечення, програмного забезпечення та інтеграції систем керування.

Часто гібридні технології формоутворення передбачають використання різних матеріалів, що може створити труднощі під час постобробки деталей з різнорідних матеріалів. Особливою проблемою є необхідність у адаптивних системах, які б враховували анізотропічність матеріалу при обробці таких деталей шляхом коригування режимів обробки з максимальною швидкістю. До цього слід додати необхідність забезпечення сумісності матеріалів і адгезії, особливо при поєднанні різних типів термопластів.

**Метою статті** є огляд існуючих сучасних розробок і впровадження обладнання для гібридних технологій формоутворення виробів з матеріалів на основі полімерів для виявлення, систематизації проблематики і невирішених задач та формулювання перспектив подальших досліджень.

**Виклад основного матеріалу.** На сьогоднішній день сформоване певне розуміння терміну «гібридні технології», яке за думкою авторів суперечить суті цього поняття. Сьогодні у більшості відкритих джерел поняття гібридних виробничих технологій вводиться виключно через поєднання підходів до формоутворення деталей, тобто гібридні технології пояснюються виключно через поєднання адитивних та субтрактивних технологій. [1, 2] Також у більшості досліджень гібридні технології згадуються виключно у застосуванні до виробництва деталей з металу. Це пояснюється перш за все тим, що основними лідерами у виробництві гібридного обладнання є великі виробники верстатів з ЧПК, які з ростом популярності адитивних технологій почали інтегрувати модулі для 3D друку у свої верстати та системи. [3, 4, 5]

Автори пропонують розглядати гібридні технології не тільки у контексті поєднання підходів до формоутворення, а саме через поєднання різних типів технологій на одному устаткуванні. Наприклад, обладнання, що може комбінувати екструзійний друк термопластами з литтям багатокomпонентних поліуретанів, як іншою технологією теж можна вважати гібридною технологією. Хоча основна проблема гібридного технологічного обладнання розкривається саме при поєднанні адитивних та субтрактивних технологій, про що було сказано вище.

Матеріали, представлені далі в статті, викладені відповідно до мети роботи за наступною структурно-логічною послідовністю (схемою):

- 1) Аналіз існуючих розробок та досліджень обладнання для гібридних технологій формоутворення.
- 2) Виявлення проблематики і невирішених задач.
- 3) Формулювання перспектив подальших досліджень.

**Аналіз існуючих розробок та досліджень** обладнання для гібридних технологій формоутворення.

Як вже було зазначено, аналіз проведених досліджень показує, що гібридні технології пояснюються та досліджуються виключно через поєднання адитивних та субтрактивних технологій, не враховуючи можливості комбінування інших технологій. Також більшість досліджень розглядає гібридні технології виключно у розрізі застосування до металів. Це й визначає актуальність даного дослідження, через великий запит на полімерні та композитні деталі з одного боку, та недослідженість теми гібридних технологій формоутворення виробів з матеріалів на основі полімерів з іншої.

Cortina, M. [6] у своїй роботі наводить один з прикладів поєднання технології селективного лазерного спікання (Selective Laser Sintering) та постобробки надрукованих металічних деталей різанням. Виробник високошвидкісних обробних центрів Matsuura з 2003 року розробляє гібридні фрезерні верстати для лазерного спікання металу під назвою LUMEX [7]. Ця серія складається з двох різних гібридних 3Д-принтерів, які відрізняються розміром робочої зони, Lumex Avance 25 і Lumex Avance 60. В обох моделях встановлено ітербієвий волоконний лазер, а операція фрезерування виконується за замовчуванням після обробки кожних 10 шарів, як показано на рис. 1.

Однозначним недоліком системи є наявність порошку, що змішується з стружкою під час обробки та заважає спіканню після обробки.

Аналогічний принцип селективного лазерного спікання використовується і до порошків на основі полімерів.

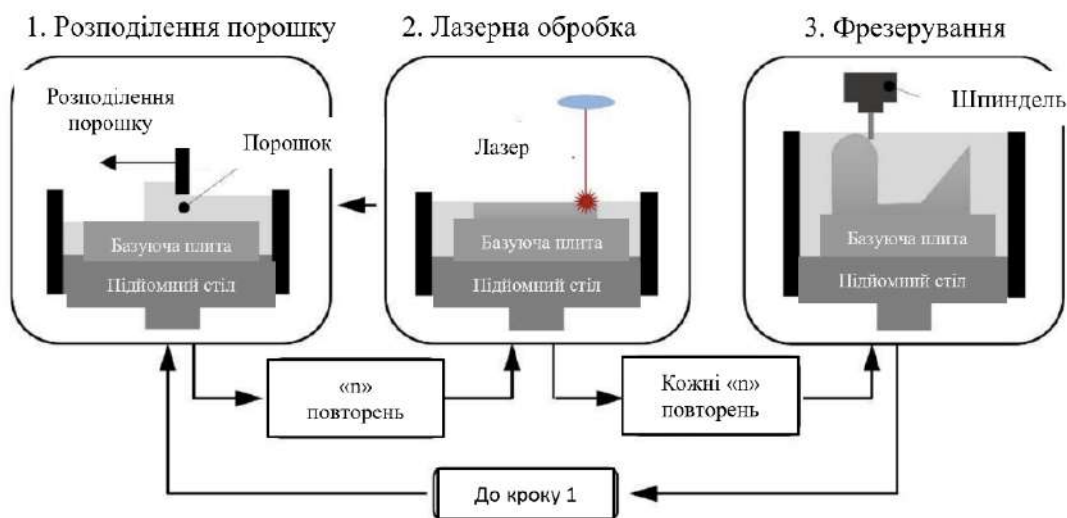


Рис.1 Схематичне зображення процесу гібридного виробництва деталей з металу за технологією селективного лазерного спікання [6]

У статті розглянуті також найпопулярніші кінематичні схеми (рис. 2), що використовуються у обладнанні для гібридних технологій формоутворення на основі селективного лазерного спікання. Жоден з наведених варіантів не використовує механізми паралельної структури.

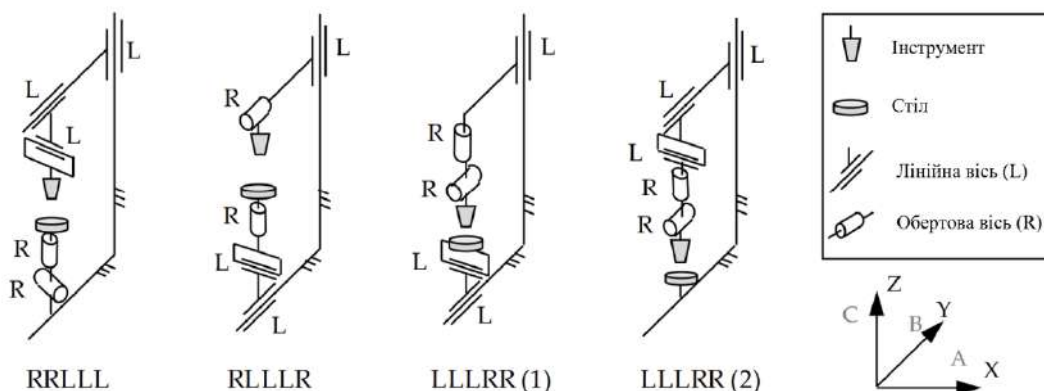


Рис. 2 Види найбільш популярних кінематичних ланок, що використовуються в конструкціях обладнання для гібридних технологій формоутворення [6]

Cortina, M. у своїй праці з посиланням на Flynn та ін. [8] також розглядає та систематизує виклики та бар'єри, характерні для обладнання для гібридних технологій формоутворення. (рис. 3). Не дивлячись на те що стаття орієнтована на гібридне виробництво деталей з металів та застосування селективного лазерного спікання металічних порошків, розглянуті виклики (складність поєднання різних технологічних процесів на одному технологічному обладнанні) є актуальними і для гібридних процесів пов'язаних з виробництвом деталей на основі полімерів.



Рис. 3 Виклики до обладнання для гібридних технологій формоутворення [6]

У статті Лі та ін. [9] пропонується огляд 6-осового гібридного адитивно-субтрактивного процесу виробництва з використанням роботизованої руки з шістьма ступенями вільності у поєднанні із платформою для виготовлення деталей (рис. 4). Гібридний процес формоутворення реалізовано за допомогою роботизованої руки з шістьма ступенями вільності, оснащеної кількома змінними інструментами та інтегрованою виробничою платформою. Автори зазначають, що отримані результати дослідження гібридного адитивно-субтрактивного процесу показали, що гібридні технології формоутворення мають значний потенціал для скорочення часу виробництва, виготовлення деталей з кращою якістю поверхні. Основною перевагою використання роботизованої руки, як системи переміщення, є можливість утворення якісної поверхні довільної форми завдяки динамічному регулюванню напрямку осі інструменту та усунення потреби в друці підтримуючого матеріалу.



Рис. 4 Компоненти гібридного адитивно-субтрактивного виробничого процесу [9]: а – роботизована рука, б – змінні головки, в – платформа

У статті [10] X. Song та інші автори концентрують увагу на проблематиці поєднання адитивного та субтрактивного виробництва з точки зору обмеженості більшості існуючих компонентів для гібридного та адитивного виробництва 3-ма осями. Більшість процесів адитивного

виробництва є пошаровими з трьома лінійними рухами по осях X, Y і Z. Однак існують недоліки, пов'язані з такими обмеженими рухами. Наприклад неконформні властивості матеріалу, ефект сходів і обмеження на нарощування навколо вставок. Щоб уможливити 6-осьові переміщення між інструментом і заготовкою, автори досліджують механізм Стюарта (рис. 5) та розробили недорогий прототип системи для адитивних та субтрактивних виробничих процесів, таких як моделювання наплавлення і постобробка з ЧПУ.

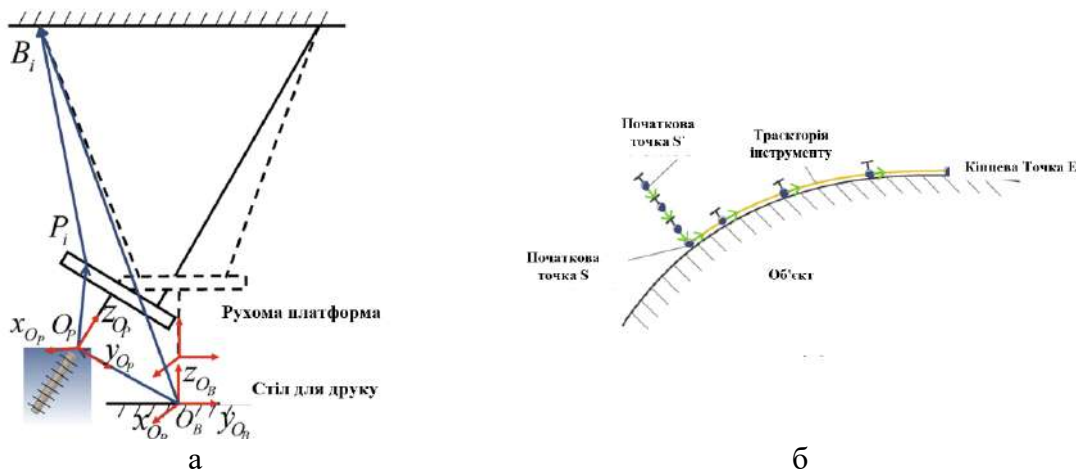


Рис. 5 Ілюстрація системи координат (а) і головних параметрів проходження нелінійного контуру (б) прототипу гібридної системи на основі механізму платформи Стюарта. [10]

В роботі обговорюються технічні проблеми при розробці такої системи, включаючи проектування апаратного забезпечення, планування та моделювання руху, перевірку обмежень платформи, моделювання руху інструменту та калібрування платформи.

У статті М. Milutinović та інші автори описують гібридну виробничу систему на основі паралельної кінематики, але концентрують увагу виключно на кінематичному аналізі та аналізі робочого простору системи, не описуючи переваги або недоліки використання такої системи у гібридних процесах формоутворення (рис. 6). [11]

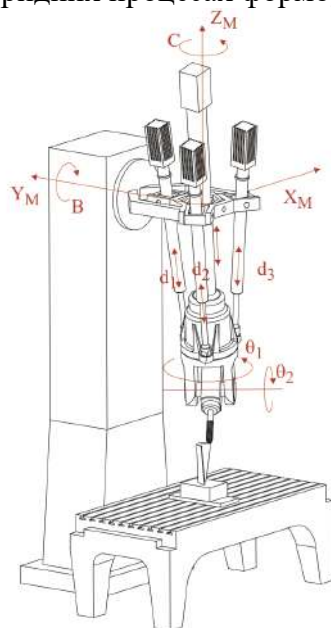


Рис. 6. Обладнання для гібридних процесів формоутворення на основі Tricept кінематики [11]

Нижче представлено аналіз існуючих видів обладнання, на яких можлива реалізація гібридних технологій формоутворення деталей з полімерних матеріалів.

Мультифункціональний 3D принтер Namma Eva Hybrid 3D (рис. 7) є системою гібридного виробництва, яка поєднує технології адитивного та субтрактивного виробництва. Об'єм виробів обмежений розмірами робочої зони (мм) 500 x 500 x 500. В Namma Eva Hybrid 3D передбачена реалізація 3-х технологій формоутворення: 3D-друк, механічна обробка різанням, лазерна обробка. В даному типі обладнання передбачена тільки можливість ручної заміни інструментів (декілька видів модулів для 3D-друку, шпинделі різної потужності, лазерні різакі) [12].

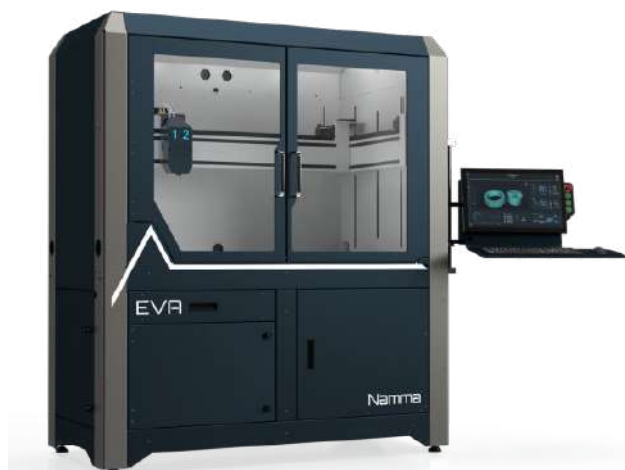


Рис. 6. Гібридний, мультифункціональний 3D принтер Namma Eva Hybrid 3D (Франція) [12]

Відсутність у Namma Eva Hybrid 3D можливості автоматизованої заміни інструменту не дозволяє максимально ефективно комбінувати різні технології в межах однієї технологічної операції.

Diabase H-Series 3D printer (рис. 8) - це система гібридного виробництва, побудована на основі багатокординатного верстата з ЧПК. Основною особливістю цього обладнання є система заміни інструмента на основі револьверної головки та багатокординатна пост-обробка та друк виробів [4].

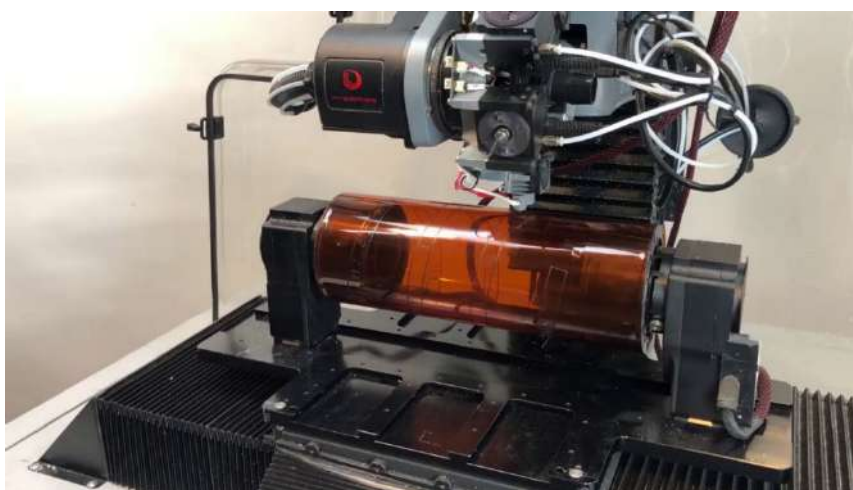


Рис. 7 Система гібридного виробництва Diabase H-Series (США) [4]

4D Pioneers 4Shift (рис. 9) - 3D-принтер на основі роботизованої системи з можливістю автоматичної заміни модулів друку, який здатний працювати з різними матеріалами на основі полімерів, включаючи силікон та композитні полімери [13]. Використання роботизованої руки, як системи переміщення, не дозволяє досягати високих показників точності оброблених поверхонь при постобробці та не забезпечує високої продуктивності формоутворення поверхонь.

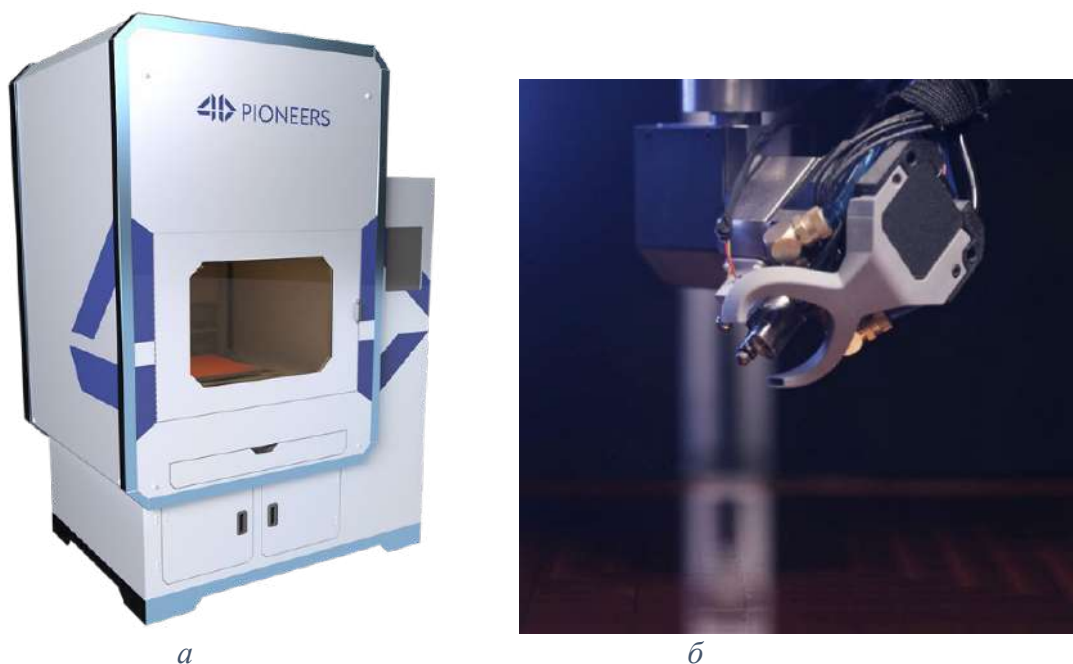
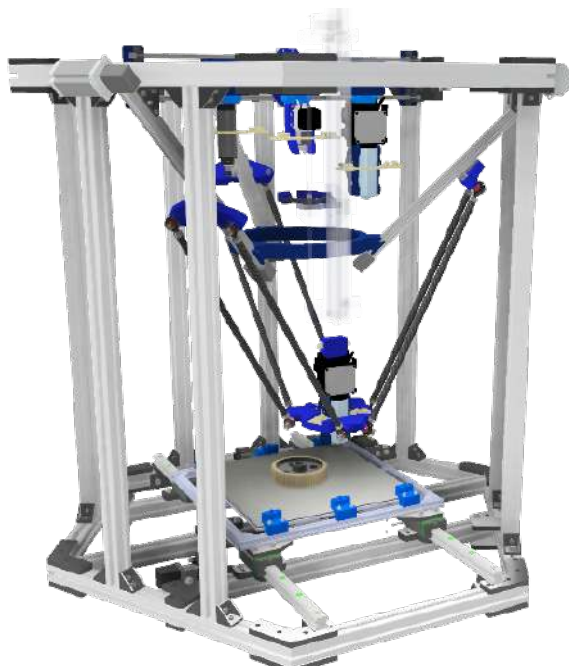


Рис. 8. 4D Pioneers, 4Shift 3D printer (Франція) [13]: а – загальний вид, б – роботизована рука з змінним модулем для 3D-друку.

На сьогодні випускниками Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» та Університету прикладних наук м. Хоф засновано стартап SmartZavod. [14] В даному стартапі зацентровано увагу на створенні обладнання для гібридної технології формоутворення деталей з полімерних матеріалів, яке б відповідало запитам ринку та вирішувало основні проблеми, які описані в цій статі. Зокрема система має в основі систему переміщення з структурами паралельної кінематики, що дозволяє мати достатні динамічні характеристики для швидкого та продуктивного 3D-друку з однієї сторони та достатню жорсткість для механічної постробки виробів з іншої.

Гібридний принтер SmartZavod (рис. 10) має унікальну систему автоматизованої заміни інструмента для поєднання різних технологій формоутворення деталей на одній технологічній операції без втручання оператора. Така система створює можливості створення складних деталей з частою зміною формоутворюючих інструментів. Унікальність системи полягає в тому, що система дозволяє автоматичну зміну різних модулів за типом технології та розміром (модуль для екструзії термопластів різних діаметрів сопла від 0,2 мм до 2,5 мм, модулі для змішування і дозування компаундів та силіконів, модулі для постобробки) у комбінації з системою переміщення на основі паралельної кінематики.





*Рис. 9. Концепт повністю автоматизованого гібридного 3D принтера SmartZavod з автоматизованою системою зміни інструменту та системою очищення столу [14]*

Додатково для повної автоматизації процесу виробництва прототипів та кінцевих виробів була розроблена система автоматичного очищення столу та зняття надрукованих виробів. Система захищена двома патентами на корисну модель [15, 16].

Зокрема результати роботи над створенням системи SmartZavod пройшли впровадження в навчальний процес на кафедрі конструювання машин НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» при викладанні дисципліни «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою» та стали частиною навчального посібника [17].

В таблиці 2 наведено систематизоване порівняння характеристик існуючого на сьогодні обладнання для гібридних технологій формоутворення.

Аналіз існуючих рішень показує, що в сегменті доступного обладнання гібридних технологій формоутворення виробів для малих та середніх підприємств не виявлено великої кількості рішень. Знайдені рішення мають ті чи інші обмеження, що ускладнюють його використання для кінцевих користувачів

Зокрема Namma має відносно велику робочу зону та достатню для полімерних деталей точність постобробки. Але обрана кінематика обмежує використання лише за 3-ма осями. Відсутність автоматизованої зміни інструмента робить використання обладнання у застосуванні до виробництва складних виробів, де потрібна часта заміна інструменту протягом однієї технологічної операції, досить незручним для оператора або взагалі неможливим.

Рішення Diabase побудовано на основі верстата класичної компоновки з барабаном в якості системи зміни інструменту. Компоновка має достатню жорсткість для операцій постобробки. Компоновка модуля адитивного формоутворення не дає можливості використовувати термоактивну камеру, що значно обмежує кількість полімерів які можна застосувати.

Таблиця 2 – Порівняння характеристик обладнання для гібридних технологій формоутворення виробів з полімерних матеріалів

Характеристики	Найменування обладнання			
	Smart Zavod	Namma Eva Hybrid 3D	Diabase H-Series 3D printer	4D Pioneers. 4Shift
Розміри робочої зони (мм)	450x450x450	1000x500x500	416x186x375	485x485x500
Точність позиціонування у трьох координатах (мм)	0,05	0,05	0,03	(немає даних)
Тип кінематики	Tripod. Паралельна кінематика	Cartexian XYZ.	Cartexian XYZ з поворотним столом	Роботизована рука на основі Cobots
Наявність автоматичної зміни виконавчого органу	+	-	+	+
Кількість технологій, що можуть бути реалізовані	5	3	2	3
Кількість осей, що використовується для формоутворення	3	3	5	5
Кількість інструментів	8	6	6	4
Швидкість адитивного формоутворення	300 мм/с	150 мм/с	150 мм/с	100 мм/с

*Джерело: розроблено авторами.*

Рішення 4D Pioneers побудовано на основі роботизованої руки та має системи зміни інструментів для 4 позицій. Роботизована рука та конструкція системи дає можливість зміни інструментів лише в обмеженому габариті. Тобто унеможливує зміну між інструментами наприклад для звичайного друку з соплом діаметром 0,4 мм та високопродуктивного друку більшими екструдерами. Також встановлення високошвидкісних шпинделів для постобробки або дозуючо-змішуючого обладнання є неможливим. Виробник не надає даних за точністю та максимальними швидкостями формоутворення, але враховуючи використання їм роботизованої руки, як системи переміщення можна зробити висновок про обмеження за цими параметрами.

Рішення SmartZavod враховує найважливіші виклики гібридного обладнання. Система зміни інструменту дозволяє оперувати з різними за типом та габаритами інструментами в автоматизованому циклі. Зокрема паралельна кінематика дозволяє працювати з високими швидкостями і прискореннями та має достатню жорсткість для постобробки полімерів за рахунок закритої кінематичної ланки та відсутності великих рухомих мас.

Також рішення є масштабованим під непланарний друк та обробку за більше ніж 3-ма осями. Основним недоліком рішення є складність механізмів паралельної структури та відсутність єдиного програмного забезпечення, яке давало б змогу ефективно та зручно використовувати різні технології та типи матеріалів на одній технологічній операції.

Аналіз наукових праць індексованих наукометричною базою Scopus за ключовими словами «Hybrid AND manufacturing» дозволяє оцінити кількість праць та динаміку росту досліджень в цій галузі з 2013 по 2022 рік.

Є однозначний тренд на збільшення досліджень у цій темі. Так кількість праць у 2020 році в два рази більше в порівнянні з 2014 (рис. 11, а). Лідируючими країнами є Китай, США, Німеччина (рис. 11, б).

З іншої сторони, глибший пошук показує, що кількість праць націлених на дослідження гібридних технологій формоутворення саме у застосуванні до полімерів є порівняно невеликою, що відкриває значні можливості для дослідження цієї теми. Пошук за ключовими словами, що включають «POLYMERS» дав усього 132 результати у

період з 2013 по 2022 роки, а детальний аналіз статей показав, що ці праці більше розглядають гібридність технологій з точки зору застосування різних композитних матеріалів.

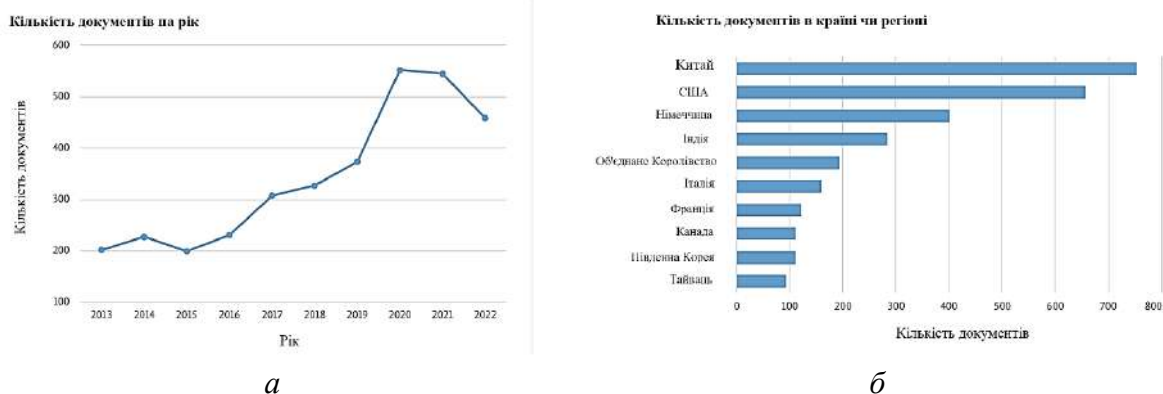


Рис. 10. Результати аналізу наукових праць індексованих наукометричною базою Scopus за ключовими словами «Hybrid AND manufacturing» за період з 2013 по 2022 роки: а - кількість праць по роках; б - кількість праць за країнами

**Висновки.** Таким чином можна виділити та систематизувати наступні проблеми обладнання для гібридних технологій формоутворення виробів з полімерних матеріалів.

1. Технічно досконале обладнання для гібридного формоутворення деталей з полімерів створене на базі оброблювальних центрів з ЧПУ не є широкодоступним для кінцевого споживача – малих та середніх виробничих підприємств. Таке обладнання має надлишкову жорсткість, передбачену для чорнової обробки металів, яка не потрібна для постобробки деталей з полімерів. Це також впливає на енергоефективність, враховуючи велику кількість допоміжних рухів необхідних для адитивного формоутворення з однієї сторони та великі рухомі маси вузлів верстата з іншої.

2. Існуючі рішення в доступному сегменті мають певні суттєві обмеження. Зокрема при виготовленні складних виробів, де потрібна часта зміна інструменту, існує проблема автоматизованої зміни інструмента. Наразі це реалізовано здебільшого на основі роботизованих рук, які в свою чергу не можуть забезпечити достатньої швидкості обробки, мають обмеження за робочою зоною та жорсткістю у крайніх положеннях робочої зони.

3. Питання постобробки полімерів є недостатньо дослідженим. Зокрема це стосується обробки деталей з полімерів, які отримані адитивними технологіями та мають специфічну внутрішню структуру і анізотропічні властивості матеріалу.

#### Подальші напрямки роботи

Спираючись на аналіз існуючих рішень подальший напрямок роботи включає наступні питання:

1) аналіз доцільності використання рухомої системи на основі паралельної кінематики до гібридного обладнання для формоутворення деталей з полімерів з врахуванням визначеної проблематики та критеріїв до обладнання;

2) динамічний аналіз рухомої формоутворюючої системи з механізмами паралельної кінематики;

3) аналіз процесів механічної постобробки деталей з полімерів та композитів отриманих адитивним виробництвом;

4) експериментальне підтвердження ефективності та працездатності розробленої системи автоматизованої зміни інструменту на різних типах та габаритах інструменту; оцінка часу заміни інструменту, як одного з ключових параметрів ефективності роботи системи;

5) оцінка розробленого та побудованого прототипу обладнання для гібридного формоутворення на основі механізмів паралельної структури;

б) дослідне впровадження системи на виробничих підприємствах України та Німеччини;

Актуальність подальших досліджень та розробки гібридних технологій формоутворення виробів на основі полімерів підтверджена запитами з різних секторів промисловості, а також недостатньою дослідженістю визначеною за пошуками у базі Scopus. Використання паралельної кінематики в основі рухомої системи гібридного принтера підтверджено дослідженнями динаміки процесів постобробки полімерів, що буде викладено авторами у подальших статтях.

### Список використаних джерел

1. Grzesik, W. Hybrid Manufacturing Processes. Physical Fundamentals, Modelling and Rational Applications / W. Grzesik, A. Ruszaj. – Springer, UK. – 2021. – 234 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77107-2>.

2. Nagel, J. Hybrid Manufacturing System Design and Development // Manufacturing System. Edited by Dr. Faieza Abdul Aziz / J. Nagel, F. Liou. – 2012. – P. 223-246. DOI: <https://doi.org/10.5772/2234>.

3. Kuznietsov, Y. Structural morphological synthesis of parallel kinematics based hybrid 3D-printer and connection with the challenges of INDUSTRY 4.0 / Y. Kuznietsov, O. Solntsev // Journal of the Technical University of Gabrovo. – 2022. – Vol. 65. – Pp. 3-7.

4. Diabase Engineering [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.diabase-machines.com/>

5. CEAD [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ceadgroup.com/solutions/gantry-based-solutions/bead/>

6. Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations / M. Cortina, J. Arrizubieta, J. Ruiz, E. Ukar, A. Lamikiz // Materials. – 2018. – Vol. 11(12). – 2583 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11122583>

7. Lumex. Matsuura [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.lumex-matsuura.com/english/>

8. Hybrid Additive and Subtractive Machine Tools – Research and Industrial Developments / J. M. Flynn, A. Shokrani, S. T. Newman, V. Dhokia // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2016. – Vol. 101. – Pp. 79-101.

9. Li, L. A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies. / L. Li, A. Haghghi, Y. Yang // Journal Manuf. Process. – 2018. – 33. – Pp. 150–160.

10. Song, X. (2015). Development of a Low-Cost Parallel Kinematic Machine for Multidirectional Additive Manufacturing / X. Song, Y. Pan, Y. Chen // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2015. – Vol. 137. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4028897>.

11. Milutinović, M. Kinematic modelling of hybrid parallel-serial five-axis machine tool / M. Milutinović, N. Slavković, D. Milutinovic // FME Transactions. – 2013. – Vol. 41. – Pp. 1-10.

12. Namma. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://namma-france.com/en/eva/>

13. 4DPIONEERS corporation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.4dpi-oneers.com/4shift/>

14. SmartZavod [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.smartzavod.com/>

15. Автоматизована система відокремлення і видалення надрукованого зразку зі столу та очищення столу після друку на 3D-принтері : патент 153465 UA : B33Y10/00 / Солнцев О. В., Яхно А. С. – № u202204290, заявл. 14.11.2022, опубл. 12.07.2023, Бюл. № 28.

16. Автоматизований гібридний 3D-принтер : заявка № u202204302, 14.11.2022, B33Y30/00, на одержання патенту України на корисну модель / Солнцев О. В., Яхно А. С. – Рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель № 6828/ЗУ/23 від 05.07.2023.

17. Кузнецов, Ю. М. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою. Лабораторний практикум : навч. посіб. / Ю. М. Кузнецов. – Київ : НТУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», 2022. – 70 с.

### References

1. Grzesik, Wit & Ruszaj, Adam. (2021). Hybrid Manufacturing Processes, Physical Fundamentals, Modelling and Rational Applications. <http://doi.org/10.1007/978-3-030-77107-2>.
2. Nagel, Jacquelyn & Liou, Frank. (2012). Hybrid Manufacturing System Design and Development. <http://doi.org/10.5772/2234>.
3. Kuznietsov, Yu., Solntsev O. (2022). Structural morphological synthesis of parallel kinematics based hybrid 3D-printer and connection with the challenges of INDUSTRY 4.0. Journal of the Technical University of Gabrovo, 65, 1-6.
4. Diabase Engineering. (n.d.). <https://www.diasemachines.com/>.
5. CEAD. (n.d.). <https://ceadgroup.com/solutions/gantry-based-solutions/bead/>.
6. Cortina, M., Arrizubieta, J., Ruiz, J., Ukar, E., Lamikiz, A. (2018). Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations. Materials, 11(12), 2583. <https://doi.org/10.3390/ma11122583>.
7. Lumex. Matsuura. (n.d.). <http://www.lumex-matsuura.com/english/>.
8. Flynn, J.M., Shokrani, A., Newman, S.T., Dhokia, V. (2016). Hybrid Additive and Subtractive Machine Tools-Research and Industrial Developments. International journal Mach. Tools Manuf, 101, 79–101.
9. Li, L., Haghghi, A., Yang, Y. (2018). A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies. Journal Manuf. Process, 33, 150–160.
10. Song, X., Pan, Y., & Chen, Y. (2015). Development of a Low-Cost Parallel Kinematic Machine for Multidirectional Additive Manufacturing. Journal of Manufacturing Science and Engineering-transactions of The Asme, 137, 021005.
11. Milutinović, Milan & Slavković, Nikola & Milutinovic, Dragan. (2013). Kinematic modelling of hybrid parallel-serial five-axis machine tool. FME Transactions, 41, 1-10.
12. Namma. (n.d.). <https://namma-france.com/en/eva/>.
13. 4DPIONEERS corporation. (n.d.). <https://www.4dpioneers.com/4shift/>.
14. SmartZavod. (n.d.). <http://www.smartzavod.com/>.
15. Solntsev O. V., Yakhno A. S. (2023). Automated system for separating and removing the printed sample from the table and cleaning the table after printing on a 3D printer (Ukrainian patent for a utility model №153465 UA, B33Y10/00). Bulletin №28.
16. Solntsev O. V., Yakhno A. S. (2023). Automated hybrid 3D printer (Application № u202204302, 14.11.2022, B33Y30/00, for obtaining a patent of Ukraine for a utility model) Decision on the issuance of a declaratory patent for a utility model № 6828/ZU/23 of 05.07.2023.
17. Kuznietsov, Yu. (2022). Technological equipment with parallel kinematics. Laboratory Workshop. Kyiv: National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

Отримано 07.08.2023

UDC 678.05

***Oleksii Solntsev<sup>1</sup>, Serhii Sapon<sup>2</sup>***

<sup>1</sup> PhD Student, Department of machine design, National technical University of Ukraine “Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic institute”, Ukraine E-mail: [solntsevalex315@gmail.com](mailto:solntsevalex315@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3645-236X>  
ResearcherID: ITU-5210-2023

<sup>2</sup> PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Wood Technology Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)  
E-mail: [s.sapon@gmail.com](mailto:s.sapon@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>.  
ResearcherID: G-7764-2014. Scopus Author ID: 56736964700

## EQUIPMENT FOR HYBRID MANUFACTURING TECHNOLOGIES OF POLYMER MATERIALS PARTS

*Hybrid polymer-based manufacturing technologies have significant potential in the production of components with complex geometries and functional characteristics that cannot be achieved by traditional methods, as well as in several specific applications and industrial sectors related to Industry 4.0: robotics and automation, medicine, aerospace, machine tools, and machinery. The use of hybrid manufacturing technologies, including additive and subtractive, increases production efficiency by reducing the amount of required human and technical resources; enables the production of customized parts that cannot be*

produced using traditional equipment, as well as parts with complex spatial geometry and improved quality and accuracy of the working and base surfaces.

Scientific research and analysis have shown that polymer processing requires further study. Additionally, the introduction of hybrid polymer-based manufacturing technologies has a number of problems: lack of a sufficient theoretical and experimental basis, insufficient accuracy of equipment, too high price for widespread use, software development, integration of several technological processes, and the frequent need for equipment to use different materials simultaneously, which can create a problem with their compatibility.

The article's purpose is to review the existing modern solutions and implementation of equipment for hybrid polymer-based manufacturing to identify and systematize problems and formulate prospects for further research.

The article analyses the existing types of equipment that can be used to implement hybrid polymer-based manufacturing technologies. Their characteristics are compared, and the advantages and disadvantages are considered, which were later identified and systematized into three main problems: the inaccessibility of technically advanced equipment for small and medium businesses, as well as its excessive rigidity and low energy efficiency; significant limitations in the existing available solutions; insufficient research on the issue of polymers post-processing. The article considers the concept of equipment for hybrid polymer-based manufacturing, which would meet market demands and solve these main problems. The research presents a unique system of automated tool change that can combine different technologies in one operation without the operator's intervention.

Presented in the article information is an overview. Further, the research materials can be used to analyze the feasibility of using a parallel kinematics moving system in hybrid polymer-based manufacturing technologies.

**Keywords:** hybrid manufacturing technologies, additive technologies, parallel kinematics equipment, polymer materials  
Fig.: 11. References: 17.

**Анастасія Беляєва**

*К.т.н. кафедра конструювання машин Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)*

*e-mail: [an\\_bell1212@ukr.net](mailto:an_bell1212@ukr.net) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1696-8687>*

## **ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИМОГ ДО ПІДЙОМНИКА ДЛЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ОПОР ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ**

*Стаття присвячена колісному підйомнику для обслуговування опор вуличного освітлення та обґрунтуванню конструктивних та експлуатаційних вимог до нього; є оглядовою та представлена інформація має оглядовий характер. Присвячена ця стаття вибору та обґрунтуванню конструкції підйомника для обслуговування опор вуличного освітлення. Метою роботи є розгляд недоліків побаченого раніше підйомника та обґрунтування нової конструкції колісного підйомника, а саме кожної окремої її деталі, що повинна забезпечувати експлуатацію на опорах вуличного освітлення з опорами різного поперечного перерізу. Особлива увага присвячена вибору гальм для підйомника, що мають відповідати певним умовам.*

*Ключові слова: опора; вуличне освітлення; аналіз; конструкція; підйомник.*

**Вступ.** Стаття є оглядовою та присвячена розгляду недоліків існуючої конструкції підйомника для обслуговування опор вуличного освітлення та обґрунтуванню вибору складових деталей подібної конструкції колісного підйомника. На підставі вищесказаного в даній статті будуть розглянуті недоліки вже запропонованого аналога колісного підйомника, обрана та обґрунтована конструкція колісного підйомника для обслуговування опор вуличного освітлення.

### **Постановка задачі**

Метою роботи є розгляд недоліків обраної конструкції аналога та обґрунтування складових нової конструкції колісного підйомника, а саме кожної окремої її деталі, що повинна забезпечувати експлуатаційні вимоги для опор різного поперечного перерізу вуличного освітлення.

### **Результати досліджень**

На підставі аналізу патентної інформації та конструкцій аналогічних підйомників, представлених на ринку України та деяких інших країн (Німеччина, США, Канада та Японія), можна сформулювати ряд конструктивних та експлуатаційних вимог.

Загальні вимоги до конструкції такі:

1. Конструкція підйомника повинна допускати збирання, розбирання, налагодження, обслуговування та дрібний ремонт в польових умовах без застосування спеціального інструменту.
2. Масогабаритні характеристики підйомника повинні допускати його транспортування в стандартному причепі автомобіля категорії В та перенесення зусиллям не більше 2-3 людей.
3. Конструкція підйомника повинна забезпечувати його справну роботу в широкому діапазоні температур, вологості, наявності атмосферних опадів, запиленості атмосфери.
4. Конструкція підйомника повинна забезпечувати надійне притискання коліс до верхніх опор.
5. Привід рушійних коліс - електричний (електромеханічний) від акумулятора або стороннього джерела струму за допомогою кабелю (наприклад, від переносного електричного генератора або бортової електричної системи автомобіля).

Оскільки рушієм підйомника виступає набір коліс, то до них також висуваються свої вимоги:

1. Рекомендується використання покупних коліс, розміри яких співмірні з розміром поперечного перерізу опори. Це можуть бути колеса для моторолерів, електричних самокатів тощо. Орієнтовний розмір 10"-16".

2. Диски коліс повинні мати конструктивні елементи, які дозволяють передавати на колесо крутний момент від приводу.

3. Колеса повинні мати широкий та високий профіль, а також розвинений протектор для надійного зчеплення з поверхнею опори.

4. Обов'язкове використання саме пневматичних шин, оскільки вони допускають регулювання тиску і - як наслідок - покращення зчеплення з поверхнею опори (бетон, оцинкований метал, фарбований метал, деревина).

5. Заборонене використання технічних коліс, які призначені для складської техніки, оскільки вони сприймають лише радіальне навантаження і не призначені для сприйняття тангенціального навантаження, що виражається в зминанні шини, проковзування шини відносно диску тощо.

Вкрай важливим елементом підйомника є гальмівна система. Тому до неї висуваються такі вимоги:

1. Режим роботи гальмівної системи - нормально увімкнений. Тобто, по замовчанню гальма затиснуті, а оператор розтискає їх залежно від потреб. Затискання повинне забезпечуватись лише механічним способом (пружина або вантаж), гідравлічна система не допускається.

2. Гальмівна система повинна бути продубльована щонайменше двома незалежними каналами керування.

3. Гальма повинні забезпечувати оптимальний температурний режим і не допускати перегріву.

4. Гальмами повинні бути оснащені всі колеса підйомника.

На рис. 1 наведено приклад прогнозованої конструкції підйомника [1] засобами Lego для обслуговування опор вуличного освітлення.



Рис. 1. Проект підйомника Lego

Перевагою такого типу підйомника є те, що він не залежить від стану ґрунту, а тому значно знижується ймовірність випадків, коли складно буде тримати рівновагу. Притискання коліс до поверхні опори здійснюється гравітаційним способом шляхом перекосу рами підйомника відносно осі опори. За даними ресурсу, підйомник випробовувався на флагштоку заввишки 8 метрів, завтовшки від 13 до 8 см і синтетичними канатами на поверхні опори.

В той же час представлений підйомник характеризується рядом недоліків:

- Притискання коліс до поверхні опори за допомогою перекосу рами не можна вважати надійним, оскільки притискне зусилля залежить від маси корисного навантаження, вильоту руки маніпулятора, вітрового навантаження тощо.

- Розміщення кабелів навколо руки маніпулятора може сприяти їхньому пошкодженню та обмеженню рухів маніпулятора.



- По мірі зменшення розмірів поперечного перерізу опори змінюється кут нахилу рами (чим менший переріз, тим більший кут нахилу), що може призвести до перевищення граничного кута тертя.

Розглянемо недоліки підйомника, що зображений на рис.1. Так, це демонстрація механізму для лазіння стовпами за допомогою Lego. Підйомник випробовується на флагштоку заввишки 8 метрів, завтовшки від 13 до 8 см і мотузками на поверхні.

І першим недоліком, що ми бачимо – це самі проводка, якими окутаний маніпулятор підйомника. Маніпулятор розрахований для руху в різних напрямках та ця проводка буде заважати вільному переміщенню маніпулятора і тому є небезпечним як для самої конструкції, так і для робітника та обладнання, які будуть в ньому знаходитися.

Другим вагомим недоліком є каркас з багатьма отворами, що не витримає великого навантаження і, в кращому випадку, погнеться чи не витримають з'єднувальні кріплення, а це загрожує подальшій роботі всього підйомника.

Третім недоліком є багато рухомих механізмів, що треба постійно обслуговувати та слідкувати за роботою самих механізмів.

Четвертим недоліком є те, що навантажений підйомник може пошкодити троси, що висять на стовпі, а також пошкодити робітнику та обладнанню.

Також великим недоліком є кріплення коліс, вони не витримають навантаження.

Ці всі недоліки порушують виконання основних конструктивних та експлуатаційних вимог до підйомників, що були описані вище.

Почнемо розгляд саме з конструкції підйомника та її обґрунтування, що запропонована на рис.2.

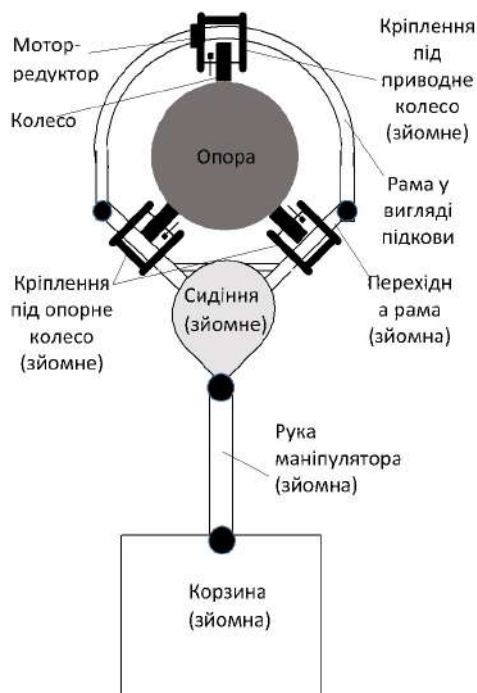


Рис.2 Пропонована конструкція підйомника (конструктивна схема, вигляд зверху)

Пропонується змінити форму каркасу підйомника з прямокутного на каркас у формі підкови, що буде розбірною (рис.2). При навантаженні ймовірність того, що вона деформується дуже мала. Також не буде зайвих кутів, що можуть травмувати людину при зборці підйомника і конструкція буде більш проста, також буде менше рухомих проблемних місць.

Матеріалом каркасу варто вибрати таким, що буде:

- легкий в обслуговуванні;
- можна провести дрібний ремонт в польових умовах без застосування спеціального інструменту.
- матеріал є доступним за характеристиками, ціною, на ринку;
- може використовуватися без пошкоджень у будь-яку погоду;
- має найвищий термін служби,
- не вимагає витрат на додаткову обробку (наприклад, фарбування),
- є механічно найміцнішим з аналогів.

Матеріал каркасу не повинен бути дуже легким, але повинен витримувати не аби які навантаження.

Переріз матиме прямокутну форму, так як при кріпленні коліс до каркасу можна буде не робити отворів і тому буде менше поверхонь, що дадуть тріщини, а, звідти, і меншу вірогідність її пошкодження. Для визначення параметрів труби та товщини її стінок потрібен розрахунок.

Що стосуються кріплення колеса, найбільш підходящим буде кріплення та колеса опорного моторного колеса самоката, що показано на рис. 3 [2].



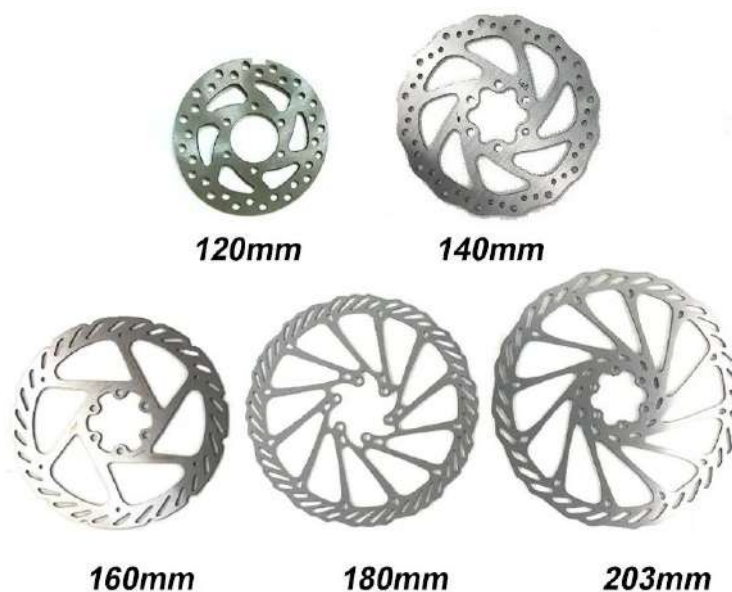
*Рис. 3 Опорне колесо індивідуального наземного транспортного засобу*

Колесо встановлюється у вилку, пера якої зазвичай виконуються у вигляді паралельних пластин із товстого листового металу. Взаємне розташування отворів осі та кріплення супортів стандартизовані та не потребують особливого розгляду. Гальмівні диски (рис.4) [3] мають декілька способів кріплення до маточини колеса. Найбільш поширеними є кріплення на шліць (так зване центр Lok), або на шість болтів, розташованих по колу діаметром 44 мм. Шліцьові кріплення можуть передавати дещо більші гальмівні моменти. Слід віддавати перевагу останньому кріпленню, оскільки більшість колісних дисків на ринку мають таке кріплення. А при потребі виготовити індивідуальний диск або маточину не потребуватиме складного обладнання, наприклад зуборізне обладнання. Достатньо мати свердлильний верстат і різьбонарізний інструмент. Таке кріплення дає

значну перевагу у надійності при навантаженні та створює передумови для встановлення супортів дискових гальм, що, в свою чергу, дозволяє не окутувати маніпулятор проводами. Гальмівні диски мають декілька типорозмірів, що дозволяє підібрати їх залежно від бажаного гальмівного моменту (рис.5) [4].



*Рис. 4. Типи кріплень дискових гальм до колеса*



*Рис. 5. Типорозміри дисків з 6-болтовим кріпленням*

Серед існуючих гальм, а саме:

- дискові гальма,
- барабанні гальма,
- ободні (колодкові) гальма.

були обрані саме дискові. Типи гальм розташовані у порядку ефективності. Тому, враховуючи переваги та недоліки кожного типу гальма, були обрані саме дискові гальма [5].

У дискових гальм є свої переваги та недоліки. Перевагами є:

- доступність комплектуючих на ринках,
- добре охолодження,
- добре працюють в широкому діапазоні погодних умов,
- легка гальмівна система,
- широка модуляція гальмівного зусилля,

- простота налаштування та обслуговування,
- зручний контроль гальмування.

В цьому випадку дуже важливо мати гальма з такими перевагами, а особливо для умов, в яких буде використовуватись підйомник [5].

Також у цих гальм є свої недоліки, а саме:

- при випадковому точковому ударі можливе пошкодження диску,
- може знадобитися періодичне регулювання та технічне обслуговування;
- погані, суворі умови їзди можуть зменшити продуктивність;
- дискові гальма нижчої якості схильні до пошкодження ротора.

Ці недоліки можна вважати незначними у зв'язку з тим, що їх використання буде більш лояльним, ніж вони призначені [5].

Самі колеса необхідно обирати за наступними параметрами:

- вони повинні витримувати велике тангенціальне навантаження,
- шини та тиск в них необхідно підбирати так, щоб було добре зачеплення з опорою,
- діаметр, наприклад, 11 дюймів.

Що стосується маніпулятора, бажано, щоб він мав більшу кількість ланок, що дозволить йому пересуватися більш вільно і контролювано та остання ланка повинна бути у вигляді ємності типу корзини, що складається та становиться плоскою. Корзина повинна бути зроблена у вигляді клітки з метою полегшення конструкції підйомника та зменшення парусності. У робочому стані кількість ступенів рухів повинна бути такою, щоб надавати тільки необхідні переміщення у просторі, всі інші - фіксовані. Сам маніпулятор варто виконувати з матеріалу, що відповідає вимогам, наведеним вище, маніпулятор не може бути легким у відмінності від корзини, яка буде зроблена, наприклад, з титану, так як титан є легким та надійним.

### Висновки

Вище були розглянуті недоліки обраної конструкції, запропоновані та обґрунтовані складові для нової конструкції колісного підйомника, а саме кожної окремої її деталі, що повинна забезпечувати експлуатацію на опорах вуличного освітлення з опорами різного поперечного перерізу, розглянуті більш детально та обрані гальма для підйомника, що є, мабуть, головним після надійності самої конструкції для безпеки робітників, які будуть користуватися цим підйомником.

### Список використаних джерел

1. 3 Pole Climbing Lego Robots [Electronic resource]. – Access mode: [https://www.youtube.com/watch?v=mzmb00qj9ko&ab\\_channel=brickexperimentchannel](https://www.youtube.com/watch?v=mzmb00qj9ko&ab_channel=brickexperimentchannel)
2. Самокат Scale Sports SS-04 Белый двухколесный складной дисковый тормоз колеса 200 мм [Електронний ресурс]. – режим доступу: <https://prom.ua/p1382426815-samokat-scale-sports.html>
3. Electric Scooter Brake Guide [Electronic resource]. – Access mode: <https://rider-guide.com/guides/electric-scooter-brakes/>
4. 6 Bolt or Centrelock Brakes [Electronic resource]. – Access mode: [https://ican-cycling.com/cdn/shop/articles/6\\_bolt\\_or\\_centrelock\\_brakes.jpg?v=162951599](https://ican-cycling.com/cdn/shop/articles/6_bolt_or_centrelock_brakes.jpg?v=162951599)
5. Ротори (гальмівні диски) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ve-logo.com.ua/rotor>

### References

1. Brick Experiment Channel. (2021). 3 Pole Climbing Lego Robots. [https://www.youtube.com/watch?v=Mzmb00QJ9ko&ab\\_channel=BrickExperimentChannel](https://www.youtube.com/watch?v=Mzmb00QJ9ko&ab_channel=BrickExperimentChannel)
2. Scooter Scale Sports SS-04 White two-wheel folding disc brake wheels 200 mm. (n.d.). <https://prom.ua/p1382426815-samokat-scale-sports.html>
3. 6 Bolt or Centrelock Brakes. (n.d.). [https://icancycling.com/cdn/shop/articles/6\\_Bolt\\_or\\_Centrelock\\_Brakes.jpg?v=162951599](https://icancycling.com/cdn/shop/articles/6_Bolt_or_Centrelock_Brakes.jpg?v=162951599)
4. Rotors (brake discs). (n.d.). <https://velogo.com.ua/rotor>
5. Electric Scooter Brake Guide. (n.d.). <https://riderguide.com/guides/electric-scooter-brakes/>

Отримано 10.07.2023

UDC 621.876.11

### *Anastasia Bieliaieva*

PhD in Technical Sciences of the Department of "Machine Design" National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

e-mail: [an\\_beli1212@ukr.net](mailto:an_beli1212@ukr.net) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1696-8687>

## JUSTIFICATION OF CONSTRUCTIVE AND OPERATIONAL REQUIREMENTS FOR AN ELEVATOR FOR MAINTENANCE OF STREET LIGHTING SUPPORTS

**Abstract.** The article is an overview, and the presented information is of an overview nature and is dedicated to the justification of the choice of component parts of the selected structure of mechanized lifts for servicing street lighting poles. The purpose is to consider the shortcomings of the chosen analogue and to justify the components of the chosen design of the wheel lift, namely each individual part of it, which should ensure operation on street lighting poles with poles of different cross-sections. The main structural and operational requirements for the component parts of the selected lift structure were determined, namely: the lift components must be reliable, quickly reconfigurable in the field and without the use of special tools; the fastening of the wheels to the frame must be reliable and durable enough to withstand a heavy load; wheels must withstand large tangential loads, have good grip on the surface supports; brakes must meet certain requirements; the manipulator must be so reliable that it is possible to lift not only tools and equipment, but also a person, be compact and have enough controlled degrees of movement to easily fold down to the smallest possible dimensions; weight and size characteristics should allow its transportation in cargo or cargo-passenger vehicles of category "B" and above, as well as on trailers (semi-trailers) to them. Deficiencies of the existing design are identified and changes to the design details are proposed. Special attention is paid to brakes. Among the existing brakes are: disc brakes, drum brakes, foot brakes, regenerative brakes and electronic brakes. Disk ones were chosen. Types of brakes are arranged in order of efficiency types of electric scooter brakes. Therefore, taking into account the advantages and disadvantages of each type of brake, disc brakes were chosen. The wheels themselves must be selected according to the following parameters: they must withstand a large tangential load, tires and the pressure in them must be selected so that there is good engagement with the support, a diameter of 11 inches.

**Key words:** support; street lighting; analysis, construction; hoist.

**Наталя Імбірович<sup>1</sup>, Олександр Повстяной<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Кандидат технічних наук, доцент, кафедра матеріалознавства  
Луцький національний технічний університет (Луцьк, Україна)

E-mail: imbirovychnatalia@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8276-6349>

<sup>2</sup> Доктор технічних наук, професор, кафедра прикладної механіки та мехатроніки  
Луцький національний технічний університет (Луцьк, Україна)

E-mail: povstjanoj@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1416-225X>

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ ТРИВКОСТІ ПОРИСТИХ ПРОНИКНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗІ ЗАХИСНИМИ ПОКРИТТЯМИ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Відомо, що пористі проникливі матеріали під час фільтрування та очищення агресивних середовищ піддаються корозії, що призводить до виходу їх з ладу. Саме тому актуальним завданням є підвищення їх корозійну стійкість. Дана стаття присвячена дослідженню корозійної стійкості пористих проникних матеріалів з нанесеними на їх поверхню комбінованими захисними покриттями в розчинах кухонної солі та соляної кислоти. За допомогою поляризаційних кривих, знятих в потенціодинамічному режимі було встановлено, що потенціали корозії в розчині кухонної солі посуваються в позитивну сторону за умови нанесення на поверхню пористих проникних матеріалів комбінованого покриття, що свідчить про зниження корозійної активності поверхні. Струми корозії комбінованого захисного покриття для всіх досліджуваних систем понижуються на 3 порядки, а підвищення співвідношення густини струмів катодного до анодного знижує швидкість корозії покритву ще в п'ять разів.

**Ключові слова:** корозія, комбіноване покриття, пористі проникні матеріали, струм корозії, потенціал корозії, корозійне середовище.

Рис.:7. Бібл.: 19.

**Актуальність теми дослідження.** Сучасний етап розвитку матеріалознавства супроводжується появою нових ідей створення та вдосконалення технології отримання пористих проникливих матеріалів (ППМ), які, перш за все, направлені на досягнення високих експлуатаційних характеристик та зниження їх собівартості.

Пористі проникливі матеріали під час експлуатації для очищення агресивних середовищ піддаються корозії. З метою вирішення цієї проблеми актуальним є нанесення комбінованого захисного покриття, що значно підвищить корозійну стійкість ППМ в умовах фільтрування та очищення агресивних середовищ [1, 2].

**Постановка проблеми.** Корозія ППМ завдає значної шкоди при застосуванні їх для очищення агресивних середовищ. Ця шкода визначається не стільки вартістю ППМ, а скільки витратами на захист від корозії, вартістю ремонтних робіт, а також збитками за рахунок тимчасового припинення нормального функціонування фільтрувального обладнання. Актуальність питань захисту від корозії ППМ із року в рік не зменшується, а навпаки, зростає.

З метою забезпечення своєчасного та надійного захисту ППМ від корозії необхідно більше уваги приділяти проведенню досліджень з оцінки небезпеки корозії і захисту від неї ППМ та підвищувати якість і надійність захисних покриттів, що наносяться на них.

На даний час розглядаються питання, пов'язані з процесом взаємодії поверхонь, що контактують у процесі їхнього взаємного переміщення. Створення і підбір триботехнічних матеріалів базуються на вирішенні взаємопов'язаних задач на основі вивчення механіки тертя і фізико-хімічних явищ, що відбуваються на поверхні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Контакт взаємодії твердих тіл спостерігається лише в окремих зонах, розміри і густина розміщення яких залежать від величини прикладеного навантаження, а також від напруженодеформованого стану контактів. Ці контакти залежать від геометричної форми мікронерівностей і механічних властивостей поверхневого шару.

Для нанесення корозійностійкого захисного електрометалізаційного покриття на деталях конструкційного призначення широко використовують метод вакуумно-дугового напилення та плазмоелектролітного оксидування (ПЕО), який є одним із найбільш сучасних і перспективних методів отримання на поверхні металів і сплавів захисних шарів, що мають комплекс важливих характеристик. Властивості отриманих покриттів визначаються складом електроліту і режимами процесу ПЕО.

Плазмове електролітне оксидування (ПЕО) [3, 4], відоме як ANOF (Anodishen Oxidation unter Funkenentladung) у Німеччині [5, 6, 7], ASD (Anodic Spark Deposition) у США, Європі і Китаї [8, 9], МДО (мікродугового оксидування) в Україні, і PEO (Plasma Electrolytic Oxidation) у Великобританії, Швейцарії [10, 11], розвивається в останні двадцять років як нова інтенсивна технологія анодної обробці металів. Процес здійснюється в умовах поверхневих іскрових розрядів у результаті електро-і плазмохімічних реакцій і застосовується як для очищення поверхні металевих, так і для нанесення різних покриттів, властивості яких визначаються складом електроліту і режимом електролізу. Будучи по суті технологією, подібної традиційного анодування, ПЕО не вимагає ні застосування глибокого охолодження, ні використання з'єднань VI-валентного хрому, що робить цей метод екологічно дуже привабливим [12]. Метод нанесення покриттів ПЕО застосовують у машинобудуванні, літакобудуванні, медицині, обробці хірургічного інструменту, а також для спеціальних скоб та штифтів для лікування різноманітних переломів; можливе також декоративне застосування, адже змінюючи умови обробки можна змінювати кольори деталі.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Комбінація покриттів дає можливість підвищити твердість, зносо-, корозійну стійкість, пластичність, відпірність контактним, динамічним навантаженням та вібрації. Таким чином, завдяки хімічному і фазовому складу та структурі кераміки, оксидні покриття отримані на вентилях металлах методом плазмоелектролітного оксидування володіють високими функціональними властивостями. Багатофункціональність оксидокерамічних покриттів сприяє їх широкому застосуванню у багатьох галузях промисловості, причому асортимент оброблюваних деталей постійно збільшується. Проте, можливості методу досліджені ще не повністю. Продовжуються роботи з удосконалення самого процесу синтезу оксидокераміки, розробляються нові електроліти, створюються нові джерела живлення. Однак, суттєвим недоліком процесу ПЕО є обмеження металів, на які можуть бути нанесені покриття.

Розширення сфери застосування методу плазмоелектролітного оксидування для інших металів і сплавів можливе через застосування комплексної технології газотермічного напилення дротів чи порошків на основі алюмінію з наступним плазмоелектролітним оксидуванням. Крім того, застосування такої комплексної технології дозволяє відновлювати спрацьовані деталі і продовжити ресурс обладнання.

Тому **метою** є комплексне металографічне дослідження корозійної тривкості пористих проникних матеріалів, які виготовлені з порошку сталі ШХ15 + графіт з подальшим нанесення захисного покриття нового покоління.

**Виклад основного матеріалу.** У даному науковій роботі досліджувалися зразки, які виготовлені з порошку ШХ15 + графіт. Порошок перемішувався у змішувачі протягом чотирьох годин, після чого сталевий порошок пресували у прес-формі протягом однієї хвилини (Рис. 1).



Рис. 1. Спресовані зразки складу ШХ 15 + графіт

Потім заготовки поміщали в індукційну піч і спікали при температурі 1200°C. Поверхневий захист зразків від корозії проводився у два етапи: спочатку наносили електрометалізаційне покриття, потім проводили синтез методом ПЕО.

Електрометалізаційне покриття напилювали вакуумно-дугового способом. Суть такого методу нанесення покриття полягає в тому, що розплавлений електричною дугою рідкий метал струменем стисненого газу (найчастіше повітря) розпилюється на дрібні частинки, які з великою швидкістю в розплавленому або пластичному стані падають на підготовану поверхню, деформуються під час удару, приварюються або прилипають до поверхні, формуючи покриття [13].

Напилюють покриття за допомогою електрометалізаторів, в яких відбуваються: подача електродних дротів до місця горіння електричної дуги між їх торцями, плавлення матеріалу електричною дугою, диспергування металевого розплаву в сопловій частині металізатора та видування на напилювану поверхню дрібних краплин розплавленого металу (Рис. 2).

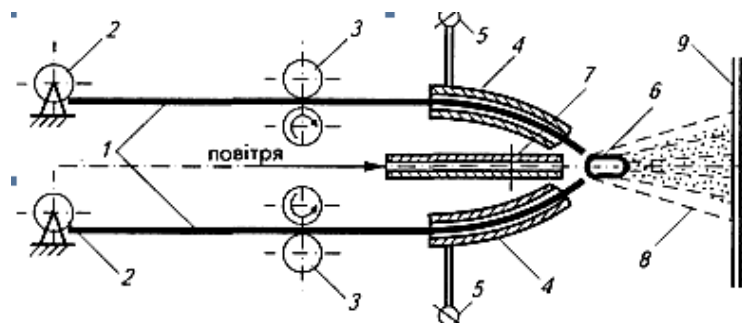


Рис. 2. Схема електрометалізатора:

1 – електродні дроти; 2 – касети; 3 – механізм подачі дроту; 4 – контактні наконечники; 5 – силові кабелі; 6 – електрична дуга; 7 – повітряне сопло; 8 – металоповітряна суміш; 9 – поверхня, на яку наносять покриття

Направлений до поверхні такий потік здатний формувати на ній покриття, що складається із zdeформованих після удару об поверхню краплин металевого розплаву з включеннями оксидів [14].

При електрометалізаційному напиленні електродні дроти нагріваються і розплавляються за рахунок енергії анодної та катодної плям, які роташовані на їх торцях. В дузі виділяють три області проходження струму: стовп дуги, анодну та катодну плями. Розміри останніх малі і керувати ними важко, в той час як довжина стовпа дуги може бути значною і нею легко керувати, змінюючи напругу. Стабільне розпилення відповідає режиму горіння дуги без коротких замикань, коли між середньою швидкістю



переміщення фронту плавлення і швидкістю подачі електродів встановлюється динамічна рівновага. За такого режиму газовий потік видаляє з електродів та розпилює порції рідкого металу ще до їх зіткнення і короткого замикання. Далі розплавлений метал знову нагромаджується на торцях електродів і цикл повторюється.

Процес ПЕО проходить в електролітичній плазмі іскрового (мікродугового) розряду в електроліті на основі дистильованої води. Кисень, що утворюється внаслідок дисоціації води, частково вступає в реакцію з металом і на його поверхні утворює оксид. Процес формування покриття проходить в електричному полі, яке є джерелом енергії для плазмохімічних реакцій на робочому електроді.

Стимулювати цей процес можуть також електрони, що виділяються внаслідок електрохімічних реакцій на аноді. У пробійному каналі сильно зростає температура, проходить дисоціація та іонізація електроліту і формується плазмовий згусток, в якому реалізуються плазмохімічні реакції синтезу оксиду.

Метод ПЕО дозволяє створювати на деталях і елементах конструкцій зносо- і корозійностійкі оксидокерамічні діелектричні покриття товщиною до 200 мкм і твердістю до 20 ГПа.

Після запропонованої поверхневої обробки отримали зразок, загальний вигляд якого представлено на рис. 3.



Рис. 3. Зразок ППМ з комбінованим покриттям

Корозійні властивості сплавів та їх покриттів вивчали за поляризаційними кривими, знятими в потенціодинамічному режимі на потенціостатах ПИ-50 та IPC-PRO+ПК IBM PC за стандартною трьохелектродною схемою з хлорсрібним електродом порівняння і допоміжним платиновим (Рис. 4.). На електроді виділяли робочу ділянку, площа якої становила  $S=1 \times 10^{-4} \text{ м}^2$ , решта поверхні ізолювали епоксидним лаком.



Рис. 4. Загальний вид обладнання IPC-PRO

Будуючи поляризаційні криві, поверхню сплавів до  $-2$  В катодно активували. Після катодної поляризації відразу ж проводили неперервну потенціодинамічну поляризацію зі швидкістю зміни потенціалу  $5$  мВ/с. Корозійними середовищами були  $10\%$  NaCl та  $10\%$  HCl. Для характеристики корозійної стійкості визначали струми та потенціали корозії. Реєстрацію поляризаційних кривих проводили після встановлення стаціонарного потенціалу. Струми та потенціали корозії визначали графічним методом. Крім того, зразки обстежували за допомогою мікроскопа МІМ-10 з комп'ютерною фіксацією поверхні.

Під час експлуатації анодованих сплавів у корозійному середовищі на окремих ділянках покриття у ППМ формуються вузькі канали з підвищеною іонною провідністю. Такі ділянки стають осередками локальних корозійних пошкоджень ППМ [15]. Активні аніони (наприклад, хлору і води) в цих місцях проникають через анодну плівку і взаємодіють із сплавом.

Плазмоелектролітичні покриття є інертні. Однак за наявності в них пор, що є каналами іскрових розрядів, також можливе корозійне руйнування металу чи сплаву. Все це знижує функціональні властивості покриття та скорочує термін експлуатації сплаву. У зв'язку з цим досліджено корозійну тривкість плазмове-електрохімічних ОКП на цирконієвому та титанових сплавах у різних корозійно-агресивних середовищах і визначено їх струми корозії, за якими судили про швидкість корозії у ППМ.

Відомо, що висока корозійна тривкість досягається утворенням тонкої захисної плівки оксидів. Однак, у тяжких умовах експлуатації та за наявності особливо агресивних середовищ (у їх числі і використані в роботі) ці плівки, внаслідок малої товщини та невисокої твердості, не забезпечують високих антикорозійних властивостей.

Струми корозії покриттів  $I_{cor}$ , за якими судили про швидкість корозії матеріалу, понижуються для всіх досліджуваних систем, а вищий ефект від створення ОКП проявляється в більш агресивних середовищах.

Аналіз одержаних поляризаційних кривих показує, що формування ОКП відбивається на електрохімічних параметрах корозії ППМ, тобто значення струмів корозії зменшуються. Ця зміна пояснюється меншим розчиненням компонентів сплаву.

Потенціал корозії корозійно нетривкого ППМ за дії розчину  $10\%$  HCl має від'ємне значення  $-370$  мВ, а струм корозії –  $80$  мА/м<sup>2</sup>.

Під час формування на ППМ ОКП струм корозії зменшується на  $1...2$  порядки залежно від складу електроліту, в якому синтезували покриття. Так покриття, синтезовані в менш концентрованому електроліті, який містить луг та рідке скло має найменшу корозійну тривкість з тих, які синтезували в більш концентрованих електролітах і має значення  $1,2 \cdot 10^{-3}$  А/м<sup>2</sup>. З подальшим збільшенням концентрації електроліту струми корозії  $i_{cor}$  ОКП понижуються (Рис. 5.).

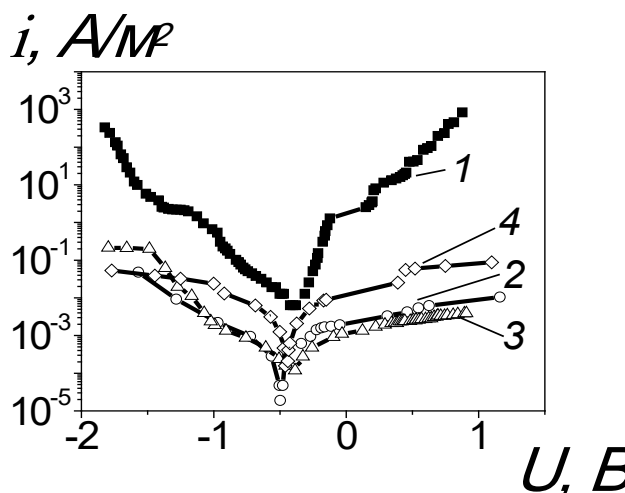


Рис. 5. Поляризаційні криві ППМ (1) та його ОКП (2, 3) в розчині  $10\%$  HCl (див. табл.1)

Таблиця 1. Потенціал та струм корозії ППМ та покриву на ньому за різних режимів окисдування

	Корозійне середовище	Склад електроліту, г/л				$I_a/I_c$ А/дм <sup>2</sup>	$\tau$ , хв	$U_{cor}$ , В	$i_{cor}$ , А/м <sup>2</sup>
		КОН	р.с.	CrO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>				
1	10%NaCl	-	-	-	-	-	-	0,48	0,82
2		10	15	-	-	20/20	20	0,41	$9,09 \cdot 10^{-4}$
3		10	15	-	-	20/30	40	0,24	$1,63 \cdot 10^{-4}$
4		10	15	0,1	-	20/30	40	0,26	$6,20 \cdot 10^{-4}$
1	10%HCl	-	-	-	-	-	-	0,37	$8,07 \cdot 10^{-2}$
2		10	15	-	10	20/20	30	0,41	$0,21 \cdot 10^{-4}$
3		10	15	-	-	20/20	30	0,50	$1,39 \cdot 10^{-4}$
4		3	2	-	-	20/20	20	0,45	$12,07 \cdot 10^{-4}$

Покриття, яке отримане в електроліті складу 10 г/л КОН + 15 г/л р.с., має значення струму корозії  $1,39 \cdot 10^{-4}$  А/м<sup>2</sup>, а при введенні в електроліт 10 г/л H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> понижує  $i_{cor}$  до значення  $1,21 \cdot 10^{-4}$  А/м<sup>2</sup>.

Такий результат, очевидно, пов'язаний із поєднанням високої твердості та товщини покриву на ППМ [16-18].

У більш агресивному середовищі кухонної солі значення струму та потенціалу корозії незахищеного ППМ рівне відповідно 0,82 А/м<sup>2</sup> та -0,48 В. Так як покриття, отриманий в електроліті малої концентрації, у менш агресивному середовищі соляної кислоти погано себе проявив, то в подальших експериментах було недоцільно досліджувати такий покриття.

За аналізом даних встановлено, що струми корозії ОКП для всіх досліджуваних систем понижуються на 3 порядки. Покриття, синтезований в електроліті 10 г/л КОН + 15 г/л р.с. має значення струму корозії  $9,09 \cdot 10^{-4}$  А/м<sup>2</sup>. Однак підвищення співвідношення густини струмів катодного до анодного понизило швидкість корозії покриву ще в п'ять разів.

Додавання до такого електроліту 0,1 г/л CrO<sub>3</sub> значення струму корозії ненабагато підвищило (Рис. 6., крива 4).

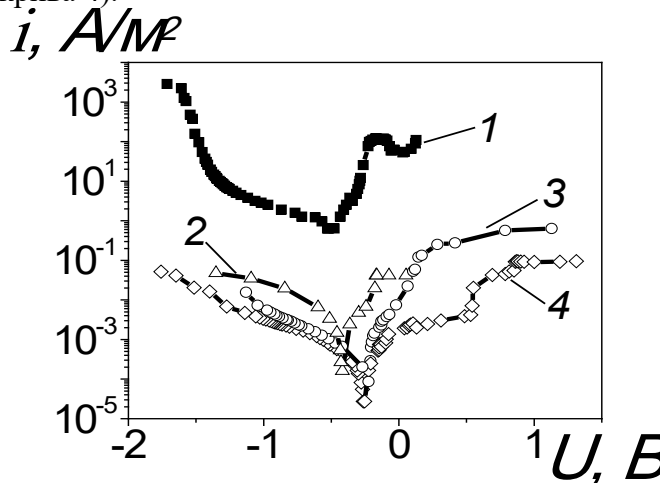
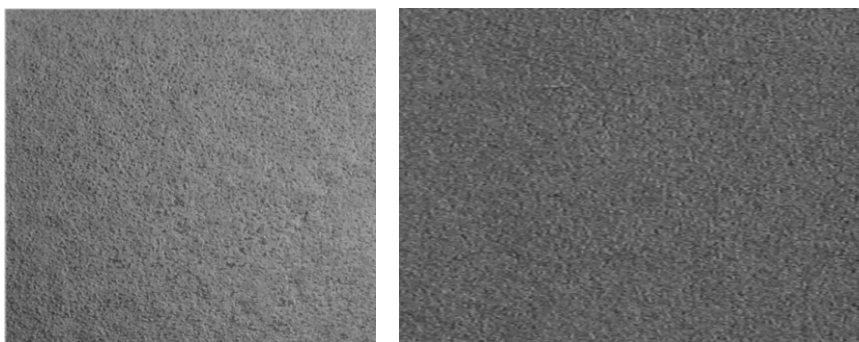


Рис. 6. Поляризаційні криві ППМ (1) та його оксидокерамічного покриву (2, 3, 4) в розчині 10%NaCl (див табл. 1)

Потенціали корозії в розчині кухонної солі посуваються в позитивну сторону за синтезу всіх ОКП, що теж свідчить про зниження корозійної активності поверхні.

На рис. 7 зображено покрив ППМ після корозії в агресивних середовищах за анодної поляризації. ППМ в агресивних середовищах зазнає корозію. Однак, покрив, навіть з оцінки зовнішнього вигляду, не кородує. На даному рисунку представлено фотографію ОКП після корозії в високо агресивному середовищі 10% NaCl. В розчині соляної кислоти загальний вигляд покриття не змінюється, а більш детально дослідити його властивості можна за допомогою поляризаційних кривих.



*Рис. 7. Загальний вигляд оксидокерамічного покриття на ППМ після корозії в середовищах:  
а – 10%NaCl; б – 10%HCl.*

Отже, кращу корозійну тривкість мають покриття, синтезовані в електролітах більшої концентрації [19]. Ведення в електроліт перекису водню підвищує опір корозії, а оксиду хрому набагато його знижує. Найбільшої корозійної тривкості можна досягти, синтезувавши покрив в електроліті 10 г/л КОН + 15 г/л рідкого скла за більших густин струмів.

**Висновки.** За аналізом даних встановлено, що струми корозії ОКП для всіх досліджуваних систем знижуються на 3 порядки. Покриття, синтезоване в електроліті 10 г/л КОН + 15 г/л р.с. має значення струму корозії  $9,09 \cdot 10^{-4}$  А/м<sup>2</sup>. Однак, підвищення співвідношення густини струмів катодного до анодного понизило швидкість корозії покриття ще в п'ять разів.

Додавання до такого електроліту 0,1 г/л CrO<sub>3</sub> значення струму корозії ненабагато підвищує. Потенціали корозії в розчині кухонної солі посуваються в позитивну сторону за синтезу всіх ОКП, що теж свідчить про зниження корозійної активності поверхні.

Отже, кращу корозійну тривкість мають покриття для ППМ, які синтезовані в електролітах більшої концентрації, тобто антикорозійний ефект покриттів збільшується з ростом агресивності корозійного середовища. Ведення в електроліт перекису водню підвищує опір корозії, а оксиду хрому набагато його знижує.

Експериментально встановлено, що зменшення концентрації електроліту від 10 г/л КОН та 15 г/л р.с. та 10 г/л H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> до 10 г/л луку та 15 г/л рідкого скла знижує струм корозії покриття в 5 разів.

Виявлено, що за вищих співвідношень струмів анодного до катодного струми корозії покриттів знижуються в 6 разів, а найбільшої корозійної тривкості можна досягти, синтезувавши покрив в електроліті 10 г/л КОН + 15 г/л рідкого скла за більших густин струмів.

**Список використаних джерел**

1. Студент, М. М. Корозійна стійкість плазмово-електролітичних шарів на сплавах і покриттях системи Al–Cu–Mg для різних режимів термічної обробки / М. М. Студент, В. М. Посувайло, Х. Г. Веселівська // *Матеріалознавство*. – 2018. – №53. – С. 789-795.
2. Шацький, І. П. Оптимізація міцності двошарового покриття для конкретних умов локального навантаження / І. П. Шацький, Л. Ю. Ропяк, М. В. Маковійчук // *Сила матеріалознавства*. – 2016. – № 48. – С. 726-730.
3. Plasma electrolytic oxidation (PEO) for production of anodised coatings on lightweight metal (Al, Mg, Ti) alloys / F. C. Walsh, C. T. J. Low, R. J. K. Wood, K. T. Stevens, J. Archer, A. R. Poeton & A. Ry-der // *Transactions of the IMF*. – 2009. – Vol.87, №3. – P. 122-135.
4. Electrodeposition of diamond-like carbon films on titanium alloy using organic liquids: Corrosion and wear resistance / T. Falcade, T. E. Shmitzhaus, O. G. Reis, A. L. Marin Vargas, R. Hübler, I. L. Mülle, C.-I. F. Malfatti // *Applied Surface Scienc.* – 2012. - Vol.263. – P. 18-24.
5. Области застосування шарів ANOF і композитів / П. Курц, В. Крісман, Н. Шнейдер // *Дослідження та технології кристалів*. – 1986. – №12. – С. 1603-1609.
6. Properties of oxide ceramic coatings on magnesium and titanium alloys which are synthesized in electrolyte plasma / Imbirovich N., Klavkov M.D., Posuvayilo V.M., Povstyanoy O. Yu. // *Powder Metall.* – 2015. – Vol.1, № 2. – P. 54-60.
7. Kaluđerović, M. R. Titanium dental implant surfaces obtained by anodic spark deposition – From the past to the future / M. R. Kaluđerović, J. P. Schreckenbach, H.-L. Graf // *Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 16. – P. 1429-1441.
8. Anodic Spark Deposition treatments to increase reliability of Ti6Al4V modular prostheses / B. D. Curto1, M. V. Diamanti1, P. D. Pria, F. Sbaiz, A. Cigada // *Applied Biomaterials & Biomechanics*. – 2009. – Vol. 7. – P. 153-159.
9. Spark channel propagation in a mi-crobubble liquid / V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin et al. // *Plasma Physics*. – 2016. – Vol. 42. – P.1074-1077.
10. Plasma Electrolytic Ox-igation (PEO) Process—Processing, Properties, and Applications / S. Sikdar, P. V. Menezes, R. Maccione, T. Jacob, P. L. Menezes // *Nanomaterials*. – 2021. – Vol. 11. – № 6. – P. 1375-1400.
11. Mohedano, M. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Coatings / M. Mohedano, B. Mingo // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11. – P. 111-120.
12. Gibbs en-ergy calculation of electrolytic plasma channel with inclusions of copper and copper oxide with Al-base / V. M. Posuvailo, M. D. Klavkiv, M. M. Student, Y. Y. Sirak, H. V. Pokhmurska // *Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 181. – P. 1-10.
13. Студент, М. М. Багатофункціональні електродугові покриття / М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. М. Гвоздецький – Львів : Простір-М, 2018. – 389 с.
14. Мікроструктура та абразивно-зносостійкість вібраційно-наплавленого металу сердечників базової системи Fe–Cr–B / А. А. Войтович, Г. В. Похмурська, М. М. Студент та ін. // *Mater Sci.* – 2016. – Vol. 52. – P. 365-370.
15. Rud V. D. Technologies, structure, properties of porous permeable materials / V. D. Rud, O. Yu. Povstianoi, O. V. Zabolotnyi, L. S. Bohinskyi. – Lutsk : Lutsk NTU, 2015. – 325 p.
16. Modeling of Processes for Creation New Porous Permeable Materials with Adjustable Properties / O. Povstyanoy, O. Zabolotnyi, V. Rud, A. Kuzmov, H. Herasymchuk // [Advances in Design, Simulation and Manufacturing](#). – 2019. Vol. II. – P. 456-465.
17. Metallographic analysis and processing of images of microstructure of nozzles for sandblasting which are made by powder metallurgy / O. Povstyanoy, V. Sychuk, A. Makmyllan, V. Rud, O. Zabolotnyy // *Powder metallurgy*. – 2015. – Vol. 3, № 4. – P. 234-240.
18. Assessment of the quality of alternative fuels for gasoline engines / V. Tkachuk, O. Rechun, N. Merezhko, T. Bozhydnarik, T. Karavaiev // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing*. – 2019. – Vol. II. – P. 871-881.
19. Optimization of the Properties of Multilayer Porous Permeable Materials / O. Povstyanoy, V. D. Rud, N. Y. Imbirovych, T. N. [Halchuk](#), T. I. [Chetverzhuk](#), M. V. [Smal](#), A.V. [Dziubynskiy](#) // *Mater Sci.* – 2021. – Vol. 56. – № 4. – P. 530-535.

## References

1. Student, M.M., Posuvailo, V.M., Veselivska, Kh.H. (2018). Corrosion resistance of plasma-electrolytic layers on alloys and coatings of the Al–Cu–Mg system for different modes of heat treatment. *Materials Science*, 53, 789–795. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0137>
2. Shatskyi, I.P., Ropiak, L.Iu., Makoviichuk, M.V. (2016). Optimizing the strength of a two-layer coating for specific conditions of local load. *Power of Materials Science*, 48, 726–730. <https://doi.org/10.1007/s11223-016-9817-5>
3. F. C. Walsh, C. T. J. Low, R. J. K. Wood, K. T. Stevens, J. Archer, A. R. Poeton & A. Ryder (2009) Plasma electrolytic oxidation (PEO) for production of anodised coatings on lightweight metal (Al, Mg, Ti) alloys. *Transactions of the IMF*, 87(3), 122-135, DOI: 10.1179/174591908X372482
4. Falcade, T., Shmitzhaus, T.E., Reis, O.G., Vargas, A.L.M., Hübler, R., Mülle, I. L., Malfatti, C.F. (2012). Electrodeposition of diamond-like carbon films on titanium alloy using organic liquids: Corrosion and wear resistance. *Applied Surface Scienc*, 263, 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2012.08.052>
5. Kurz, P., Krysmann, W., Schneider, H.G. (1986). Application Fields of ANOF Layers and Composites. *Crystal Research and Technology*, 12(12), 1603–1609. doi: 10.1002/crat.2170211224
6. Imbirovich, N., Klappkov, M.D., Posuvayilo, V.M., Povstyanoy, O.Yu. (2015). Properties of oxide ceramic coatings on magnesium and titanium alloys which are synthesized in electrolyte plasma. *Powder Metall*, 1(2), 54-60. doi: [10.1007/s11106-015-9678-7](https://doi.org/10.1007/s11106-015-9678-7)
7. Kaluderović, M.R., Schreckenbach, J.P., Graf, H.-L. (2016). Titanium dental implant surfaces obtained by anodic spark deposition – From the past to the future. *Materials Science and Engineering*, 16, 1429-1441. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.07.068>
8. Curto, B.D., Diamanti, M.V., Pria, P.D., Sbaiz, F., Cigada, A. (2009). Anodic Spark Deposition treatments to increase reliability of Ti6Al4V modular prostheses. *Applied Biomaterials & Biomechanics*, 7, 153-159. DOI: 10.1007/S11999-016-4973-2
9. Panov, V.A., Vasilyak, L.M., Vetchinin, S.P. et al. (2016). Spark channel propagation in a microbubble liquid. *Plasma Physics*, 42, 1074–1077. DOI: 10.1134/S1063780X16110064
10. Sikdar, S., Menezes, P.V., Maccione, R., Jacob, T., Menezes, P.L. (2021). Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process—Processing, Properties, and Applications. *Nanomaterials*, 11(6), 1375-1400. DOI: 10.3390/nano11061375
11. Mohedano, M., Mingo, B. (2021). Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Coatings. *Coatings*, 11, 111-120. DOI: 10.3390/coatings11010111
12. Posuvailo, V.M., Klappkiv, M.D., Student, M.M., Sirak, Y.Y., Pokhmurska, H.V. (2017). Gibbs energy calculation of electrolytic plasma channel with inclusions of copper and copper oxide with Al-base. *Materials Science and Engineering*, 181, 1-10. doi: 10.1088/1757-899X/181/1/012045
13. Student, M.M., Pokhmurska, H.V., Hvozdetzkyi, V.M. (2018). *Bahatofunktsionalni elektroduhovi pokryttia*. Lviv: Prostir-M.
14. Voitovych, A.A., Pokhmurska, H.V., Student, M.M., et al. (2016). Microstructure and abrasion-wear resistance of the vibration-deposited metal of cores of the Fe–Cr–B basic system. *Materials Science*, 52, 365–370. doi: [10.1007/s11003-016-9965-6](https://doi.org/10.1007/s11003-016-9965-6)
15. Rud, V.D., Povstianoi, O.Yu., Zabolotnyi, O.V., Bohinskyi, L.S. (2016). *Technologies, structure, properties of porous permeable materials*. Lutsk: NTU.
16. Povstyanoy, O., Zabolotnyi, O., Rud, V., Kuzmov, A., Herasymchuk, H. (2019). Modeling of Processes for Creation New Porous Permeable Materials with Adjustable Properties. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing, II*, 456–465. doi: 10.1007/978-3-030-22365-6\_46.
17. Povstyanoy, O., Sychuk, V., Makmyllan, A., Rud, V., Zabolotnyy, O. (2015). Metallographic analysis and processing of images of microstructure of nozzles for sandblasting which are made by powder metallurgy. *Powder metallurgy*, 3(4), 234-240. doi: [10.1007/s11106-015-9705-8](https://doi.org/10.1007/s11106-015-9705-8)
18. Tkachuk V., Rechun O., Merezhko N., Bozhydarnik T., Karavaiev T. (2019). Assessment of the quality of alternative fuels for gasoline engines *Advances in Design, Simulation and Manufacturing, II*, 871-881. doi: [10.1007/978-3-030-22365-6\\_87](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_87)
19. Povstyanoy, O., Rud, V.D., Imbirovych, N.Y., [Halchuk](#), T.N., [Chetverzhuk](#), T.I., [Smal](#) M.V., [Dziubynskyi](#) A.V. (2021). Optimization of the Properties of Multilayer Porous Permeable Materials. *Mater Sci*, 56(4), 530-535 (2021). doi: [10.1007/s11003-021-00460-2](https://doi.org/10.1007/s11003-021-00460-2)

Отримано 21.07.2023

UDK 620.197.2:677.631.2

**Nataliya Imbirovych<sup>1</sup>, Oleksandr Povstianoi<sup>2</sup>**<sup>1</sup>PhD, associate professor, Department of Materials Science  
Lutsk National Technical University (Lutsk, Ukraine)**E-mail:** imbirovychnatalia@gmail.com **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8276-6349><sup>2</sup>DSn, professor, Department of applied mechanics and mechatronics  
Lutsk National Technical University (Lutsk, Ukraine)**E-mail:** povstjanoj@ukr.net **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1416-225X>

## INVESTIGATION OF CORROSION RESISTANCE OF POROUS PERMEABLE MATERIALS WITH PROTECTIVE COATINGS OF THE NEW GENERATION

Porous permeable materials (PPM) are subject to corrosion during operation for cleaning aggressive environments. In order to solve this problem, it is urgent to apply a combined protective coating, which will significantly increase the corrosion resistance of PPM in the conditions of filtering and cleaning aggressive environments.

In order to ensure timely and reliable protection of PPM from corrosion, it is necessary to pay more attention to conducting studies on the assessment of the danger of corrosion and protection from it of PPM and to increase the quality and reliability of the protective coatings applied to them.

Plasma electrolytic oxidation (PEO), known as ANOF (Anodishen Oxidation unter Funkenentladung) in Germany, ASD (Anodic Spark Deposition) in the USA, Europe and China, MDO (micro-arc oxidation) in Ukraine, and REO (Plasma Electrolytic Oxidation) in Great Britain. In Switzerland, it has been developing in the last twenty years as a new intensive technology of anodic treatment of metals. The process is carried out under the conditions of surface spark discharges as a result of electro- and plasma-chemical reactions and is used both for cleaning the metal surface and for applying various coatings, the properties of which are determined by the composition of the electrolyte and the mode of electrolysis.

In this scientific work, samples made from BBS15 + graphite powder were studied. Then the blanks were placed in an induction furnace and sintered at a temperature of 1200 °C. The surface protection of the samples against corrosion was carried out in two stages: first, an electro-metallization coating was applied, then the synthesis was carried out by the PEO method.

During formation on the PPM OKP, the corrosion current decreases by 1...2 orders of magnitude depending on the composition of the electrolyte in which the coating was synthesized. Thus, the coating synthesized in a low-concentration electrolyte containing alkali and liquid glass has the lowest corrosion resistance of those synthesized in more concentrated electrolytes.

Coatings for PPM, which are synthesized in electrolytes of higher concentration, have better corrosion resistance, that is, the anti-corrosion effect of the coatings increases with the growth of the aggressiveness of the corrosive environment. The introduction of hydrogen peroxide into the electrolyte increases corrosion resistance, and chromium oxide significantly lowers it.

With the help of polarization curves taken in the potentiodynamic mode, it was established that the corrosion potentials in the table salt solution shift in the positive direction if porous permeable materials of the combined coating are applied to the surface, which indicates a decrease in the corrosion activity of the surface. Corrosion currents of the combined protective coating for all studied systems are reduced by 3 orders of magnitude, and an increase in the ratio of cathodic to anodic current density reduces the corrosion rate of the coating by another five times.

**Key words:** corrosion, combined coating, porous permeable materials, corrosion current, corrosion potential, corrosive environment.

Fig.: 7. References: 19.

**Володимир Кравець<sup>1</sup>, Олександр Кравець<sup>2</sup>, Юрій Адаменко<sup>3</sup>, Сергій Лапковський<sup>4</sup>,  
Володимир Кореньков<sup>5</sup>, Володимир Фролов<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>інженер кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: [bond118@meta.ua](mailto:bond118@meta.ua) ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6867-4858> ResearcherID: ITU-8413-2023

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: [om.kravets@ukr.net](mailto:om.kravets@ukr.net) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7468-0956> ResearcherID: IUQ-7186-2023

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: [yuriy.adamenko@ukr.net](mailto:yuriy.adamenko@ukr.net) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4232-3206> ResearcherID: ACT-0127-2022

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: [Lapkovsky@ukr.net](mailto:Lapkovsky@ukr.net) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231> ResearcherID: HCH-3837-2022

<sup>5</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: [volodymyr.korenkov@gmail.com](mailto:volodymyr.korenkov@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1911-9496> ResearcherID: ADG-1590-2022

<sup>6</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: [v.k.frolov@gmail.com](mailto:v.k.frolov@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X> ResearcherID: ACH-0071-2022

## АНАЛІЗ РОЗМІРНИХ ЗВ’ЯЗКІВ РОБОТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ

*Застосування промислових роботів — безальтернативний шлях підвищення якості та продуктивності сучасного виробництва. Наразі серед усіх роботизованих технологічних операцій саме маніпулювання об’єктами виробництва є найпоширенішою роботизованою операцією. Стаття присвячена вирішенню питань розмірного аналізу роботизованих комплексів металооброблення, адже на даний час розмірний аналіз є дуже ефективним сучасним засобом забезпечення проведення як кількісного, так і якісного аналізів існуючих і синтезу нових технічних систем і технологічних процесів. Метою статті є вирішення задачі виявлення та розрахунку розмірних зв’язків при роботизованому встановленні заготовок або деталей у металорізальний верстат.*

**Ключові слова:** промисловий робот; верстат; роботизований комплекс; розмірні зв’язки; розмірний ланцюг.

Рис.: 10. Бібл.: 14.

**Актуальність теми дослідження.** На теперішній час неможливо уявити таку галузь промисловості, якої б не торкнулася промислова робототехніка. Результати багатоаспектного аналізу економічного розвитку промислово розвинених країн доводять, що використання промислових роботів – безальтернативний шлях істотного підвищення якості та продуктивності сучасного виробництва. За даними минулорічного звіту Міжнародної федерації робототехніки (International Federation of Robotics, IFR) [1] в останні роки серед усіх роботизованих технологічних операцій саме маніпулювання об’єктами виробництва є найпоширенішою роботизованою операцією (рис. 1). Операції маніпулювання застосовуються у більшості сфер роботизованого виробництва, особливо це стосується обслуговування промисловими роботами (ПР) основного технологічного обладнання, у тому числі, металорізальних верстатів (МРВ) та оброблювальних центрів (ОЦ) з ЧПК (CNC machine tools tending) (рис. 2), адже в процесі завантаження-розвантаження МРВ або ОЦ з ЧПК промисловою роботу необхідно здійснити у просторі цілу низку маніпуляційних операцій із заготовками або деталями (рис. 3). Таким чином, дослідження систем роботизованого завантаження-розвантаження МРВ або ОЦ центрів з ЧПК (Robotic CNC Machine Tending Load-Unload) завжди будуть вельми актуальними.





а



б

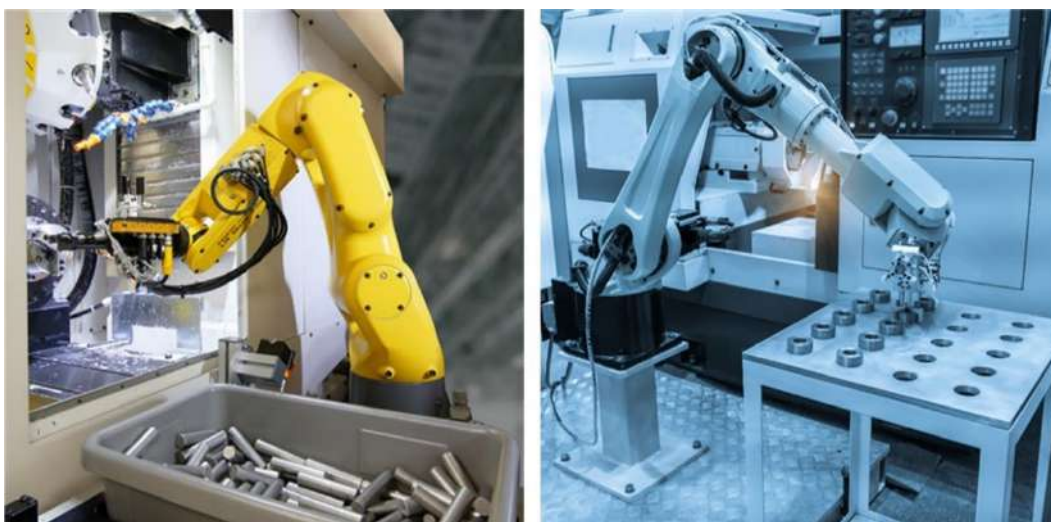


в

Рис. 1. Відсоткове співвідношення роботизованих операцій у виробництві:  
а – у 2019 році, б – у 2020 році, в – у 2021 році  
Джерело: розроблено авторами.



*Рис. 2. Обслуговування промисловими роботами металорізальних верстатів та оброблювальних центрів з ЧПК [2–5]*



*Рис. 3. Маніпуляції із заготовками при обслуговуванні промисловими роботами металорізальних верстатів та оброблювальних центрів з ЧПК [5; 6]*

**Постановка проблеми.** Установчі розмірні зв'язки завжди повинні розраховуватися при роботизованому встановленні заготовок або деталей на верстати, у пристрої, на супутники, в накопичувачі, у складські комірки тощо. Треба зазначити, що методика виявлення та розрахунку установчих розмірних зв'язків така ж сама, як і при складанні виробів. Установчі розмірні зв'язки можуть бути віднесені до складання, різниця полягає лише в тому, що допуски на розміри для встановлення заготовок або деталей у різні пристрої, як правило, можуть бути значно більшими, ніж при складанні виробів, і тому їх набагато легше забезпечити. Разом з тим, якщо розбирання та повторне складання не потрібні, складання кожного виробу зазвичай проводиться лише один раз, а встановлення одних і тих же заготовок або деталей може здійснюватися неодноразово, що також необхідно враховувати.

Метою виявлення та розрахунку розмірних зв'язків при роботизованому встановленні заготовок або деталей, вантажно-розвантажувальних роботах основного технологічного обладнання тощо є вирішення наступних задач:

- 1) забезпечення працездатності роботизованої системи протягом необхідного часу експлуатації в умовах дії різноманітних факторів, що впливають на стабільність складових розмірів та розмірних зв'язків;
- 2) вибір методів та засобів роботизації, які зможуть забезпечити необхідні розмірні зв'язки;
- 3) формулювання вимог до характеристик точності промислових роботів, які реалізують роботизоване встановлення заготовок або деталей;
- 4) вибір методів та способів розмірного налагодження системи.

Крім того, на підставі розрахунку розмірних зв'язків можна встановити регламенти технічного обслуговування та профілактики, сформулювати допустимі обмеження зовнішніх впливів в процесі експлуатації технологічної системи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наразі розмірний аналіз – дуже ефективний сучасний засіб для кількісного та якісного аналізу існуючих і синтезу нових технічних систем і технологічних процесів, саме тому в останні роки питанням розмірного аналізу було присвячено чимало наукових досліджень і публікацій як українських, так і зарубіжних авторів [7–13].

У роботі [7] наводяться теоретичні та методологічні основи і алгоритми розмірного аналізу та моделювання технологічних процесів виготовлення деталей, їх використання для оцінювання можливостей та прогнозування з метою забезпечення необхідної точності деталей, визначення розмірних характеристик, які необхідні для реалізації технологічних процесів у виробництві.

Робота [8] присвячена методологічним основам створення системи прогнозування характеристик технологічного процесу на стадії проектування. Створення даної системи надасть можливість переміщення вирішення багатьох задач з етапу освоєння виробництва на етап проектування нового технологічного процесу, на якому процес пошуку оптимальних рішень не буде пов'язаний з низкою значних матеріальних витрат.

У роботах [9; 10] наводяться методологія використання теорії розмірних зв'язків і відповідні типові задачі, які виникають при проектуванні технологічних процесів складання.

Робота [11] присвячена аналізу останніх стандартів допусків ISO, які, разом із своїми перспективами та проблемами, матимуть значний вплив на диджиталізацію виробництва.

Роботи [12; 13] присвячені розмірним та геометричним допускам, що впливають як на вартість, так і на функціональність виробу, адже пошук прийняттого компромісу між ними є одним із найпоширеніших інженерних завдань. У цих роботах автори провели

оцінювання методів аналізу допусків, застосували їх стосовно складних механічних вузлів. Було проаналізовано та порівняно результати, які були отримані методом діаграми допусків, моделюванням методом Монте-Карло, аналізом векторної петлі, уніфікованою моделлю торсора Якобі та іншими методами. Отримані результати підтвердили наявність значних варіацій у результатах досліджуваних методів, що вказало на необхідність обґрунтованого вибору відповідного методу.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Результати ретельного аналізу останніх досліджень і публікацій стосовно розмірного аналізу та систематизація отриманої інформації дозволили зробити наступний висновок: проблема вирішення задачі виявлення та розрахунку установчих розмірних зв'язків при роботизованому встановленні заготовок або деталей у металорізальний верстат або оброблювальний центр наразі не вирішена.

**Метою статті** є вирішення задачі виявлення та розрахунку розмірних зв'язків при роботизованому встановленні заготовок або деталей у МРВ або ОЦ з ЧПК.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо розмірні зв'язки, які виникають при роботизованому встановленні циліндричної заготовки у самоцентруючий токарний патрон МРВ на прикладі роботизованого комплексу (РК) металооброблення (рис. 4). Завантаження заготовки у патрон і вивантаження деталі здійснює ПР (рис. 5).



Рис. 4. Роботизований комплекс металооброблення [14]

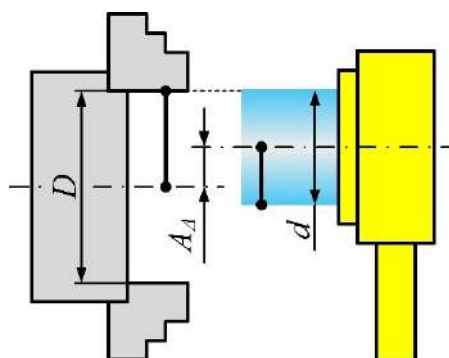


Рис. 5. Встановлення заготовки у самоцентруючий патрон верстата  
Джерело: розроблено авторами.

ПР здійснює захоплення заготовки, переміщує її в робочу зону МРВ, а потім вводить заготовку в міжкулачкову зону патрона, після чого системою ЧПК подається команда на затиск кулачків патрона.

З рис. 5 видно, що введення заготовки між відкритими кулачками патрона можливе у тому випадку, коли значення відхилення від центрування заготовки відносно осі кулачків патрона  $A_{\Delta}$  не перевищує максимального значення  $A_{\Delta max}$ :

$$A_{\Delta max} = \frac{D-d}{2}, \quad (1)$$

де  $A_{\Delta max}$  – максимальне відхилення від центрування;

$D$  – діаметр відкритих кулачків патрона;

$d$  – діаметр заготовки.

Якщо на момент встановлення заготовки значення відхилення  $A'_{\Delta}$  виявиться більше цього гранично допустимого значення, то в процесі руху захватного пристрою (ЗП) ПР вздовж осі шпинделя заготовка своїм торцем буде впирається у патрон (рис. 6), тобто встановлення заготовки буде неможливим.

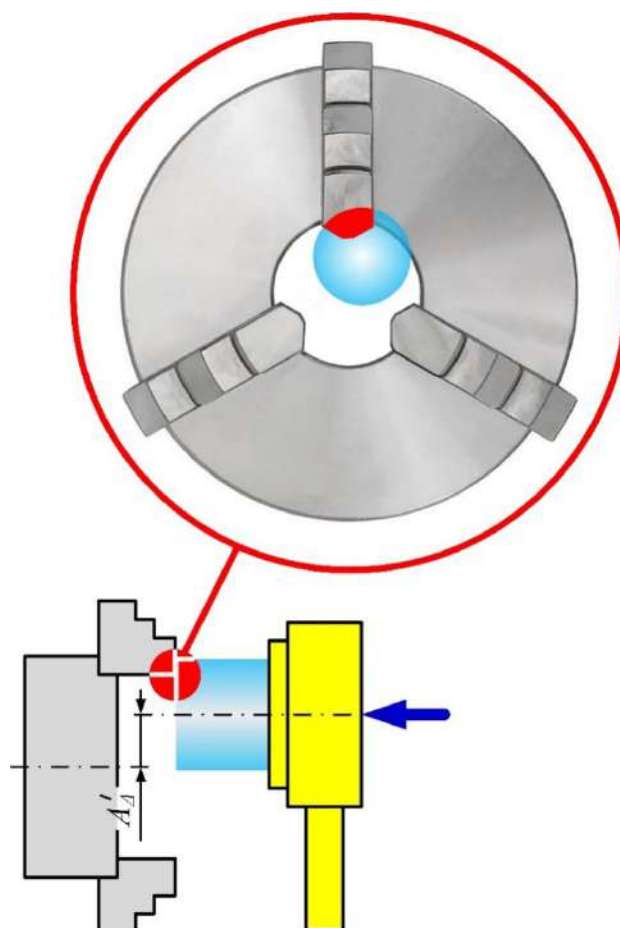


Рис. 6. Неможливість встановлення заготовки у патрон при невиконанні вимоги (1)  
Джерело: розроблено авторами.

З наведеного вище виходить, що забезпечення необхідного значення  $A_{\Delta}$  є умовою можливості роботизованого встановлення заготовки у патрон МРВ або ОЦ. Допустиме значення  $A_{\Delta}$  розраховується, виходячи з розмірів  $D$  і  $d$  за формулою (1).

З цієї залежності впливає значення гранично допустимого відхилення  $A_{\Delta max}$  від співвісності, що дозволяє ПР встановити заготовку у відкритий патрон.

Так як для більшості токарних патронів з механічним приводом для закріплення заготовки діапазон відкриття кулачка може бути досить великим, то, як правило, не виникає труднощів забезпечення відкриття кулачків в діаметрі, наприклад, на 20 мм більше діаметра заготовки. Тоді максимально допустиме відхилення від співвісності буде дорівнювати  $A_{\Delta max} = \pm 10$  мм. У цьому випадку при бажанні забезпечити співвісність значення вихідної ланки можна записати у вигляді  $A_{\Delta max} = 0 \pm 10$  мм. Це означає, щоб найкращим випадком було б виконання умови  $A_{\Delta} = 0$ , але допустиме відхилення дорівнює  $\pm 10$  мм, тобто допуск на відхилення  $A_{\Delta}$  у даному випадку буде дорівнювати  $T_{\Delta} = 20$  мм.

Однак, слід зазначити, що проведеного розрахунку недостатньо для виявлення допустимих відхилень від співвісності, адже розрахункове значення  $A_{\Delta}$  дозволяє лише забезпечити введення заготовки в міжкулачкову зону патрона і є необхідною, але недостатньою умовою.

Розглянемо, як буде фіксуватися заготовка при розрахованому відхиленні від співвісності. Кулачки, зміщуючись до осі патрона, при наявності відхилення від співвісності, будуть прагнути перемістити заготовку в нове положення. В силу того, що заготовка все ще зафіксована у ЗП ПР, буде виникати сила при переміщенні заготовки від ЗП ПР до патрона МРВ. Значення цієї сили можна визначити за наступною формулою:

$$P = j \cdot A_{\Delta}, \quad (2)$$

де  $P$  – сила при перенесенні заготовки від ПР до патрона;

$j$  – жорсткість системи робот-заготовка-патрон;

$A_{\Delta}$  – допустиме відхилення.

При жорсткості ПР  $j = 500$  Н/мм при відхиленні  $A_{\Delta} = A_{\Delta max} = 10$  мм згідно (2) сила, яка діє в момент закріплення на ПР, заготовку та кулачки від співвісності патрона, буде дорівнювати  $P = 5000$  Н. Якби таке зусилля могли б створити кулачки патрона, то щось обов'язково би зламалося: ЗП ПР, заготовка або патрон, тому зрозуміло, що другою, не менш важливою, умовою визначення гранично допустимого відхилення від співвісності буде обмеження сили  $P$  допустимим значенням, що визначається конкретними умовами встановлення заготовки: моделлю МРВ, розмірами і міцністю заготовки, параметрами ПР.

На рис. 7 наведено графік залежності значення допустимого відхилення  $A_{\Delta}$  від значень сили  $P$  при переміщенні заготовки від ЗП ПР у патрон МРВ та жорсткості  $j$  системи робот-заготовка-патрон.

Припустимо, що в конкретному випадку для встановлення заготовки необхідно, щоб значення сили  $P$  не перевищувало 100 Н. Тоді допустиме відхилення від співвісності буде дорівнювати  $A'_{\Delta} = P/j = 100/500 = 0,2$  мм.

Вочевидь, що умова (2) стосовно значення  $A_{\Delta max}$  набагато жорсткіше, ніж умова (1), адже  $A'_{\Delta max} \leq A_{\Delta max}$ . Далі необхідно побудувати розмірний ланцюг для розмірних характеристик РК металооброблення, наведеного на рис. 4. Для цього визначаємо зв'язки між розмірними ланками (рис. 8) і отримуємо шуканий розмірний ланцюг (рис. 9).

Даний розмірний ланцюг описується рівнянням (3):

$$A_{\Delta} = -A_1 - A_2 + A_3 - A_4 - A_5 - A_6 - A_7, \quad (3)$$

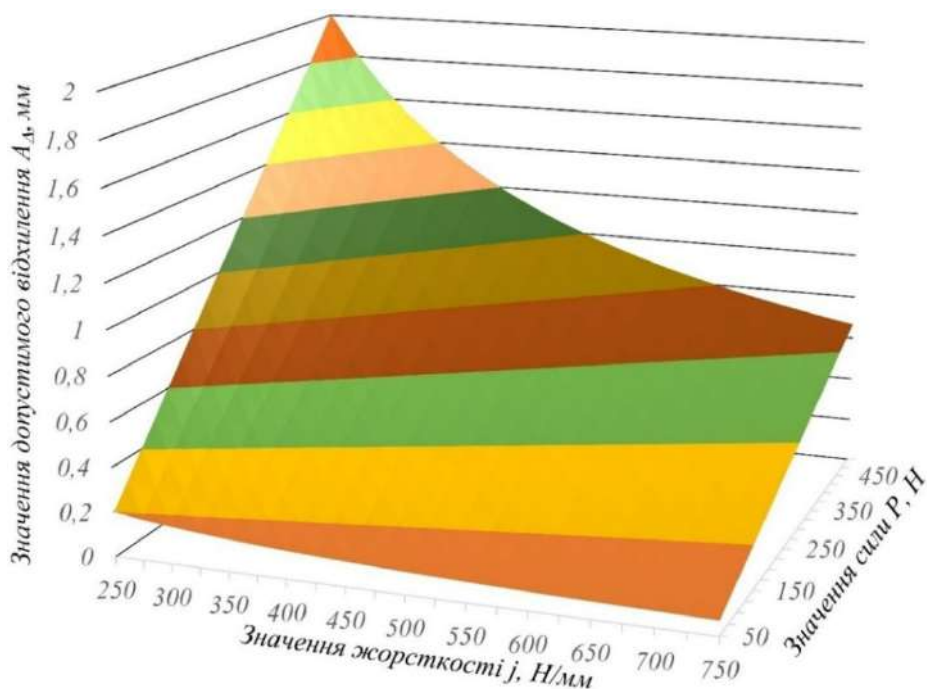


Рис. 7. Графік залежності значення допустимого відхилення від співвісності  $A_d$  від значень сили  $P$  та жорсткості  $j$   
 Джерело: розроблено авторами.

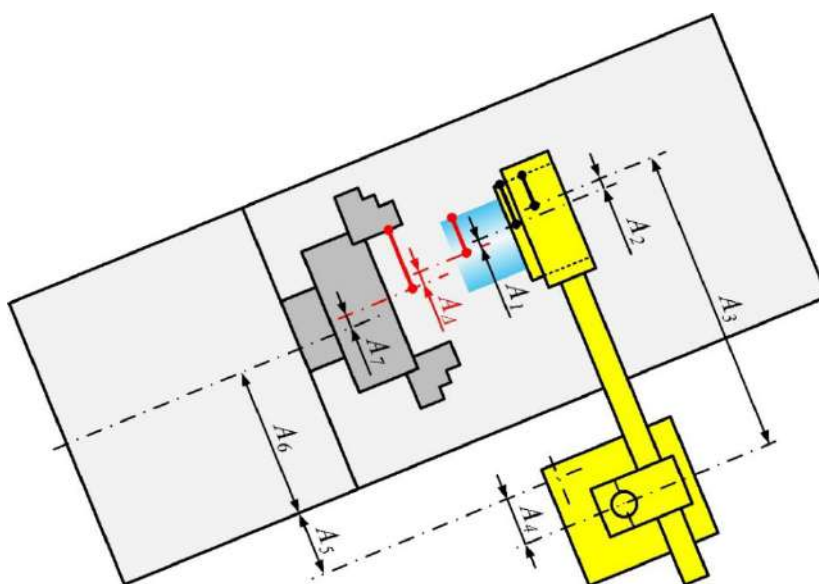


Рис. 8. Зв'язки між розмірними ланками РК металооброблення  
 Джерело: розроблено авторами.

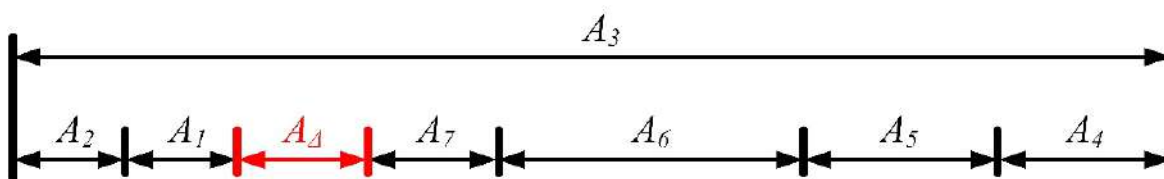


Рис. 9. Розмірний ланцюг РК металооброблення  
 Джерело: розроблено авторами.

де  $A_1$  – відхилення від співвісності технологічної бази заготовки, що встановлена у патроні, та бази, що визначає положення заготовки у ЗП ПР;

$A_2$  – відхилення від співвісності поверхні заготовки у ЗП ПР, яке зумовлене похибкою встановлення заготовки у ЗП  $A_{2в}$  та похибкою центрування ЗП ПР  $A_{2ц}$ ;  $A_2 = A_{2в} + A_{2ц}$ ;

$A_3$  – відстань від осі ЗП ПР до бази відліку розмірів при автоматизованому переміщенні останнього згідно з програмою системи ЧПК (запрограмоване значення позиціонування ЗП ПР);

$A_4$  – відстань від бази відліку розмірів до основної бази робота, що визначає його положення відносно МРВ;

$A_5$  – відстань між ПР та МРВ;

$A_6$  – відстань від осі шпинделя МРВ до основної бази МРВ;

$A_7$  – відхилення від співвісності кулачків патрона по відношенню до осі шпинделя МРВ, що викликане похибкою встановлення патрона на шпиндель  $A_{7в}$  та похибкою центрування кулачків патрона  $A_{7ц}$ ;  $A_7 = A_{7в} + A_{7ц}$ .

Розмірний ланцюг  $A$  характеризує зв'язок між габаритами МРВ, ПР і відхиленням від співвісності. Цей зв'язок можна описати математично трьома рівняннями: рівнянням розмірного ланцюга у номіналах, рівнянням допусків цих розмірностей, яке відповідає методу досягнення точності, та рівнянням середніх відхилень розмірів.

При налагодженні РК при програмуванні ПР (рис. 8) розмір  $A_3$  підбирається таким чином, щоб розмір  $A_4$  знаходився в межах допустимих значень, тобто при налагодженні необхідно використовувати регулювання, однак при роботизованому завантаженні заготовок та розвантаженні деталей необхідно використовувати метод повної взаємозамінності.

В процесі експлуатації РК фактичне значення розміру  $A_4$  в основному буде змінюватися через помилки позиціонування ПР, теплових деформацій, помилок при встановленні заготовки у ЗП. Наприклад, похибка позиціонування завантажувальних ПР може становити 0,5 мм і більше; вісь шпинделя токарного верстата, наприклад, 16К20РФ3, при нагріванні передньої бабки на 20°C зміщується у горизонтальній площині на 20 мкм, а у вертикальній – на 40 мкм (рис. 10). Виникає питання: який ПР слід використовувати: з точністю позиціонування  $\pm 1$  мм,  $\pm 0,1$  мм або  $\pm 0,01$  мм, враховуючи, що зі збільшенням точності позиціонування зростає вартість ПР? Відповідь на це питання можна отримати, провівши розмірний аналіз.

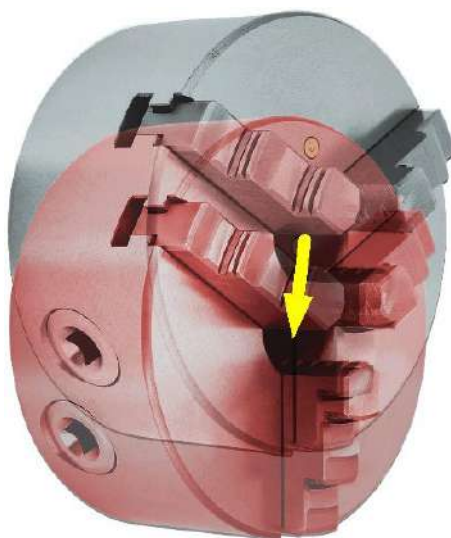


Рис. 10. Зміщення осі шпинделя МРВ внаслідок теплових деформацій  
Джерело: розроблено авторами.



При автоматичній роботі РК необхідно забезпечити встановлення ПР кожної заготовки у патрон МРВ без підналагодження та регулювання, тому співвісність  $A_{\Delta}$  повинна забезпечуватися методом повної взаємозамінності.

При повній взаємозамінності допуск замикаючої ланки повинен дорівнювати сумі полів допусків складових ланок:  $T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7$ , де  $T_1 - T_7$  – допуски розмірів  $A$  відповідного номера (рис. 8). Так, допуск співвісності  $A_{\Delta} = \pm 0,25$  мм дорівнює  $T_{\Delta} = 0,5$  мм.

Розглянемо допуски складових розмірів.

Допуск співвісності  $T_1$  вказується на кресленнику заготовки, яку планується обробляти на РК. Для необробленої поковки допуск може перевищити допуск вихідної ланки. Допуск  $T_2$  визначається похибкою встановлення заготовки у ЗП ПР і похибкою центрування ЗП. Для необроблених поковок похибка встановлення може бути досить значною, в результаті чого сума допусків значно перевищить допуск  $T_{\Delta}$  замикаючої ланки.

Отже, при прийнятих допусках забезпечити необхідні умови для роботизованого встановлення заготовки неможливо.

Існує декілька способів вирішення даної проблеми.

По-перше:

1) зменшення розмірних допусків складових ланок за рахунок застосування більш точного ЗП ПР з меншою похибкою центрування;

2) використання попередньо оброблених заготовок для зменшення похибки встановлення останніх;

3) розміщення ПР не на окремій платформі, а безпосередньо на станині або передній бабці МРВ;

4) обмеження діапазону робочих температур при експлуатації і таким чином зменшення складових допусків  $T_2 - T_6$ .

По-друге, можна розширити допуск замикаючої ланки  $T_{\Delta}$ . З формули (2), з якої було отримано значення допуску, виходить, що розширення допуску при тій самій допустимій силі може бути досягнуто за рахунок зменшення жорсткості заготовки у ЗП ПР. Цей спосіб найбільш зручний і тому ЗП ПР зазвичай роблять підпружиненими. Однак надмірно зменшувати жорсткість також шкідливо, тому що при встановленні заготовок різної ваги буде виникати досить велика похибка позиціонування осі заготовки в ЗП по висоті. Обравши найдешевший ПР з точністю позиціонування  $\pm 1$  мм, можна визначити очікуване поле розсіювання  $\omega_{\Delta}$  розміром  $A_{\Delta}$  за наступною формулою:

$$\omega_{\Delta} = \sum \omega_i, \quad (4)$$

де  $\omega_i$  – поля розсіювання складових ланок.

Нехай  $\omega_{\Delta} = 2,5$  мм. Тоді у ЗП ПР потрібно забезпечити максимальне зміщення заготовки  $A'_{\Delta max} = \pm 1,25$  мм. Для цього жорсткість кріплення повинна бути не більше, ніж  $j_{max} = P/A'_{\Delta max} = 100/1,25 = 80$  Н/мм.

При заданій жорсткості та необхідному значенні зміщення можна сконструювати підпружинену пружну підвіску ЗП ПР.

По-третє, можна використовувати ПР з адаптивною пошуковою системою керування. При цьому може змінитися структура та параметри розмірного зв'язку, метод досягнення точності замикаючої ланки: замість повної взаємозамінності буде використовуватися автоматичне регулювання розміру. Компенсатором у розмірному ланцюгу може виступати зміна позиціонування ЗП ПР, який управляється системою ЧПК.

Крім того, ПР можна оснастити системою технічного зору і штучним інтелектом для аналізу і контролю положення захоплюваної заготовки, тобто необхідна система адаптивного керування ПР.

Однак такий ПР обійдеться набагато дорожче, ніж стандартний завантажувальний робот, і при сучасному рівні розвитку техніки РК, оснащений таким ПР, навряд чи виявиться конкурентоспроможним для роботизованого завантаження заготовки у МРВ. Для цього достатньо розрахувати термін окупності додаткового оснащення ПР технічним зором і таким чином врахувати різницю у вартості інтелектуального та звичайного завантажувального ПР.

Але все ж таки якщо для роботизації встановлення заготовок виникне необхідність використання інтелектуального ПР, то для визначення необхідних вимог до датчиків інформації, системи керування, точності позиціонування тощо необхідно буде виявити та розрахувати розмірні зв'язки. В іншому випадку буде просто неможливо ні спроектувати новий ПР, ні обрати відповідний ПР із числа існуючих, ні запрограмувати його роботу.

Слід відзначити, що проведений розмірний аналіз роботизованого завантаження МРВ було проведено доволі спрощено, тільки для випадку зміщення осі заготовки відносно осі шпинделя, оскільки на практиці можливий і перекис осей останніх.

У загальному випадку положення в просторі одного об'єкта відносно іншого характеризується шістьма параметрами: трьома переміщеннями і трьома обертаннями систем координат. Для аналізу кожного з цих шести параметрів обов'язкова побудова відповідного розмірного ланцюга.

Розглянута задача роботизованого встановлення заготовки ПР у патрон МРВ схожа з багатьма іншими технологічними задачами, що виникають при складанні, наприклад:

- 1) при встановленні валу в гільзу або навпаки;
- 2) при автоматичному встановленні автооператором ОЦ різального інструменту в магазинне гніздо тощо.

**Висновки.** Розглянутий аналіз дозволяє зробити наступні висновки:

- 1) при роботизації технологічних процесів аналіз розмірних зв'язків, що виникають, обов'язковий;
- 2) при роботизованому встановленні заготовки необхідно забезпечити відповідні розмірні зв'язки, інакше роботизоване встановлення заготовки неможливе;
- 3) забезпечення цих розмірних зв'язків безпосередньо впливає на якість та продуктивність роботизованих систем;
- 4) при роботизації виробничих процесів необхідно глибоко вивчити сутність технологічного процесу, який планується роботизувати, зокрема, виявити та розрахувати розмірні зв'язки, обрати метод досягнення точності і доцільні засоби реалізації розмірних зв'язків у роботизованому виробництві.

#### Список використаних джерел

1. Welcome to the presentation of World Robotics 2022 [Electronic resource] – Access mode [https://ifr.org/downloads/press2018/2022\\_WR\\_extended\\_version.pdf](https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_extended_version.pdf)
2. Machine Tending Robots: Maximizing Your Production Output [Electronic resource] – Access mode
3. Forget the past, automate for the future [Electronic resource] – Access mode <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/automationsoftware/forget-the-past-automate-for-the-future>
4. The Advantages of CNC Machine Tending with Hanwha HCR Collaborative Robots [Electronic resource] – Access mode <https://factorysurplusdirect.com/the-advantages-of-cnc-machine-tending-with-hanwha-hcr-collaborative-robots/>
5. CNC Robotics: CNC Machining and Automated Robots [Electronic resource] – Access mode <https://www.rapidirect.com/blog/cnc-robotics/>

6. Smart robotic machine tending solutions [Electronic resource] – Access mode <https://www.fanuc.eu/dk/en/industrial-applications/machine-tending>
7. Приходько, В. П. Розмірне моделювання та аналіз технологічних процесів ресурс : навч. посіб. для студ. спец. 131 «Прикладна механіка» / В. П. Приходько ; КПІ ім. І. Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 249 с.
8. Паливода Ю. Є. Розмірні ланцюги : навч.-метод. посіб. / уклад. : Ю. Є. Паливода, А. Є. Дячун, Ю. Б. Капацла, І. Г. Ткаченко. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2018. – 132 с.
9. Основи технології складання : навч. посіб. для студ. спец. 131 "Прикладна механіка" / Г. П. Кремнев, Ф. В. Новіков, В. О. Жовтобрюх, В. В. Стрельбицький. – Дніпро : ЛІРА, 2021. – 159 с.
10. 2D tolerance stack-up analysis with examples [Electronic resource] – Access mode <https://www.wasyresearch.com/2d-tolerance-stack-up-analysis-with-examples/>
11. Morse, E. P. A brief analysis of recent ISO tolerancing standards and their potential impact on digitalization of manufacturing [Electronic resource] / E. P. Morse, C. M. Shakarji, V. Srinivasan // Procedia CIRP. – 2018. – Vol. 75. – P. 11-18. – Access mode <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118305961?via%3Dihub>
12. Kosec, P. A comparison of the tolerance analysis methods in the open-loop assembly [Electronic resource] / P. Kosec, S. Škec, D. Miler // Advances in Production Engineering & Management. – 2020. – Vol. 15. – P. 44-56. – Access mode [http://apem-journal.org/Archives/2020/Abstract-APEM15-1\\_044-056.html](http://apem-journal.org/Archives/2020/Abstract-APEM15-1_044-056.html)
13. Comparative study of tolerance analysis methods applied to a complex assembly / S. Ramnath, P. Haghghi, A. Chitale, J. K. Davidson, J. J. Shah // Procedia CIRP. – 2018. – Vol. 75. – P. 208-213, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.073>
14. Industrial Robot Solutions for Manufacturing. (б. д.). millsenc.co.uk. Взято 28 серпня 2023 р. з <https://www.millsenc.co.uk/automation-systems/industrial-robots/>

### References

1. Welcome to the presentation of World Robotics 2022. (n.d.). ifr.org. [https://ifr.org/downloads/press2018/2022\\_WR\\_extended\\_version.pdf](https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_extended_version.pdf)
2. Machine Tending Robots: Maximizing Your Production Output. (n.d.). howtorobot.com. <https://howtorobot.com/expert-insight/machine-tending-robots>
3. Forget the past, automate for the future. (n.d.). canadianmetalworking.com. <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/automationsoftware/forget-the-past-automate-for-the-future>
4. The Advantages of CNC Machine Tending with Hanwha HCR Collaborative Robots. (n.d.). factorysurplusdirect.com. <https://factorysurplusdirect.com/the-advantages-of-cnc-machine-tending-with-hanwha-hcr-collaborative-robots/>
5. CNC Robotics: CNC Machining and Automated Robots. (n.d.). rapiddirect.com. <https://www.rapiddirect.com/blog/cnc-robotics/>
6. Smart robotic machine tending solutions. (n.d.). fanuc.eu/dk/en. <https://www.fanuc.eu/dk/en/industrial-applications/machine-tending>
7. Prykhodko, V.P. (2021). Dimensional modeling and analysis of technological processes. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho.
8. Palyvoda, Yu.Ie., Diachun, A.Ie., Kapatsila, Yu.B., & Tkachenko, I.H. (2018). Dimensional chains. Ternopil: Ternopilskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet imeni Ivana Puliuia.
9. Kremniev, H.P., Novikov, F.V., Zhovtobriukh, V.O., & Strelbitskiy V.V. (2021). Basics of assembly technology. Dnipro: LIRA.
10. 2D tolerance stack-up analysis with examples. (n.d.). wasyresearch.com. <https://www.wasyresearch.com/2d-tolerance-stack-up-analysis-with-examples/>
11. Morse, E.P., Shakarji, C.M., & Srinivasan, V. (2018). A brief analysis of recent ISO tolerancing standards and their potential impact on digitalization of manufacturing. *Procedia CIRP*, 75, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.080>

12. Kosec, P., Škec, S., & Miler, D. (2020). A comparison of the tolerance analysis methods in the open-loop assembly. *Advances in Production Engineering & Management*, 16(1), 44–56. <https://doi.org/10.14743/apem2020.1.348>
13. Ramnath, S., Haghghi, P., Chitale, A., Davidson, J.K., & Shah, J.J. (2018). Comparative study of tolerance analysis methods applied to a complex assembly, *Procedia CIRP*, 75, 208–213, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.073>
14. Industrial Robot Solutions for Manufacturing. (n.d.). millscnc.co.uk. <https://www.millscnc.co.uk/automation-systems/industrial-robots/>

Отримано 30.08.2023

UDC 621.865.8

**Volodymyr Kravets<sup>1</sup>, Oleksandr Kravets<sup>2</sup>, Yuriy Adamenko<sup>3</sup>, Serhii Lapkovsky<sup>4</sup>,  
Volodymyr Korenkov<sup>5</sup>, Volodymyr Frolov<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Engineer of the Department of machine design

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [bond118@meta.ua](mailto:bond118@meta.ua) ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6867-4858> ResearcherID: ITU-8413-2023

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machine design

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [om.kravets@ukr.net](mailto:om.kravets@ukr.net) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7468-0956> ResearcherID: IUQ-7186-2023

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machine design

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [yuriy.adamenko@ukr.net](mailto:yuriy.adamenko@ukr.net) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4232-3206> ResearcherID: ACT-0127-2022

<sup>4</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [Lapkovsky@ukr.net](mailto:Lapkovsky@ukr.net) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231> ResearcherID: HCH-3837-2022

<sup>5</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [volodymyr.korenkov@gmail.com](mailto:volodymyr.korenkov@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1911-9496> ResearcherID: ADG-1590-2022

<sup>6</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [v.k.frolov@gmail.com](mailto:v.k.frolov@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X> ResearcherID: ACH-0071-2022

## ANALYSIS OF DIMENSIONAL RELATIONSHIPS OF THE ROBOTIC COMPLEX

*The use of industrial robots is an indispensable way to improve the quality and productivity of modern production. Currently, among all robotic technological operations, the manipulation of production objects is the most common robotic operation. The article is devoted to solving the issues of dimensional analysis of robotic metalworking complexes, because currently dimensional analysis is a very effective modern means of ensuring both quantitative and qualitative analyzes of existing and synthesis of new technical systems and technological processes. The purpose of the article is to solve the problem of detecting and calculating dimensional relationships during the robotic installation of blanks or parts in a metal cutting machine. The article examines the dimensional relationships that arise during the robotic installation of a cylindrical blanks in a self-centering lathe chuck of a metal-cutting machine using the example of a robotic metalworking complex. For this robotic complex, the relationships between dimensional links were determined and the corresponding dimensional chain was obtained, which characterizes the relationship between the dimensions of the metal-cutting machine, the industrial robot and the deviation from co-axis. This connection can be represented mathematically by three equations: the equation of the dimensional chain in denominations; the tolerance equation of these dimensions, which corresponds to the method of achieving accuracy; by the equation of average size deviations. During the automatic operation of the robotic complex, it is necessary to ensure that the industrial robot installs each blank in the chuck of the metal-cutting machine without adjustment and adjustment, therefore, the alignment must be ensured by the method of complete interchangeability. With full interchangeability, the tolerance of the closing link must be equal to the sum of the tolerance fields of the component links. The given dimensional analysis of the robotic loading of the metal-cutting machine was carried out in a rather simplified manner, only for the case of displacement of the axis of the blank from the axis of the spindle, since in practice it is also possible to misalign the axes of the latter. In general, the position of one object in space relative to another is characterized by six parameters: three movements and three rotations of coordinate systems. For the analysis of each of the six parameters, the construction of the corresponding dimensional chain is mandatory.*

**Keywords:** industrial robot; machine tool; robotic complex; dimensional connections; dimensional chain.

Fig.: 10. References: 14.

**Lubica Miková<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Associate Professor in Technical Sciences, Associate Professor of Technical University of Kosice, Faculty of Mechanical Engineering, (Košice, Slovakia)

E-mail: [lubica.mikova@tuke.sk](mailto:lubica.mikova@tuke.sk). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2864-0651>

ResearcherID: G-7764-2014. Scopus Author ID: 55259674100

**DESIGN OF A FUNCTIONAL MODEL OF A THREE-WHEELED MOBILE ROBOT**

Mobile wheeled robots are one of the most widespread group of service robots today. The simplicity of their design and their ability to better negotiate difficult terrain places them at the forefront. In practice, it is possible to find a variety of mobile wheeled robots, which differ from each other in the number and arrangement of wheels, the variety of structural design, or the suspension of the wheels and their suspension.

Current statistics confirm that mobile service robots on wheeled chassis are the most numerous design of all realized applications, technical practice has filled with the diversity of their design solutions. The diversity of wheeled mobile service robots is mainly in the design of the wheeled chassis, the solutions range from single-wheeled to multi-wheeled concepts, from simple variants of the chassis layout to special or combined systems.

The purpose of the article is the design of a three-wheeled robot, which will include the derivation of a mathematical model, the construction of a simulation model and the creation of a model in CAD software. An important part of the robot analysis is a complete kinematic model of the mechanical system, which provides all the necessary kinematic quantities for both the dynamic model of the mechanical system (force application, link loading, sizing) and for control needs (synthesis of position and velocity controllers).

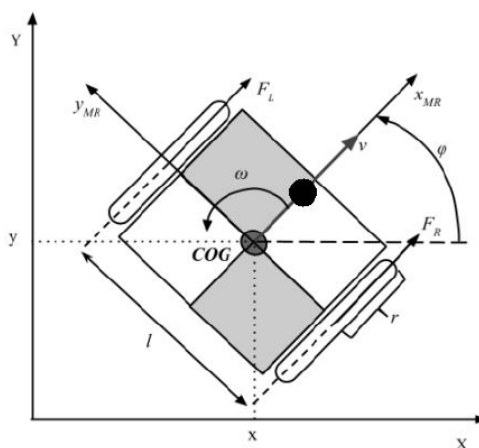
It is mainly about the position and orientation of the end working point in time and the corresponding position of the individual links of the mechanism. The next step was the overall design of the electronic system by appropriately selecting the electronic components and also creating the overall electronic circuitry. Finally, an experimental realistic model of the mobile robot was created from the simulation results.

**Keywords:** mobile robot; simulation; mathematical model.

*Fig.: 8. References: 7.*

**Introduction.** Nowadays, mobile wheeled robotics is an indispensable part, whether in industry such as AGV unmanned forklifts, which can communicate wirelessly with the control center of the line, or in everyday life, where service robots such as robotic vacuum cleaners represent a very large part. Inspection robots, which solve very specific problems, are also represented in countless numbers. One of these is the mobile inspection robot for finding explosive ordnance devices. Since this topic is very topical and the development is still progressing for this reason, the idea and the primary goal to design a total control, simulation and experimental prototype of a wheeled robot was conceived.

**Mathematical model of a prototype mobile wheeled robot.** The mathematical model of the prototype mobile wheeled robot consists of several subsystems. The kinematic model can be derived from the motion of the centre of gravity (COG) of the mobile wheeled robot, which is analogous to the motion of a material point in the plane when it moves in the plane given by its x, y coordinates and the rotation angle  $\omega$ .



*Fig. 1 Three-wheeled mobile robot*

The motion of the mobile robot in the form of a forward velocity vector  $v$  is described by two components: the x-axis velocity ( $v_x$ ) and the y-axis velocity ( $v_y$ ). This combination of velocities forms the resulting kinematic model of the wheeled robot and it is:

$$v_x = v \cos \varphi \tag{1}$$

$$v_y = v \sin \varphi \tag{2}$$

$$\dot{\varphi} = \omega \tag{3}$$

So:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 \\ \sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \tag{4}$$

The kinematic model of the mobile robot accepts inputs such as linear velocity ( $v$ ) and angular velocity ( $\omega$ ). It processes these inputs to determine the position and rotation of the mobile robot in the  $[x, y, \varphi]$  plane.

The dynamic model of the mobile robot is an extension of the kinematic model presented earlier. This dynamic model, often referred to as the simple dynamic model, does not account for wheel slip, slippage, or frictional forces between the robot's wheels and the surface on which it moves. In this prototype model, we consider the forces ( $F_R$  and  $F_L$ ) acting on the individual motors of the wheeled robot that are required for in-plane motion. The model includes parameters such as wheel path ( $l$ ), robot mass ( $M$ ), wheel moment of inertia ( $J_w$ ), chassis moment of inertia ( $J$ ), and wheel radius ( $r$ ).

The forward velocity vector of the robot can be expressed using Newton's law, namely:

$$M \frac{\partial v}{\partial t} = F_R + F_L \tag{5}$$

The analogous rotational velocity ( $\omega$ ) with respect to the centre of gravity is then obtained by applying Newton's second law:

$$J \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{1}{2} F_R - \frac{1}{2} F_L \tag{6}$$

To create the mathematical model, a feedback loop for dynamics suppression will need to be added, where based on the current angular velocity of the right  $\omega_R$  and left  $\omega_L$  and the desired angular velocity of the right  $\omega_{Rd}$  and left  $\omega_{Ld}$ , the  $F_R$  and  $F_L$  forces that the robot's motors can exert will be computed. The feedback loop for suppressing the influence of the dynamics is constructed based on the equations which have the form:

$$F_{R/L} = P(\omega_{Rref/Lref} - \omega_{R/L}) \text{ for } |P\omega_{Rref/Lref} - \omega_{R/L}| < F_{max} \tag{7}$$

$$F_{R/L} = F_{max} \text{sign}(\omega_{Rref/Lref} - \omega_{R/L}) \text{ for } |P\omega_{Rref/Lref} - \omega_{R/L}| \geq F_{max} \tag{8}$$

The main task of the reduction is to recalculate the forward and angular velocity  $v, \omega$ . The connection between the forward velocity ( $v$ ), the angular velocity ( $\omega$ ) and the individual forward wheel velocities ( $v_R$  and  $v_L$ ) can be given using matrix notation:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 \\ 1/l & 1/l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_R \\ v_L \end{bmatrix} \tag{9}$$

Multiplying the matrix gives an equation that expresses the circumferential velocities of the wheels  $v_R$  a  $v_L$ :

$$v_R = v + l/2\omega \tag{10}$$

$$v_L = v - l/2\omega \tag{11}$$

The circumferential velocity and angular velocity are defined by the equations:

$$v_R = r\omega_R \tag{12}$$

$$v_L = r\omega_L \tag{13}$$

**Simulation model of a prototype wheeled robot.** In this section, the individual subsystems that make up the overall robot simulation model are designed using block diagrams in Matlab/Simulink into which the previously derived equations have been inserted.

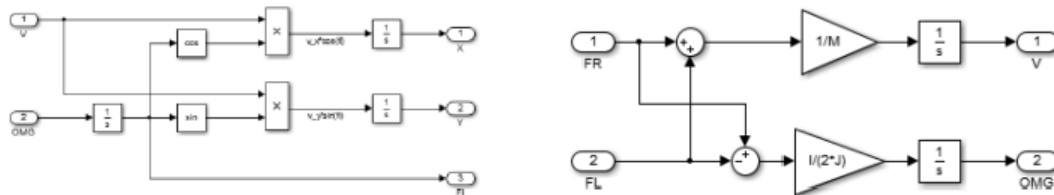


Fig. 2 Block diagram of the kinematic and dynamic subsystem of a three-wheeled robot

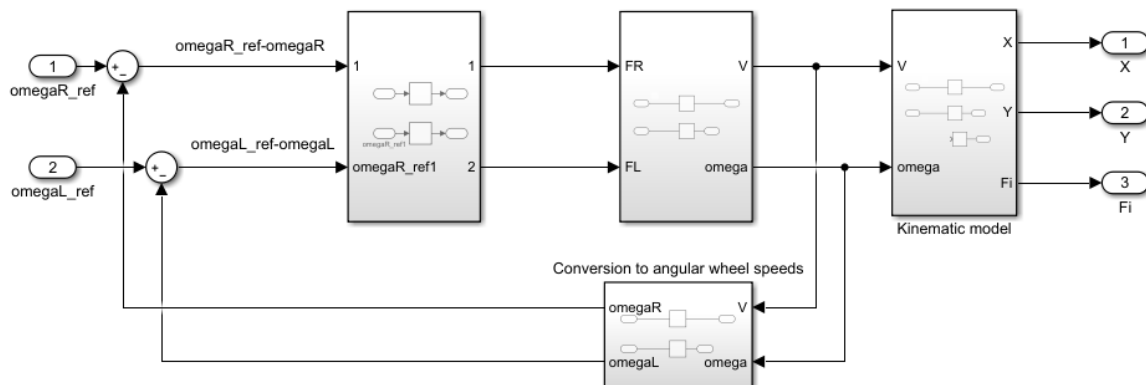


Fig. 3 Block diagram of the overall simulation model of the wheeled robot

Subsequently, the design of the three-wheeled robot was implemented in CAD software. The chassis will be a two-axle chassis with two driven independently steered wheels and one driven spherical(ball) wheel. The design of the prototype robot consists of seven parts.

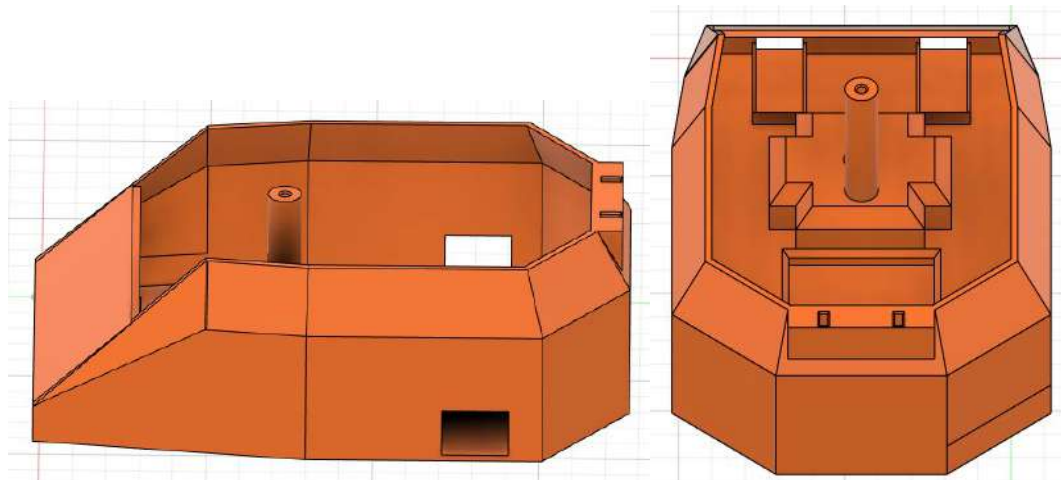
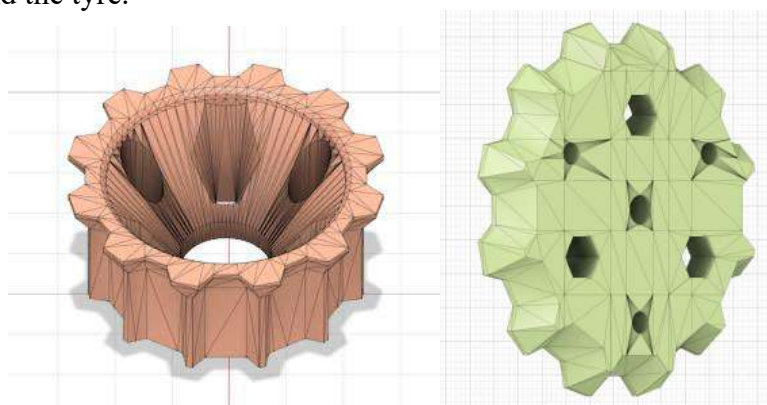


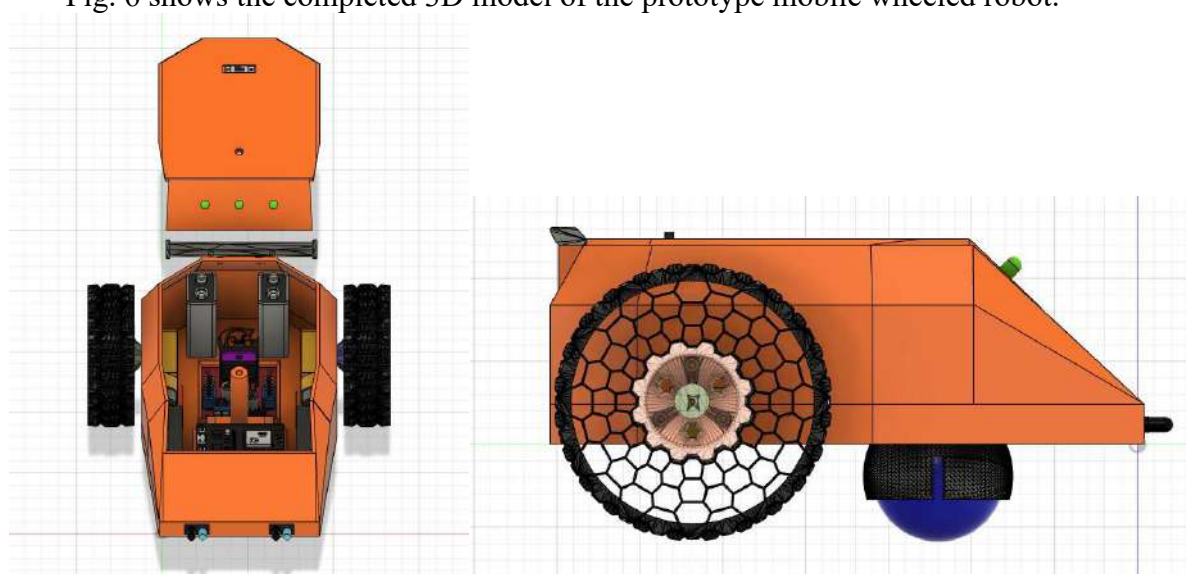
Fig. 4 Frame model

The next unit is the wheels, which consist of three separate parts, namely the inner disc, the outer disc and the tyre.



*Fig. 5 Outer and inner disc model*

Fig. 6 shows the completed 3D model of the prototype mobile wheeled robot.

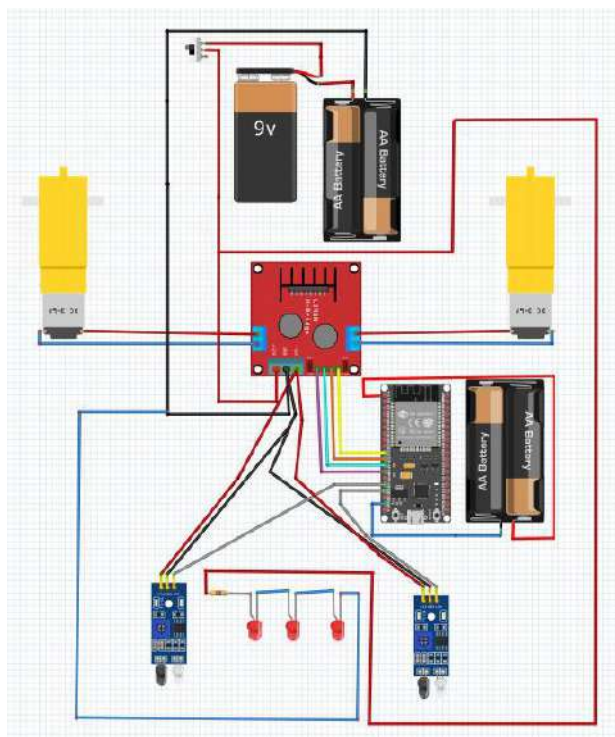


*Fig. 6 Completed 3D model of a prototype mobile wheeled robot*

The overall dimensions of the prototype wheeled robot are: length = 192mm, width = 176mm and height = 105mm.

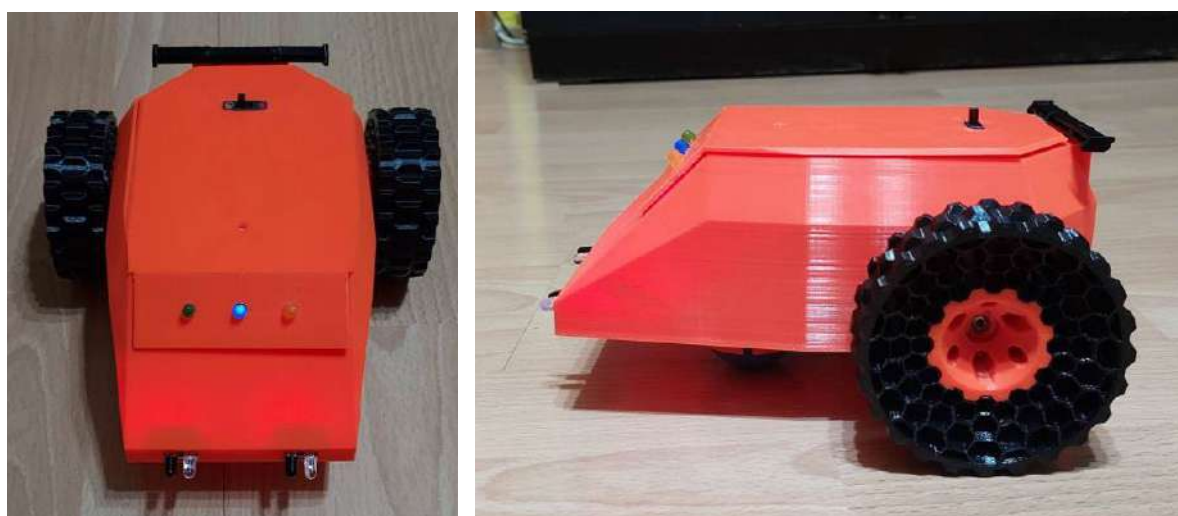
**Design of the electronic part of the prototype wheeled robot.** The following section presents the overall design of the electronic subsystem of the prototype wheeled robot. Two DC motors with an all-metal gearbox were chosen to drive the wheels. For the control of the motors, the L298N H-bridge was chosen with the capability of controlling two motors. Two infrared sensors were chosen for obstacle sensing and mainly to prevent the robot from crashing. A small three-position switch was chosen to switch on the robot. To signal the robot switching on, 3 LEDs were chosen, which are connected in series, and also one resistor. The power supply for the drive part consists of one 9V battery and two 1.5V batteries connected in series. Two 1.5V batteries are used as the external power supply for the control unit. The main component for the prototype robot is the control unit. ESP 32 WROOM was chosen as the control unit.





*Fig. 7 Electronic circuit design*

In Fig.8, a functional three-wheeled mobile robot is assembled.



*Fig. 8 Real model of a mobile wheeled robot*

**Conclusion.** This paper deals with the design of a three-wheeled mobile robot. A mathematical model of the wheeled robot has been constructed, from which the actual design of the simulation model of the wheeled robot consists. The experimental model of the wheeled robot has been designed and this design has been carried out in CAD software where the overall design model of the prototype wheeled robot has been created. After the simulation and experimental design, the overall design of the electronic system was carried out by selecting the correct electronic components and also creating the overall electronic circuitry. As the last step, a functional real robot model was created. Design of the control algorithm for the prototype wheeled robot.

### Acknowledgements

*This article was created thanks to the project support: VEGA 1/0436/22 Research on modeling methods and control algorithms of kinematically redundant mechanisms.*

### References

1. Dudek, G., Jenkin, M. (2000). Computational principles of mobile robotics. Reprint. Cambridge, Mass: Cambridge University Press.
2. Knoflíček, R., Haltmar, M. (2000). Konštrukcia mobilných robotov(1-5), MM-Priemyslové spektrum n.2-6/2000.
3. Lynch, K.M., Park, F.C. (2017). Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control. Cambridge University Press.
4. Murray, R.M., Lee, Z., Sastry, S.S. (1994). A Mathematical Introduction to Robotic Introduction to Robotic Manipulation. CRC Press.
5. Čerkala, J., Jadlovská, A. (2014) Mobile Robot Dynamic with Friction in Simulink. *Proceedings of 22nd Annual Conference: Technical Computing Bratislava*. Bratislava. P. 1-10.
6. Mireles, J. Jr. (2004). Kinematics of Mobile Robots, Selected notes from 'Robótica: Manipuladores y Robotsmóviles' AníbalOllero.

Отримано 02.08.2023

UDC 621.865.8

### Любица Микова

Доцент технічних наук, доцент Технічного університету Кошице, факультет інженерії машинобудування

E-mail: [lubica.mikova@tuke.sk](mailto:lubica.mikova@tuke.sk). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2864-0651>

ResearcherID: G-7764-2014. Scopus Author ID: 55259674100

## ПРОЕКТ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ТРИКОЛІСНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

Мобільні колісні роботи є однією з найпоширеніших на сьогоднішній день груп сервісних роботів. Простота їхньої конструкції та здатність краще долати складну місцевість робить їх передовими. На практиці можна зустріти різноманітні мобільні колісні роботи, які відрізняються один від одного кількістю та розташуванням коліс, різноманітністю конструкції або підвіскою коліс.

Сучасна статистика підтверджує, що мобільні сервісні роботи на колісних шасі є найчисленнішими з усіх реалізованих додатків, технічна практика наповнила різноманітністю їх конструктивних рішень. Різноманітність колісних мобільних сервісних роботів полягає в основному в конструкції колісних шасі, рішення варіюються від одноколісних до багатоколісних концепцій, від простих варіантів компонування шасі до спеціальних або комбінованих систем.

Метою статті є проектування триколісного робота, що включатиме виведення математичної моделі, побудову імітаційної моделі та створення моделі в програмі CAD. Важливою частиною аналізу робота є повна кінематична модель механічної системи, яка надає всі необхідні кінематичні величини як для динамічної моделі механічної системи (прикладення сили, навантаження ланки, розмір), так і для потреб керування (посадження положення і регуляторів швидкості). Кінематичну модель можна вивести з руху центру тяжіння (COG) мобільного колісного робота, який аналогічний руху матеріальної точки в площині, коли вона рухається в площині. Йдеться головним чином про положення та орієнтацію кінцевої робочої точки в часі та відповідне положення окремих ланок механізму.

Окремі підсистеми, які складають загальну імітаційну модель робота, розроблені за допомогою блок-схем у Matlab/Simulink, у які задано попередньо отримані рівняння.

Наступним кроком був загальний дизайн електронної системи шляхом відповідного вибору електронних компонентів, а також створення загальної електронної схеми. Нарешті, за результатами моделювання була створена експериментальна реалістична модель мобільного робота.

**Ключові слова:** мобільний робот; моделювання; математична модель.

Рис.: 8. Бібл.: 7.

*Peter Tuleja<sup>1</sup>, Tomáš Danilo<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Production Systems and Robotics, Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)

E-mail: [peter.tuleja@tuke.sk](mailto:peter.tuleja@tuke.sk), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6390-3109>

Scopus Author ID: 55570858300

<sup>2</sup> Student of the Department of Industrial Automation and Mechatronics, Technical University of Košice (Košice, Slovakia)

E-mail: [tomas.danilo@student.tuke.sk](mailto:tomas.danilo@student.tuke.sk)

## RECONSTRUCTION OF ELECTRO-PNEUMATIC MECHANISM AS PART OF A LABORATORY ENVIRONMENT FOR TEACHING NEEDS

*The paper discusses the proposal of a mechanism forming part of the training environment for the practical preparation of faculty students for the needs of industry. The training environment serves as an educational and practical workplace enabling the improvement of students in PLC programming as well as in describing the functions and design solutions of the represented components from the field of pneumatics, sensors, electrical safety devices and their combinations.*

*The design of the described mechanism was implemented as an upgrade of the existing solution, which showed some imperfections during operation. The article presents the original solution and the proposal for a new one, while at the end a comparison of the pros and cons of both solutions is made.*

*Both described solutions were created as outputs from the diploma solution, respectively. Bachelor thesis of our students. The article has an educational and descriptive character.*

**Keywords:** pneumatics; training workplace; reconstruction, electro-pneumatic, programming, PLC.

*Fig.: 11. Tables: 0. References: 6.*

**Relevance of the research.** The Slovak labour market, especially in the engineering sector, has been struggling with a lack of skilled labour for a long time. With the disappearance of company training centres before 1989, the "exodus" of secondary and elementary school students in Slovakia began from industrial schools and apprenticeship schools to gymnasiums and humanitarian-oriented schools. In addition, the transformed industrial schools introduced more and more subjects unilaterally focused on IT support into the curriculum, while successfully creating a "vacuum" in professionally prepared high school students who would like to continue their training at technical universities. If they were found, there were and still are few inquiries in the field of automation means and equipment.

**Problem statement.** Around the middle of the second decade of the 21st century, companies established on the Slovak market began to urgently demand a qualified workforce, whose recruitment still lagged behind the needs of the development of these companies. Some companies started to build their own training centres and "in their own image" there they started to educate the "teenage" workforce. Since there is a relatively high turnover of the workforce in the Slovak labour market, this model was not entirely successful. Companies began to "pressure the state" in an attempt to transfer this responsibility to it. The state accepted the challenge in the form of introducing the so-called of dual education in secondary schools. The universities remained slightly aside.

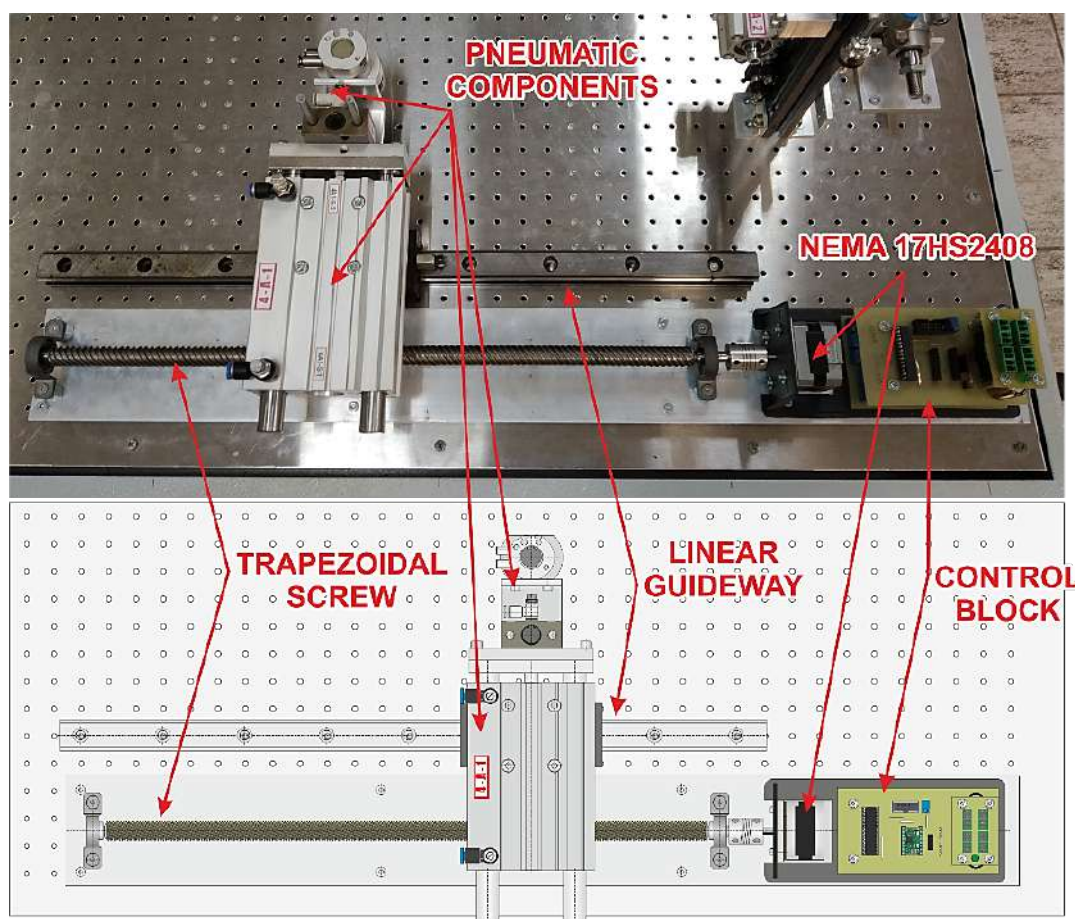
**Analysis of recent research and publications.** The current state of preparation of university graduates meeting the criterion of "immediate use in practice" is still not at the required level. That is also why we at the department (also in the form of published grant tasks) started the process of practical teaching in such a way that, in the form of training on equipment used in technical practice and by involving students in the practical form of teaching in the form of building equipment based on the assignments set by the teachers, the output of these assignments is then a real laboratory a facility that can often be used for practical training of the next generation of students.

**Uninvestigated parts of a common problem.** The socio-professional problem of the practical preparation of technical youth for companies is still as if on the periphery of the state's interest. It is necessary to look for alternative ways to ensure the real start of the university

training of graduates, especially of technical schools and universities, because only a practically prepared graduate can hold a position in the research field, even if it does not necessarily have to be basic research.

**Research objective.** We have therefore based the issue of the practical training of our students on the construction of laboratory spaces equipped with the necessary technical and component equipment so that, when solving semester or bachelor's or diploma theses, the student can produce technical equipment not only from the design side but also from the implementation side (finished product from design to implementation concept with the revival and fulfillment of the simulated task).

**The statement of basic materials.** In the sense of what has been said, the project of a training workplace designed for practical training in the field of pneumatics and electro-pneumatics is implemented in the form of continuous improvement. Within the solution of the diploma thesis [6], the basis for the possibility of implementing new mechanisms was created. The very basis contained in the solution of this diploma thesis contained a mechanism (workingly designated as Workplace 4) based on a combination of pneumatic and electric drives, Fig. 1.



*Fig. 1 Mechanism with trapezoidal screw (original version)*

Source: photo created by the authors

It is a mechanism, one of whose linear movements is provided by a NEMA 17HS2408 electric stepper motor [6] controlled via PLC outputs to precisely programmed positions within its movement ranges. The stepper motor was controlled by a control block consisting of an A4988 driver with an ATMEL Atmega 186a microcontroller, Fig. 2.

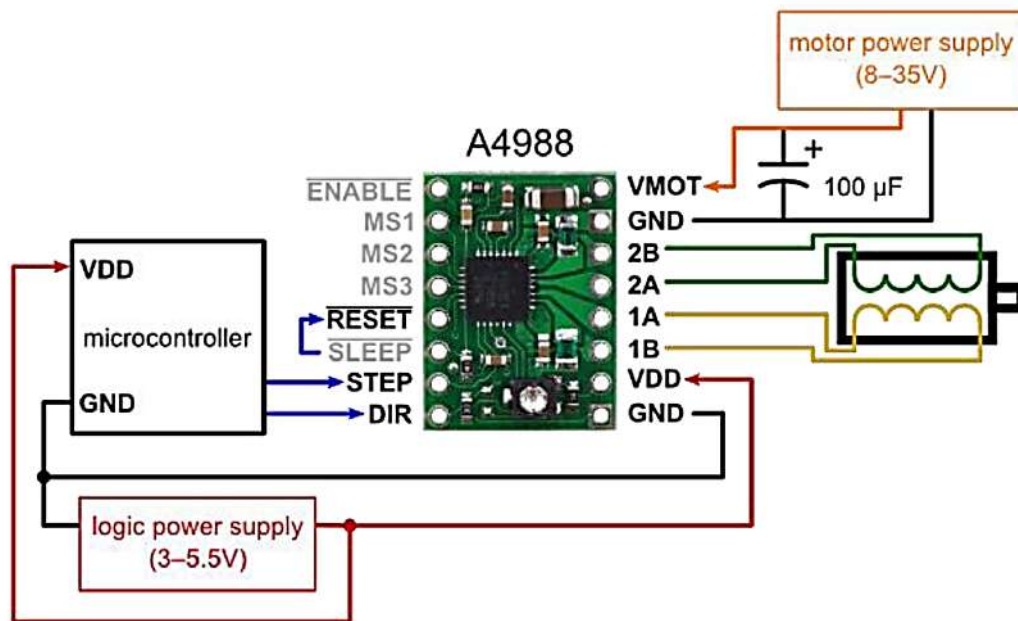


Fig. 2 Microcontroller and driver wiring diagram.

Source: [5]

The control process was solved by uploading a permanent program to the microcontroller, which sent a set number of pulses to the driver, which then generated the corresponding number of motor steps. The request for this process itself was generated from the connected PLC (based on a specific output signal).

Since this solution showed some problematic properties (overheating of the control module, problem with reprogramming the system to a new position), we proceeded to modify it, while at the same time we integrated it into a single unit with the workplace previously marked as Workplace 9, Fig. 3.

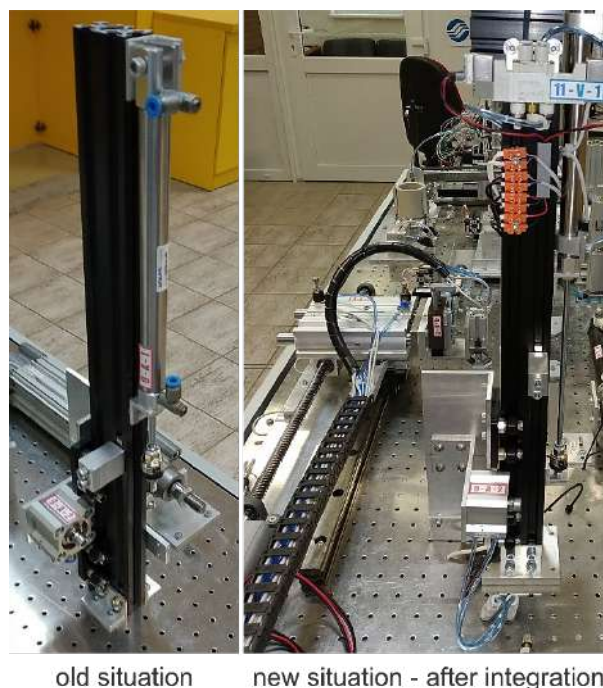
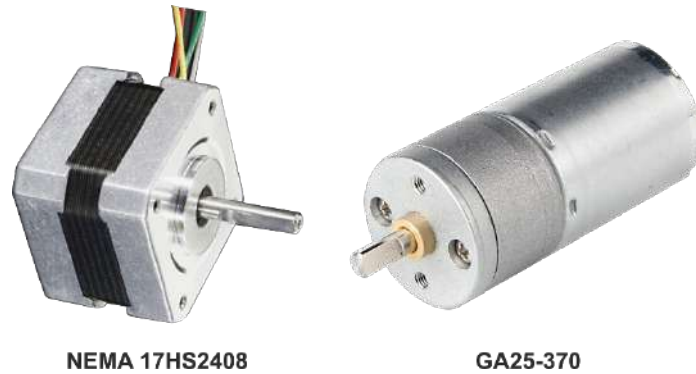


Fig. 3 The process of integrating two workplaces.

Source: photo created by the authors

The entire reconstruction process with the integration of two workplaces was designed and implemented by a bachelor's student as the output of his bachelor's thesis [1].

To a certain extent, it was necessary to proceed with fundamental changes in the organization of the workplace. The author of the project suggested replacing the NEMA stepper motor (including its control unit) with a DC motor with an integrated gearbox [4], Fig. 4.



**NEMA 17HS2408** **GA25-370**  
 Fig. 4 Original and new electric drive (motor).

Source: by editing the catalog data of [6, 4] - created by the author

On the one hand, we thus eliminated the problem of complicated control and overheating of the power member (driver) of the unit, on the other hand, we lost higher accuracy when positioning the mechanical unit. It happened because of the need to use magnetic switches as a signal for the desired position (sensor hysteresis - a magnetic reed sensor from SMC was used). The problem with hysteresis caused by the "unstable" interpretation of the position is partially compensated by the high gear ratio of the new engine's gearbox, which guarantees a nominal output speed of 62 rpm. The easy "reconfiguration" of the motor activity of the electric motor unit can be considered as a positive.

Thanks to the fact that the author of the project of the training workplace [5] remembered to ensure two DC voltages (24V DC and 12V DC), it facilitated the integration of the new motor into the control chain in the form of a cross arrangement of the control signal from the PLC with a pair of relays, Fig. 5.

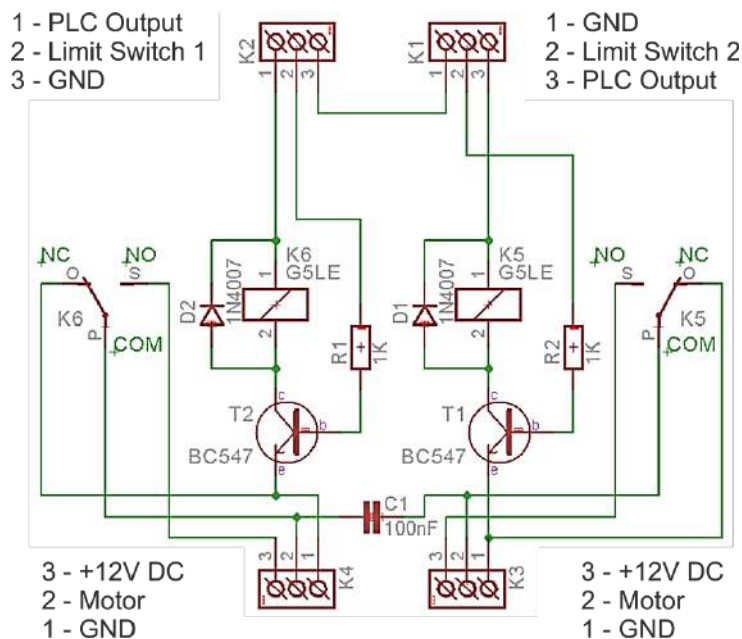


Fig. 5 Control circuit for controlling the new motor [1]

Thus, through this electronics, it was possible to ensure the reversal of the movement of the motor during steering and at the same time treat the end positions of the movement unit.

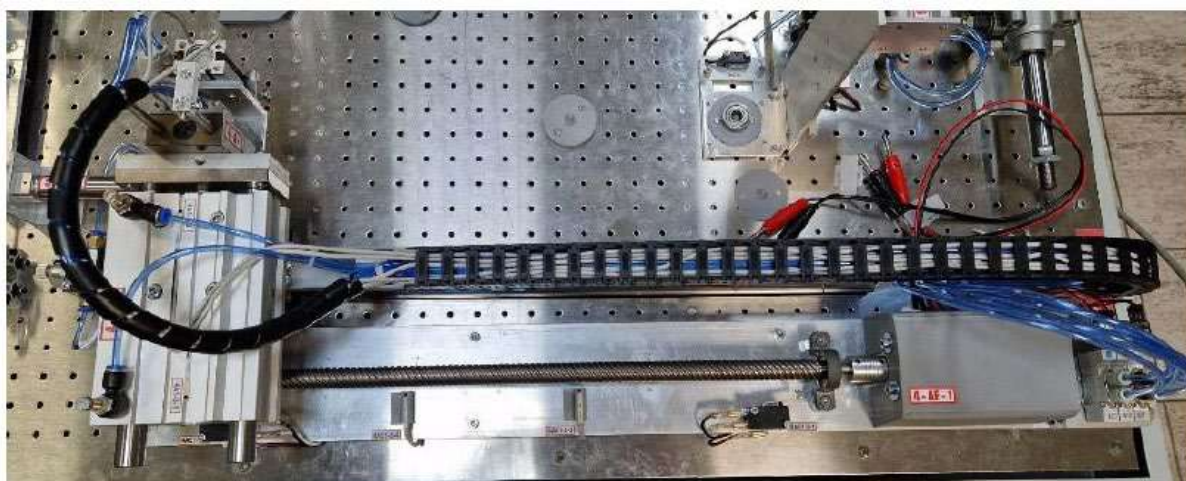
The entire block of electronics together with the motor is covered by the 3D printed lid and together with the pneumatic valves was placed on the base on which the entire linear electric movement unit is placed, Fig. 6.



*Fig. 6 Control electronic unit and valve unit.*

Source: photo created by the authors

The overall view of the rebuilt linear module (workplace 4) of the solved project is shown in Fig. 7.

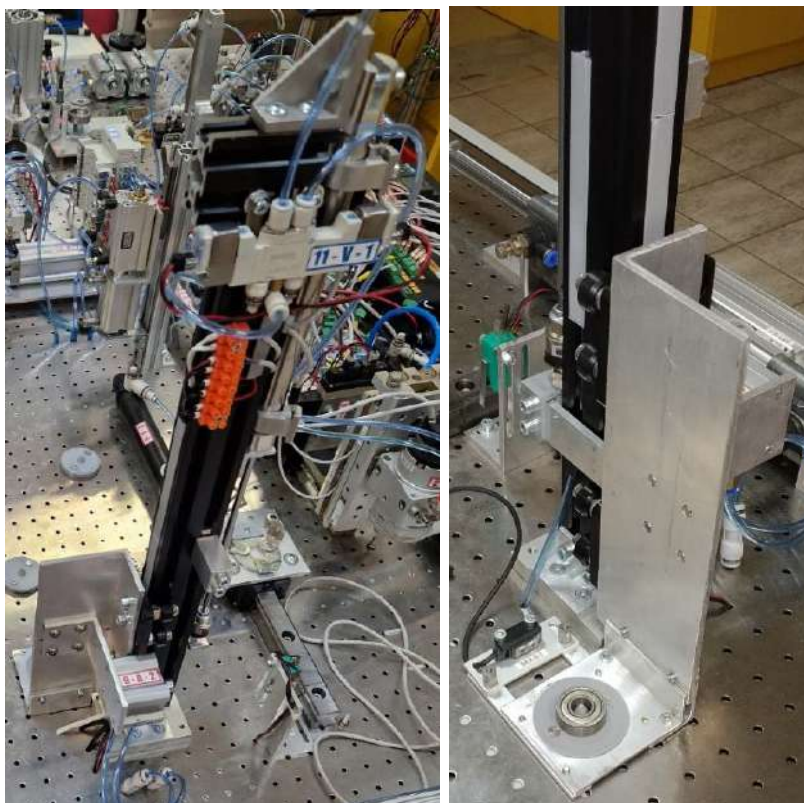


*Fig. 7. A view of the linear motion unit and the pneumatic superstructure of the mechanism with 3 DOF (degrees of freedom) [1]*

In order to be able to meaningfully manipulate the object for which we chose the 6082Z ball rolling bearing, it was necessary to establish a suitable handling cycle. In the first step, the

latter consisted of manually placing the object of manipulation on the platform of the lifting platform, which in its upper position awaits the entry of the object.

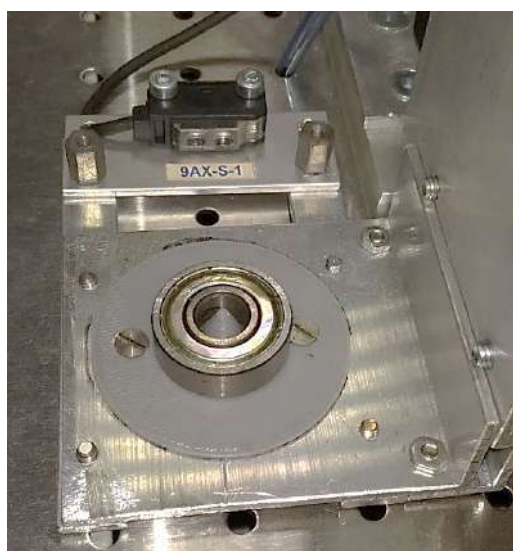
The lifting platform is part of an integrated mechanism (referred to as Workplace 9). It is made up exclusively of pneumatic drives and guides used in 3D printing technology (aluminium profile with V-groove), Fig. 8.



*Fig. 8 View of the lifting mechanism (Workplace 9).*

Source: photo created by the authors

The manipulation cycle starts with a short delay (provided by the program) after inserting the bearing on the 3D-printed pad with a centering cone, Fig. 9.



*Fig. 9 View of the lifting platform with pad and sensor.*

Source: photo created by the authors



Presence is indicated by the used photoelectric presence sensor 9AX-S-1 (EX-28B series photoelectric sensor by PANASONIC [2]). Once the presence is detected, the handling task cycle is started. The linear electric unit starts moving from the limit switch 4AE1-S-2 (Honeywell V15H22-CZ100A06) to the lifting platform until it reaches the position of the limit switch 4AE1-S-1. At the same time, the platform will move downwards (to the sensor marked 9A1-S-2. The lifting unit of the manipulator 4-A-2 by moving to the sensor 4A2-S-2 reaches the lower level necessary to grasp the object. Subsequently, the gripper 4-A-3, Fig. 10, grasps the object of manipulation and the unit 4-A-2 again moves to its upper position. The electric linear unit then travels with the grasped object successively to individual storage positions, where it alternately deposits and immediately removes the same object. after storing the object in the last storage position, the manipulator returns to the basic setting on the limit switch 4AE1-S-2.



*Fig. 10 A view of the grasping effector with 3D printed fingers (4-A-3 gripper).*

Source: photo created by the authors

The handling cycle can be changed almost arbitrarily by reconfiguring the storage places, but a new adjustment of the positions of the sensors of the electric linear module is necessary (there are two marked 4AE1-S-3, 4AE1-S-4 and they are reed magnetic D-A93 switches from SMC, see Fig. 7, [3]).

To illustrate the manipulation cycle, we also present the pneumatic connection diagram of the manipulator (Workplace 4), Fig. 11.

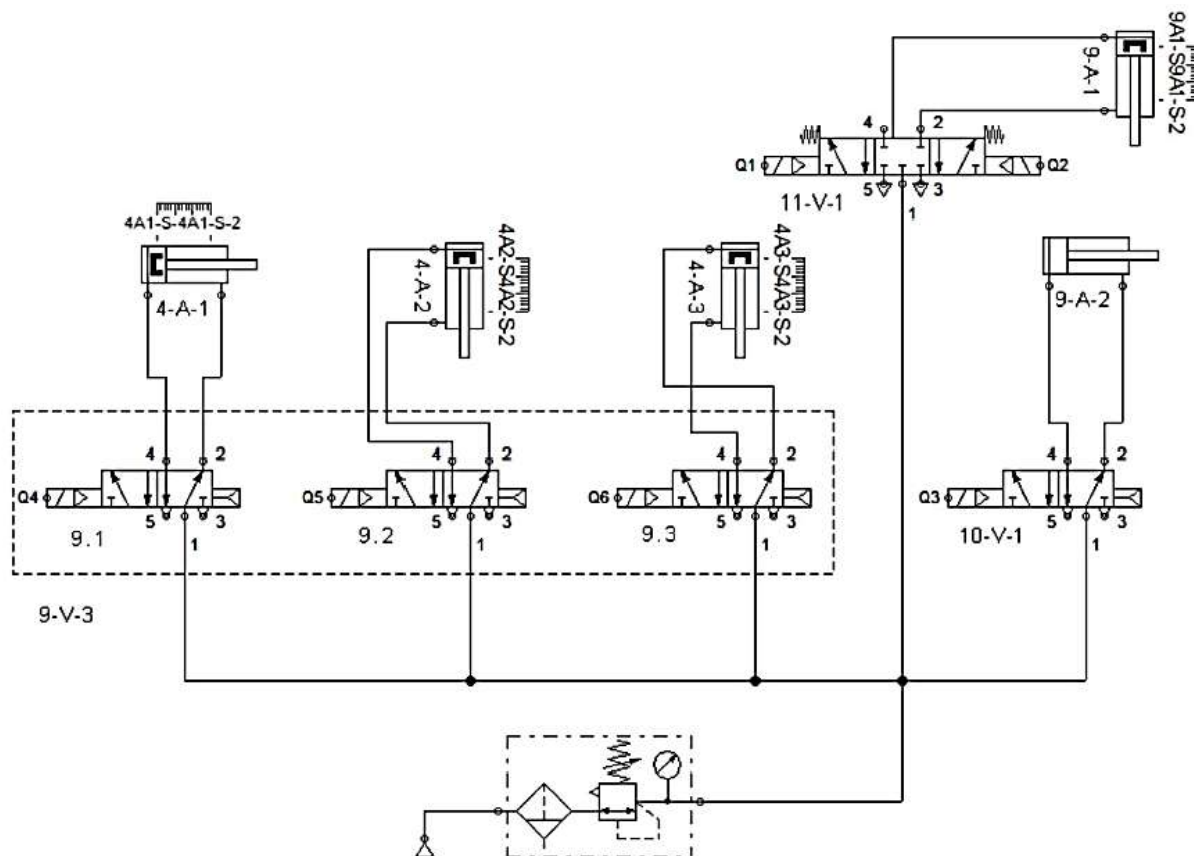


Fig. 11 Wiring diagram of the pneumatic part of the integrated workplace [1]

The whole modification fulfilled the expectations, although, as with any modification, it is possible to find many subjects for improvement. However, it is a laboratory training facility, therefore the identified shortcomings can be understood positively, as they give room for new ideas in the implementation of our students. Even from the mistakes of others, it is possible to gain new experience and discover new challenges for solving in yourself.

**Conclusions.**

The described procedure for rebuilding the existing grouping of automation components into a new form more accessible for use in laboratory conditions reflects our idea of how to initiate in students the finding of solutions in imperfect or inappropriately solved applications and thus better prepare them for practical application in industrial operations. If the students' interest in such a form of preparation persists, we will continue it (an example of which is the past semester, in which students solved the assigned task from the design of the solution to handing over the mechanism, including the demonstration of the manipulation task after it was revived and programmed via PLC).

**Acknowledgements**

*This research was supported by project KEGA: 020TUKÉ-4/2022 Development and implementation of new approaches in teaching industrial and collaborative robotics and project VEGA: 1/0215/23 Research and development of robotic workplaces equipped with industrial and collaborative robots.*

### References

1. Danilo, T. (2023). *Design of a workplace based on pneumatic and electric drives for laboratory use*: Bachelor's thesis. Košice: TU v Košiciach.
2. EX28B : Product specifications for this product. <https://industry.panasonic.eu/factory-automation/sensors-factory-automation/photoelectric-sensors/ex28b-ex28b>.
3. D-A90/A93/A96, Reed Switch, Direct Mounting, Grommet, In-line. <https://www.smc.eu/en-eu/products/d-a90-a93-a96-reed-switch-direct-mounting-grommet-in-line~75484~cfg>.
4. DC Gear Motor GA25-370 12V-188RPM. <https://lamptronics.com/product/dc-gear-motor-ga25-370-12v-188rpm/>.
5. Mamontov, P. (2018). *Design and realization of the stand for the teaching of pneumatic mechanisms* : thesis. Košice: TU v Košiciach.
6. 2 Phase Hybrid Stepper Motor 17GS series-size 42mm (1.8 degrees). <https://z3d9b7u8.stackpathcdn.com/pdf-down/1/7/H/17HS2408-MotionKing.pdf>.

Отримано 04.09.2023

UDC (07)621.7:621.8

**Петер Тулея<sup>1</sup>, Томаш Данило<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Доцент, доцент кафедри виробничих систем і робототехніки,  
Технічний університет Кошице, (Кошице, Словачія)

E-mail: [peter.tuleja@tuke.sk](mailto:peter.tuleja@tuke.sk), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6390-3109>

Scopus Author ID: [55570858300](https://orcid.org/0000-0001-6390-3109)

<sup>2</sup> Студент кафедри промислової автоматизації та мехатроніки,  
Технічний університет Кошице, (Кошице, Словачія)

E-mail: [tomas.danilo@student.tuke.sk](mailto:tomas.danilo@student.tuke.sk)

## РЕКОНСТРУКЦІЯ ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНОГО МЕХАНІЗМУ ЯК ЧАСТИНИ ЛАБОРАТОРНОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ ПОТРЕБ НАВЧАННЯ

У роботі розглядається впровадження реконструкції механізму, що входить до складу навчального середовища, призначеного для практичної підготовки студентів нашого факультету, для потреб реальної промисловості. Це навчальне середовище вже тривалий час служить освітнім і практичним робочим місцем, що дозволяє нашим студентам вдосконалюватися в набутті знань в області теоретичних і практичних навичок використання пневматичних і електропневматичних компонентів, а також в PLC програмування. Тут вони отримують практичний досвід у вигляді опису функцій і конструктивних рішень представлених компонентів з області пневматики, датчиків, електричних пристроїв безпеки, включаючи їх комбінації.

Запропонована реконструкція описаного механізму була реалізована як модернізація вже існуючого рішення, яке, на жаль, показало деякі неприємні недоліки в процесі експлуатації. У статті коротко представлено оригінальне рішення та хід реконструкції від проектування нового рішення до циклу обробки, а також порівнюються плюси та мінуси обох рішень.

Обидва описані рішення були створені як результати розв'язання студентських випускних робіт (дипломних чи бакалаврських) наших студентів (випускників).

Стаття має навчально-описовий характер.

**Ключові слова:** пневматика; навчальне робоче місце; електропневматика, програмування, ПЛК.

Рис.: 11. Бібл.: 6.

**Volodymyr Haievskiy<sup>1</sup>, Oleh Haievskiy<sup>2</sup>, Oleksandr Puzik<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Assistant of the Department of Welding, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [v.gaevskiy@kpi.ua](mailto:v.gaevskiy@kpi.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3888-3107>

ResearcherID: [AAK-3955-2020](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107). SCOPUS Author ID: [57221567034](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [ggoa@ukr.net](mailto:ggoa@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0769-5661>

ResearcherID: [AAK-3936-2020](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661). SCOPUS Author ID: [57221567160](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661)

<sup>3</sup>Applicant for Higher Education, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [ps640298@gmail.com](mailto:ps640298@gmail.com)

**STUDY OF THE VARIABILITY OF THE NUMBER OF PORES PER UNIT LENGTH OF THE WELD**

*The variability of the number of pores that appeared under the influence of additional introduction of the pore-forming material into the welding zone was analyzed. The Pearson test showed that Poisson's law adequately describes the variability of the number of pores in a unit area of the weld. At the same time, the experimental distribution is very close to the theoretical one calculated according to Poisson's law. The mathematical expectation of the number of pores in a unit area of the weld unambiguously determines the distribution of the number of pores. The form of the distribution depends significantly on the value of the mathematical expectation.*

**Keywords:** porosity of welds; porosity indicators; Poisson distribution; Pearson's test; mathematical expectation.

Table: 2. Fig.: 3. References: 8.

**Urgency of the research.** The presence of gas pores in the metal of the weld reduces the area of the metal of the welded joint in the cross-section, acts as a stress concentration factor, which can lead to the destruction of the welded product during operation. In the case of through-pores (gas channels), there is a possibility of loss of tightness of welded products. Ensuring the absence of pores is especially relevant for pressure vessels, welded products that are under the influence of dynamic loads.

The process of pore formation is quite complex and multifactorial. The formation of a pore in a weld involves the simultaneous presence of a seed in the weld pool and a supersaturated solution of hydrogen or nitrogen as a gas that saturates the pore. The appearance of a pore may be the result of a heterogeneous reaction with the formation of carbon monoxide. The weld pool usually contains a large number of potential pore nuclei. But not all embryos develop, because there is not enough gas in the place where the embryo is located. In addition, even if a gas bubble has formed in the metal of the welding bath, it can float to the surface and a pore will not form. The main efforts to prevent the appearance of pores are aimed at limiting the content of hydrogen and nitrogen in the metal of the weld pool and preventing the formation of carbon monoxide before the crystallization front of the metal of the weld pool. However, the complexity and multifactorial nature of the process of pore formation leads to the fact that their appearance has a pronounced statistical character [1]. Despite measures to prevent the formation of pores, they are a fairly common defect, the absence of which cannot be guaranteed [2]. Therefore, the study of statistical distributions that describe the variability in the formation of pores is an urgent task.

**Target setting.** Depending on the load conditions of the welded joint, modern standards limit the permissible diameter and number of pores per unit length of the weld [3]. Thus, the acceptability of each individual controlled section of the welded joint is determined by the diameter and number of pores found in this section. To determine the acceptability of the welding process, it is necessary to focus on the statistical characteristics of the variability of the diameter and the number of pores, which are characteristic of the process under study. At the same time,

the main characteristic is a statistical law (distribution), which adequately describes the variability of the controlled porosity indicator. In real welding conditions, pores do not occur frequently enough to combine pore data into representative volume samples. Therefore, statistical studies should be conducted in laboratory conditions with the additional introduction into the welding zone of materials that lead to the appearance of pores. The data obtained in this way must be statistically analyzed using the criteria of adequacy of statistical models. Data on the statistical regularities of variability of porosity indicators will allow us to draw conclusions about the propensity of welding processes to porosity on much smaller sample volumes under production conditions.

**Actual scientific researches and issues analysis.** According to the generally accepted classification in mathematical statistics, the main indicators of porosity, namely the pore diameter  $d$  and the number of pores  $x$  per unit area of the weld, are random values.

The possibility of applying statistical regularities to porosity indicators is largely determined by which statistical feature the indicator belongs to. The value of the pore diameter is determined by measurements using appropriate measuring equipment. The accuracy of measurements can be different and depends significantly on the method of measurements and the used measuring equipment. Therefore, the pore diameter is considered a continuous feature. The variability of an indicator attributed to a continuous feature can be described by a uniform distribution, a normal distribution, and a Weibull distribution. A uniform distribution adequately describes variability for relatively simple objects with a well-known complete event space, which is characteristic of game theory and is practically not encountered in industrial situations. The normal distribution is the most common distribution for controlled production, process, and product indicators. However, the normal distribution better describes the variability of indicators that are purposefully and actively formed by production processes [4]. The appearance of a pore is a random, undesirable phenomenon, so its diameter is purposefully approached to zero, which leads to the deviation of the distribution of diameter values from the symmetrical form corresponding to the Weibull distribution [5]. There are three-parametric and two-parametric Weibull distributions. According to published research results [6, 7], the variability of the pore diameter is described by a two-parametric Weibull distribution

$$f(d_*, a_d, b_d) = \frac{b_d}{a_d} \left( \frac{d_*}{a_d} \right)^{b_d - 1} \times e^{-\left( \frac{d_*}{a_d} \right)^{b_d}} \quad (1)$$

where  $d_*$  – is the value of the pore diameter, mm;

$a_d$  – scale parameter (size) of the Weibull distribution of pore diameter, mm;

$b_d$  – shape parameter of the Weibull distribution of pore diameter, dimensionless.

Characteristic ranges of values of parameters of the Weibull distribution of pore diameters in weld metal during submerged arc welding -  $a_d = 1,2 \div 2,6$  mm;  $b_d = 1,0 \div 1,6$ .

The number of pores in a unit area of a weld seam is determined by the registration method and refers to an ordinal feature as the number of events registered per unit [8]. The variability of an indicator assigned to an ordinal characteristic is often described by the Poisson distribution. However, it is necessary to determine the possibility and adequacy of applying this distribution precisely to the variability of the number of pores per unit length of the weld.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Recent studies have shown the adequacy of the application of the Weibull distribution to the variability of the pore diameter. Determining the distribution that adequately describes the variability of the number of pores per unit length of the weld requires specialized laboratory research.

The **research objective** is the definition of a statistical distribution that adequately describes the variability of the number of pores per unit length of the weld.

The **statement of basic materials.** To provoke pores, surfacing was performed on a plate with grooves into which two polyolefin tubes with a diameter of 0.8 mm filled with distilled water were inserted (Fig. 1).

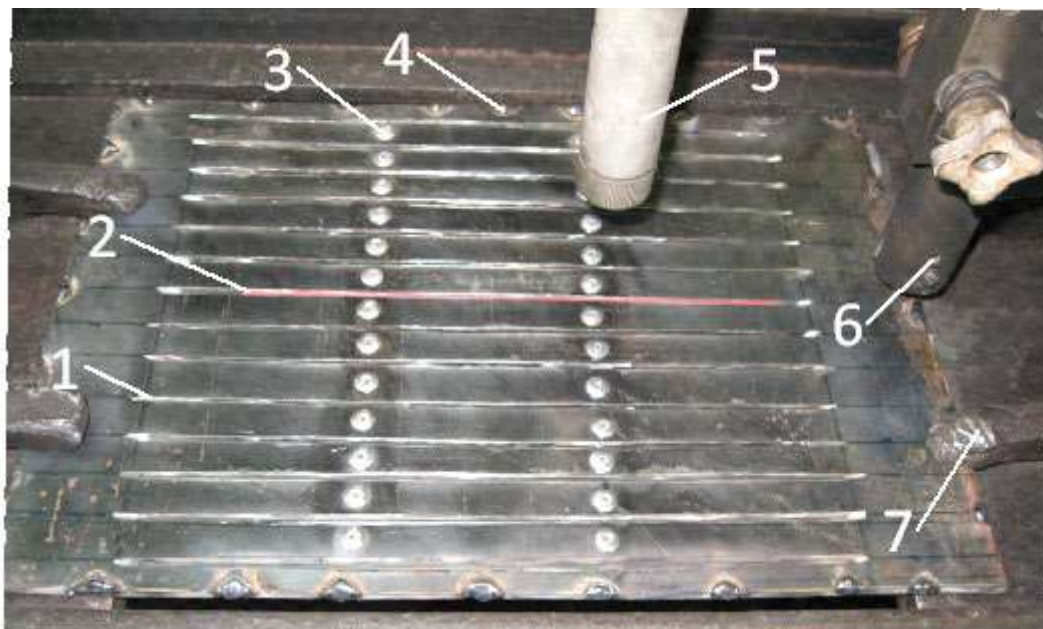


Fig. 1. Laying of polyolefin tubes with a pore-forming liquid:  
 1 – groove; 2 - polyolefin tube with a pore-forming liquid; 3 – rivet; 4 – tack;  
 5 – joint monitoring system; 6 – mouthpiece; 7 - clamp

The source: authors have developed

In the 0214 series of experiments, four rollers with a length of 280 mm each were welded. 35 mm remained on the roller at the beginning and at the end for igniting the arc and welding the crater. The length of each polyolefin tube with water was 210 mm. Thus, the total length of the welded roller, which was under the influence of the water introduced into the tube, was 210 mm. This length was divided into seven single sections of 30 mm in length. Thus, in the series, experimental data were obtained regarding the porosity of the deposited rolls on 28 single sections, deposited under the same conditions with the introduction of distilled water in two polyolefin tubes with a diameter of 0.8 mm. The surface pores detected by visual inspection were recorded in the table. 1. In the same table, the data for checking the adequacy of the application of Poisson's law for the analysis of the obtained experimental data are given.

Table 1 – Application of Poisson's law for the analysis of experimental data

<i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>x<sub>i</sub></i>	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>k<sub>i</sub></i>	1	2	2	3	4	3	3	3	2	2	1	1	1
<i>k<sub>i</sub>/K</i>	0,036	0,071	0,071	0,107	0,143	0,107	0,107	0,107	0,071	0,071	0,036	0,036	0,036
<i>g(x<sub>i</sub>, μ)</i>	0,041	0,060	0,080	0,097	0,107	0,110	0,104	0,092	0,077	0,060	0,044	0,031	0,020
<i>K</i>	28												
<i>μ=x<sub>cep</sub></i>	13,29												
<i>χ<sub>k</sub><sup>2</sup></i>	1,454												

The source: authors have developed

According to the table 1, the number of pores per unit area of the weld varied from 8 to 20. Thus,  $x_i$  took one of 13 values, and the number of ranges in which pores were recorded was  $f=13$ . According to the number of pores per unit area of the weld, the system had  $r = 13-1 =12$  degrees of freedom.

What is the proportion of unit sites that have a pore count  $x_*$  or what is the probability that the pore count is equal to a given value  $x_*$ ? The answer to this question is given by the unit probability of the Poisson distribution for a given value of the number of pores  $x_*$ :

$$g(x_*, \mu) = \frac{\mu^{x_*}}{x_*!} \times e^{-\mu}, \tag{2}$$

where  $\mu$  - is the mathematical expectation of the number of pores per unit area of the weld, as a parameter of Poisson's law.

The only parameter of the Poisson distribution of the number of pores per unit area of the weld is  $\mu$  - the mathematical expectation of the number of pores, found as the arithmetic mean of the number of pores per unit area of the weld in a series of  $K$  experiments:

$$x_{cep} = \frac{\sum_{i=1}^K x_i}{K} . \tag{3}$$

According to the table 1 mathematical expectation of the number of pores per unit area of the weld, found as the arithmetic mean number of pores per unit length of the weld is 13.29 pores/30 mm length. In fig. 2. A bar chart of the comparison of the experimentally obtained and calculated values of Poisson's law for the probability of obtaining a given number of pores on a unit area of the deposited metal is given.

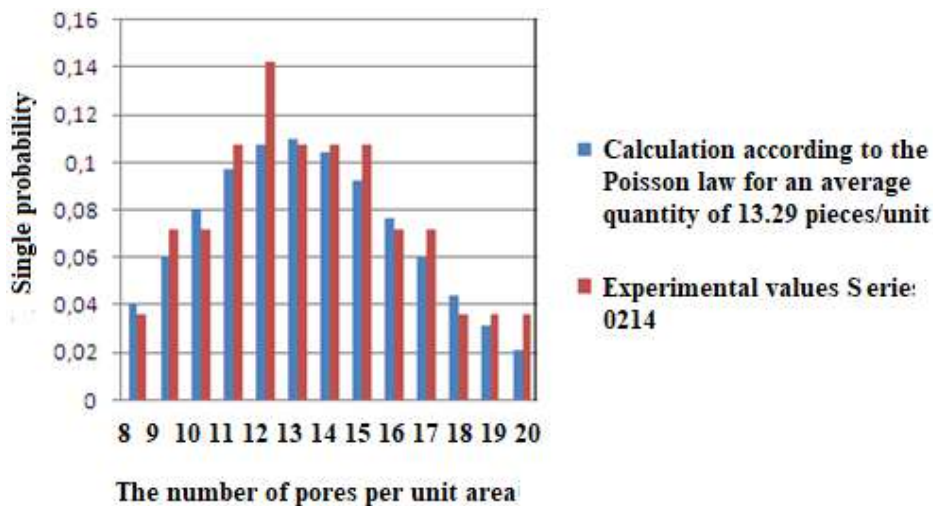


Fig. 2. Comparison of experimental data with the results of the calculation of the statistical distribution of the number of pores on a unit area of the weld

The source: authors have developed

As can be seen from fig. 2, the deviation of the experimental data from the calculated data is relatively small.

To check the adequacy of the Poisson's law model of the distribution of the number of pores on a unit area of the weld with experimental data, the Pearson agreement criterion ( $\chi^2$  criterion) can be used. Calculation of the Pearson agreement criterion for the Poisson distribution:

$$\chi_k^2 = K \sum_i \frac{\left( \frac{k_i}{K} - g(x_i, \mu) \right)^2}{g(x_i, \mu)}, \tag{4}$$

where  $K$  - is the number of sites where pores were recorded;

$x_i$  - the number of pores registered on the  $i$  unit section of the weld;

$k_i$  – the number of sites on which  $x_i$  pores are registered, units;

$g(x_i, \mu)$  – calculated by the Poisson distribution (2), the probability that with an average number of pores  $\mu$ ,  $x_i$  pores will be registered in a unit area.

For 12 degrees of freedom at  $\alpha = 0.5$ , which corresponds to the maximum possible consistency of the data obtained experimentally with the results of calculation according to Poisson's law, the maximum permissible value is  $\chi_{k_{max}}^2 = 11.340$ . The actually obtained value of the Pearson criterion  $\chi_k^2 = 1.454$  (Table 1) is significantly less than the maximum permissible value.

Thus, Poisson's law adequately describes the experimentally obtained statistical distribution of the number of pores on a unit area and can be used for practical problems.

However, it is important to understand and take into account that the average value of the number of pores found in a series on a unit weld area is only an estimated value and the next series of experiments conducted under the same conditions may give a different value of the average number of pores. Taking this into account, the estimated value of the average number of pores found in the sample should be supplemented by the value of the width of the interval in which the average number of pores can be with a 95% probability (width of the 95% confidence interval), which is calculated:

$$\Delta_{(x)0,95} = 1,960 \times \frac{\sigma_x}{\sqrt{K}}, \tag{5}$$

where  $\sigma_x$  - the mean square deviation of the number of pores per unit area of the weld in a series of experiments;

$K$  - the total number of single sections of the weld where pores were found, thing.

The root-mean-square deviation of the number of pores per unit area of the weld seam can be calculated as the standard deviation from  $x_{cep}$  - the average number of pores per unit area of the weld seam, found from a sample of volume  $K$ :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (x_{cep} - x_i)^2}{(K - 1)}}. \tag{6}$$

According to the 0214 series according to the data in the table. 1, the average number per unit area of the weld seam and the corresponding width of the 95% confidence interval are calculated. The results of the calculations for the considered example are given in the table. 2.

Table 2 – The average number of pores per unit area of the weld and the width of the 95% confidence interval (series 0214)

$x_{cep}$ , mm	$K$ , thing	$\sigma_x$ , mm	$\Delta_{(x)0,95}$ , mm
13,29	28	3,287	1,218

The source: authors have developed

According to the table 2, it can be concluded that in the considered series of experiments 0214, the average number of pores per unit area of the weld is  $13.29 \pm 1.218$ . That is, according to the available experimental data formed into a sample of 28 unit areas, the estimated value of the average number of pores per unit area  $x_{cep} = 13.29 \pm 1.218$  pores per 30 mm of weld. The



actual value of the average number of pores per unit area with a probability of 95% is in the range of 14.508 to 12.072 pores per 30 mm of weld.

The form of the Poisson distribution of the number of pores in a unit area of the weld depends significantly on the value of the average number of pores. An increase in the values of the average number of pores per unit area of the weld shifts the peak of the distribution towards larger values and contributes to the symmetry of the distribution (Fig. 3). Without taking into account the actual values of the parameters of the distribution of the number of pores per unit length of the seam, it is impossible to predict the values.

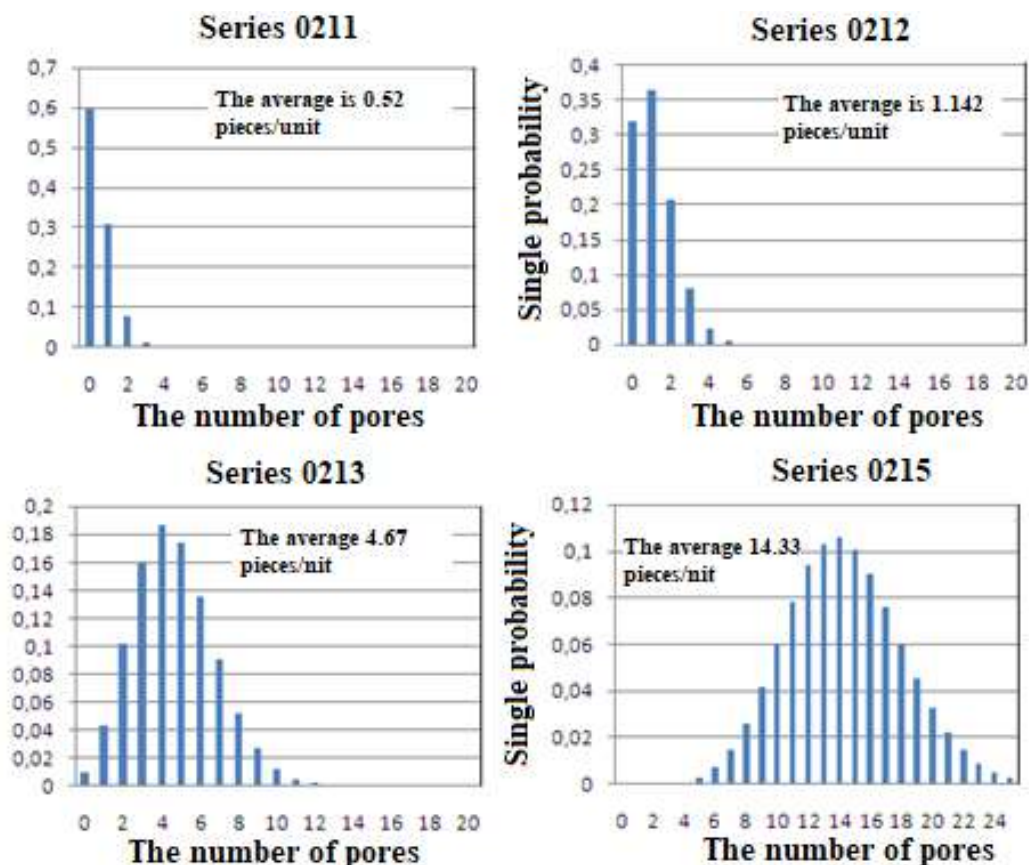


Fig. 3. Single probability of the number of pores on a unit area of the weld  $x^*$

The source: authors have developed

The 0211-0215 series differ in the number of polyolefin tubes introduced into the welding zone, and, accordingly, in the average number of pores per unit area of the weld.

The demonstrated adequacy of the application of Poisson's law to the variability of the number of pores on a unit area of the deposited roll (weld) makes it possible to predict the probability of meeting the requirements for the porosity of the weld metal.

**Conclusions.** The statistical distribution is defined that adequately describes the variability of the number of pores per unit length of the weld. Using the Pearson test, it is shown that the actual value of  $\chi^2 = 1.454$  obtained by applying Poisson's law is significantly less than the maximum allowable  $\chi^2^{max} = 11.340$ . This indicates the adequacy of the application of Poisson's law to the variability of the number of pores per unit length of the weld.

The main parameter of the Poisson distribution necessary for its application to the analysis of the variability of the number of pores per unit length of the weld is the mathematical expectation of the number of pores  $\mu$ , found as the arithmetic mean of the number of pores per unit area of the weld in a series of  $K$  experiments. In further calculations, one should focus on the

confidence interval for the value of the mathematical expectation of the number of pores per unit length of the weld.

The obtained results make it possible to take into account the characteristics of the statistical distribution of the number of pores per unit length of the weld when predicting the possibility of meeting the requirements for the porosity of the weld. Can be used in assessing the acceptability of welding technology, predicting quality costs associated with weld porosity.

A possible direction of further research is the definition of statistical models that adequately describe the variability of slag inclusions in welded joints.

### Literature

1. Otsuka, H. Quality assurance of welded steel of Tokyo sky tree / H. Otsuka, Y. Minoda, K. Nagayama // *Journal of the Japan Welding Society*. – 2013. – № 82(4), – P. 252-257. DOI: <https://doi.org/10.2207/jjws.82.252>
2. Gaievskiy, V. Limitation of risks of non-compliance of weld metal porosity / V. Gaievskiy, V. Prokhorenko, M. Ziberov // *Graduazgo em Engenharia Mecanica*. – 2014. – Vol. 1. – P. 4-7.
3. ISO 5817:2023 Welding — Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) — Quality levels for imperfections [Electronic resource]. – Geneva : International Organization for Standardization, 2023. – 26 p. – Access mode : <https://www.iso.org/standard/80209.html>
4. Weld defect frequency, size statistics and probabilistic models for ship structures / P. Amirafshari, N. Barltrop, M. Wright, A. Kolios // *International Journal of Fatigue*. – 2021. – Vol. 145. – P. 106069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106069>
5. Гаєвський, В. О. Застосування ймовірнісної сітки для визначення параметрів вейбулівського розподілу діаметру пор / В. О. Гаєвський, О. А. Гаєвський, К. О. Зворикін // *Іноваційні технології та інжиніринг у зварюванні PolyWeld–2019 : зб. доп. Міжнар. конф.* – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 35-36.
6. Гаєвський, В. О. Визначення параметрів Вейбулівського розподілу діаметру пор [Electronic resource] / В. О. Гаєвський, О. А. Гаєвський, К. О. Зворикін // *Technological Systems*. – 2019. – № 1(86). – С. 75-80. – Access mode : <http://technological-systems.com/index.php/Home/article/view/703/735>
7. Amirafshari, P. Estimation of weld defects size distributions, rates and probability of detections in fabrication yards using a Bayesian theorem approach / P. Amirafshari, A. Kolios // *International Journal of Fatigue*. – 2022. – Vol. 159. – P. 106763. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106763>
8. Ling, M. Weld Quality Assessment and Control in Steel Structure Fabrication [Electronic resource] / M. Ling // *Journal of Steel Structures and Constructions*. – 2023. – Vol. 9:1. – P. 1-2. – Access mode : <https://www.hilarispublisher.com/open-access/weld-quality-assessment-and-control-in-steel-structure-fabrication.pdf>

### References

1. Otsuka, H., Minoda, Y., Nagayama, K. (2013). Quality assurance of welded steel of Tokyo sky tree. *Journal of the Japan Welding Society*, 82(4), 252-257. doi: <https://doi.org/10.2207/jjws.82.252>
2. Gaievskiy, V., Prokhorenko, V., Ziberov, M. (2014). Limitation of risks of non-compliance of weld metal porosity. *Graduazgo em Engenharia Mecanica*, 1, 4-7.
3. International Organization for Standardization. (2023). Welding — Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) — Quality levels for imperfections (ISO 5817:2023). <https://www.iso.org/standard/80209.html>
4. Amirafshari, P., Barltrop, N., Wright, M., Kolios, A. (2021). Weld defect frequency, size statistics and probabilistic models for ship structures. *International Journal of Fatigue*, 145, 106069. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106069>
5. Haievskiy, V.O., Haievskiy, O.A., Zvorykin, K.O. (2019). The use of a probability grid for determining the parameters of the Weibull diameter distribution. *PolyWeld–2019: Proceedings of the international conference "Innovative technologies and engineering in welding*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2019. P. 35-36.

6. Haievskiy, V.O., Haievskiy, O.A., Zvorykin, K.O. (2019). Determination of the parameters of the Weibull diameter distribution. *Technological Systems*, 1(86), 75-80. <http://technological-systems.com/index.php/Home/article/view/703/735>

7. Amirafshari, P., Kolios, A. (2022). Estimation of weld defects size distributions, rates and probability of detections in fabrication yards using a Bayesian theorem approach. *International Journal of Fatigue*, 159, 106763. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106763>

8. Ling, M. (2023). Weld Quality Assessment and Control in Steel Structure Fabrication. *Journal of Steel Structures and Constructions*, 9:1, 1-2. <https://www.hilarispublisher.com/open-access/weld-quality-assessment-and-control-in-steel-structure-fabrication.pdf>

Отримано 09.09.2023

УДК 621.791.019

**Володимир Гаєвський<sup>1</sup>, Олег Гаєвський<sup>2</sup>, Олександр Пузик<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, асистент кафедри зварювального виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [v.gaevskiy@kpi.ua](mailto:v.gaevskiy@kpi.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3888-3107>

ResearcherID: [AAK-3955-2020](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107). SCOPUS Author ID: [57221567034](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [ggoa@ukr.net](mailto:ggoa@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0769-5661>

ResearcherID: [AAK-3936-2020](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661). SCOPUS Author ID: [57221567160](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661)

<sup>3</sup>здобувач вищої освіти, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [ps640298@gmail.com](mailto:ps640298@gmail.com)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНЮВАНOSTІ КІЛЬКОСТІ ПОР НА ОДИНИЦЮ ДОВЖИНИ ЗВАРНОГО ШВА

Поява пор у металі зварного шва має ймовірнісний характер і може приводити до негативних наслідків. Ці наслідки пов'язані з втратою виробами функцій та загрозою для життя і здоров'я людей. Тому дослідження змінюваності пористості зварних швів є актуальною задачею для прикладної механіки, зварювального виробництва.

В реальних умовах зварювання ускладнене формування вибірок даних з достатнім для статистичного аналізу об'ємом. Тому необхідна постановка спеціалізованого експерименту з введенням у зону зварювання матеріалу, який викликає появу пор і подальшим статистичним аналізом даних про пористість зварних швів. Визначення статистичних закономірностей змінюваності пористості дозволить прогнозувати значення показники пористості з врахуванням їх варіативності.

Вимоги до пористості зварних швів задаються по двох показниках – діаметру та кількості пор на одиничній довжині зварного шва. Діаметр пор відноситься до безперервної ознаки, а кількість пор на одиничній довжині зварного шва до порядкової статичної ознаки. Аналіз опублікованих досліджень показує, що змінюваність діаметру пор адекватно описується двома параметричним розподілом Вейбулла. Визначення розподілу, який адекватно описує змінюваність кількості пор на одиничній довжині зварного шва потребує спеціалізованих лабораторних досліджень.

Метою статті є визначення статистичного розподілу, який адекватно описує змінюваність кількості пор на одиничній довжині зварного шва. Для досягнення мети належить статично проаналізувати дані щодо змінюваності кількості пор при додатковому введенні у зону зварювання матеріалу, який сприяє утворенню пор.

Для сприяння утворенню пор у зону зварювання вводили поліолефінові трубки діаметром 0,8 мм, заповнені дистильованою водою. З використанням ступінчатої діаграми візуально порівнювали експериментально отриманий розподіл кількості пор і теоретично розрахований по закону Пуассона. Адекватність застосування закону Пуассона до змінюваності кількості пор на одиничній довжині зварного шва оцінювалась за критерієм Пірсона.

Фактично отримане, при застосуванні закону Пуассона, значення критерію Пірсона  $\chi^2 = 1,454$  значно менше ніж максимально допустиме  $\chi^2_{max} = 11,340$ . Це свідчить про адекватність застосування закону Пуассона до змінюваності кількості пор на одиницю довжини зварного шва. Отримані результати дають можливість враховувати характеристики статистичного розподілу кількості пор на одиницю довжини зварного шва при прогнозуванні можливості виконання вимог щодо пористості зварного шва. Вони можуть бути використані при оцінюванні прийнятності технології зварювання, прогнозуванні витрат на якість, які пов'язані з пористістю зварного шва.

**Ключові слова:** пористість зварних швів; показники пористості; розподіл Пуассона; критерій Пірсона; математичне очікування.

Табл.: 2. Рис.: 3. Бібл.: 8.

**Dávid Kovaľuk<sup>1</sup>, Ján Semjon<sup>2</sup>, Matúš Sabol<sup>3</sup>, Dárius Rusiňák<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D student of the Department of Production Systems and Robotics, Technical University of Košice (Košice, Slovakia)

E-mail: [david.kovaluk@student.tuke.sk](mailto:david.kovaluk@student.tuke.sk)

<sup>2</sup>Associate Professor, Associate Professor of the Department of production systems and robotics, Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)

E-mail: [jan.semjon@tuke.sk](mailto:jan.semjon@tuke.sk). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9076-7808>

ResearcherID: AAH-6272-2019. Scopus Author ID: [55571411200](https://orcid.org/0000-0002-9076-7808)

<sup>3</sup>Ph.D student of the Department of production systems and robotics, Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)

E-mail: [matus.sabol@student.tuke.sk](mailto:matus.sabol@student.tuke.sk)

<sup>4</sup>Bachelor student of the Department of Industrial Automation and Mechatronics, Technical University of Košice (Košice, Slovakia)

E-mail: [darius.rusinak@student.tuke.sk](mailto:darius.rusinak@student.tuke.sk)

## DESIGN OF A TRAINING WORKPLACE WITH A COLLABORATIVE AND INDUSTRIAL ROBOT

*The article deals with the design of a training workplace equipped with two robots, one of which is industrial and the other collaborative. The assembly of a gearbox model equipped with three different shafts is carried out at the training robotic workplace. The entire assembly process requires the mutual cooperation of an industrial, collaborative robot and a human operator. Use the assembly parts to create a large number of combinations, so that a number of individual tasks can be created at the workplace. The safety of workers at the workplace is solved by the use of safety laser scanners, so that there is no danger to people.*

**Keywords:** Industrial robot; collaborative robot; training workplace; cooperation.

*Fig.:*7. *Tables.:*0. *References:*11.

**Relevance of the research.** In the 1990s, the US Occupational Safety and Health Administration began looking at how the manufacturing industry was addressing ergonomic issues in manufacturing plants. These problems occurred to a large extent in the automotive industry, especially in the field of final assembly. This type of work process consisted of actions such as the transfer and installation of car batteries weighing 20 kilograms, which had a negative impact on the health of workers during long-term performance of this work activity. General Motors, as a leading company in the automotive industry, decided to analyze this problem and, together with the University of California, began to work on its solution [1]. In 1999, the first definition of a collaborative robot was registered at the US Patent Office. This was IAD, which is considered to be the forerunner of modern collaborative robots. This device could work outside the protective cage and assist workers in the performance of assembly operations, but it did not contain a source of motion force from the safety robots [2].

**Problem statement.** In 2004, KUKA, a German robot manufacturer, introduced a self-powered collaborative robot called LBR 3. This robot was the result of a long-term collaboration between KUKA and the German Aerospace Center DLR. In the following years, KUKA further improved this technology, resulting in the collaborative robots LBR 4 introduced in 2008, LBR 4+ introduced in 2010 and LBR iiwa, introduced in 2013 [3]. In 2008, Universal Robots, a Danish robot manufacturer, introduced a collaborative robot that could perform its work alongside human workers without the need for a protective cage called the UR5. This robot helped usher in the era of flexible, user-friendly and affordable collaborative robots [4]. ABB, a Swedish-Swiss robot manufacturer, launched the world's first two-armed collaborative robot called YuMi in 2015. This robot enables safe cooperation between a human worker and a robot, for example in the assembly of small parts [5].

**Analysis of recent research and publications.** Collaborative robotics can be seen as a progressive stage in the development of industrial robotics. This new stage in the development of industrial robotics assumes that people will cooperate with robots and that this cooperation will be

safe for them. For this reason, collaborative robots are equipped with a wide range of sensors and vision systems. For example, if a person were to enter the working zone of a collaborative robot, this robot is able to change its behavior algorithm so as not to harm this person [1,2].

**Uninvestigated parts of a common problem.** The concept of the development of human-robot interaction is reflected in the concept of the fourth industrial revolution. The essence of the Industry 4.0 concept is that an industrial robot can serve as a cooperative and working tool in production. The main element of this concept is artificial intelligence based on the Internet of Things. In a simplified concept, IoT is a network of physical objects that communicate with each other via the Internet. Collaborative robotics and other innovations are modifying business models in modern industry, while the very integration of robots contributes to the computerization and automation of production and the introduction of the concept of intelligent production [6]. Collaborative robots perform a similar range of work activities to conventional industrial robots, but are typically lighter and smaller in size. The collaborative robot has integrated force control and sensors, thanks to which it automatically slows down or stops its activity when a person approaches it. This allows them to work in close proximity to people with minimal or no safety precautions. They have a multi-axis construction of the manipulator, which allows these robots to be deployed to perform various work tasks [7]. ISO/TS 15066:2016, "Safety of collaborative robots", provides information on how to implement a collaborative robot application to ensure worker safety [8].

**Research objective.** The goal of the design of the training workplace is to create a workplace where there would be cooperation between a person, a collaborative robot and an industrial robot. We decided to demonstrate this collaboration by having a human and a collaborative robot participate in the assembly operation, and the industrial robot then wraps the final gearbox assembly.

**The statement of basic materials.** The assembly operation consists of assembling a simplified model of the gearbox, which consists of shaft 1 (A), shaft 2 (B), shaft 3 (C), the lower part of the gearbox (E) and the upper part of the gearbox (F). The packing operation consists of transferring the finished model to the box (D). In fig. 1 shows shaft 1 (A), the largest diameter of which is 80 mm. Shaft 2 (B) has a largest diameter of 70 mm and shaft 3 (C) has a largest diameter of 60 mm. The other dimensions of the shafts are identical. The individual shafts in the starting position are located on pedestals with an opening for storing the shaft, which are attached to the work table. The components that make up the gearbox model, as well as the pedestals for storing the shafts, are made of PLA plastic, so it would be possible to use 3D printing for their physical realization.

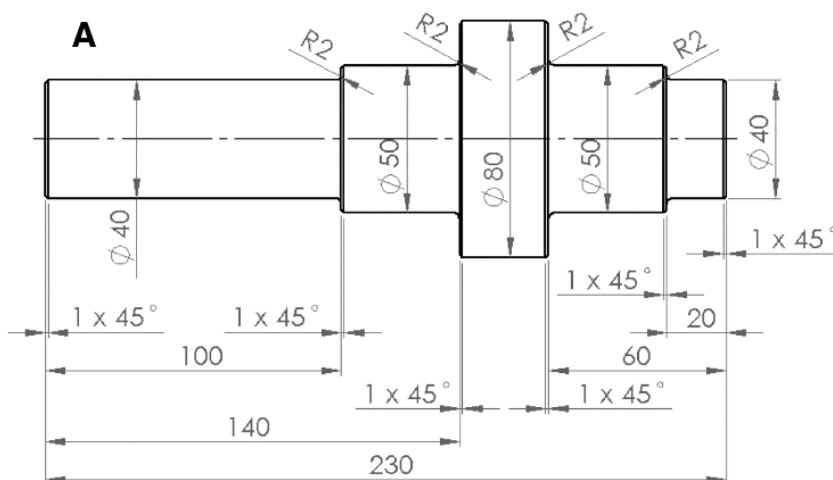


Fig. 2 Shaft dimensions (A)

The dimensions and face of the lower and upper part (body) of the gearbox are shown in fig. 2. The mentioned parts contain a system of three storage places with a diameter of 40 mm, in which it is possible to store any of the mentioned shafts (A, B, C) in any place.

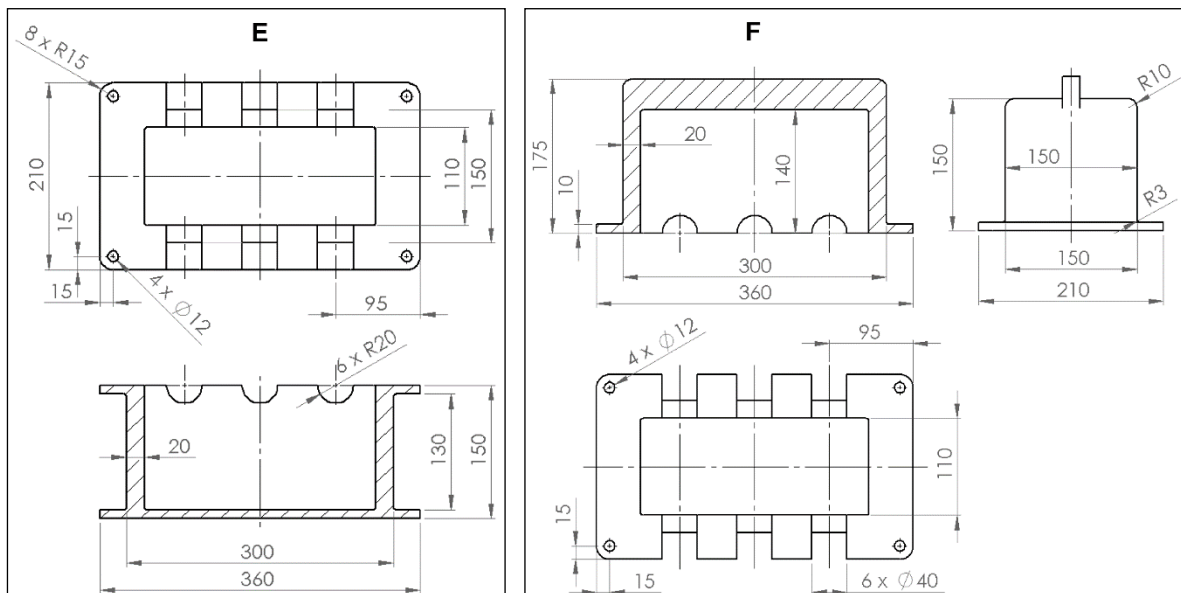


Fig. 2 Dimensions of the lower (E) and upper (F) part of the gearbox

The components that make up the gearbox model, as well as the box, are placed on the tables, while their positions relative to the tables are precisely given. In fig. 3 shows a view of the floor plan of the workplace with the corresponding dimensions of the location of the manipulated objects.

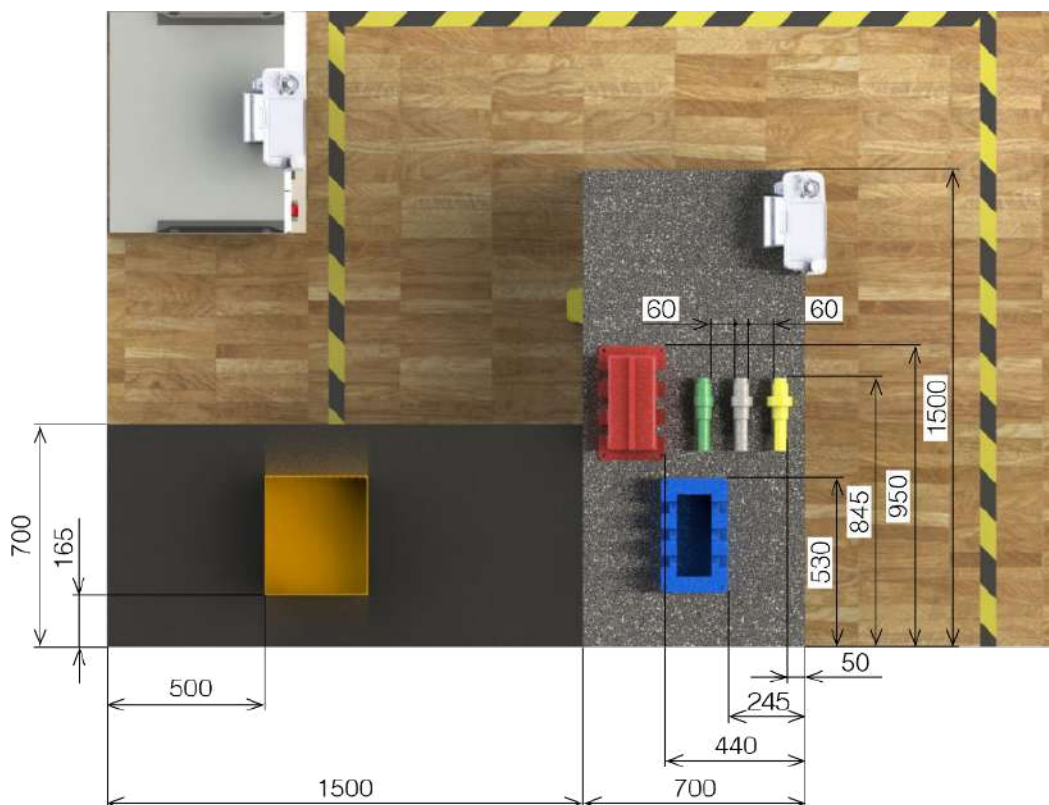


Fig. 3 The dimensions of the tables and the location of the manipulated parts

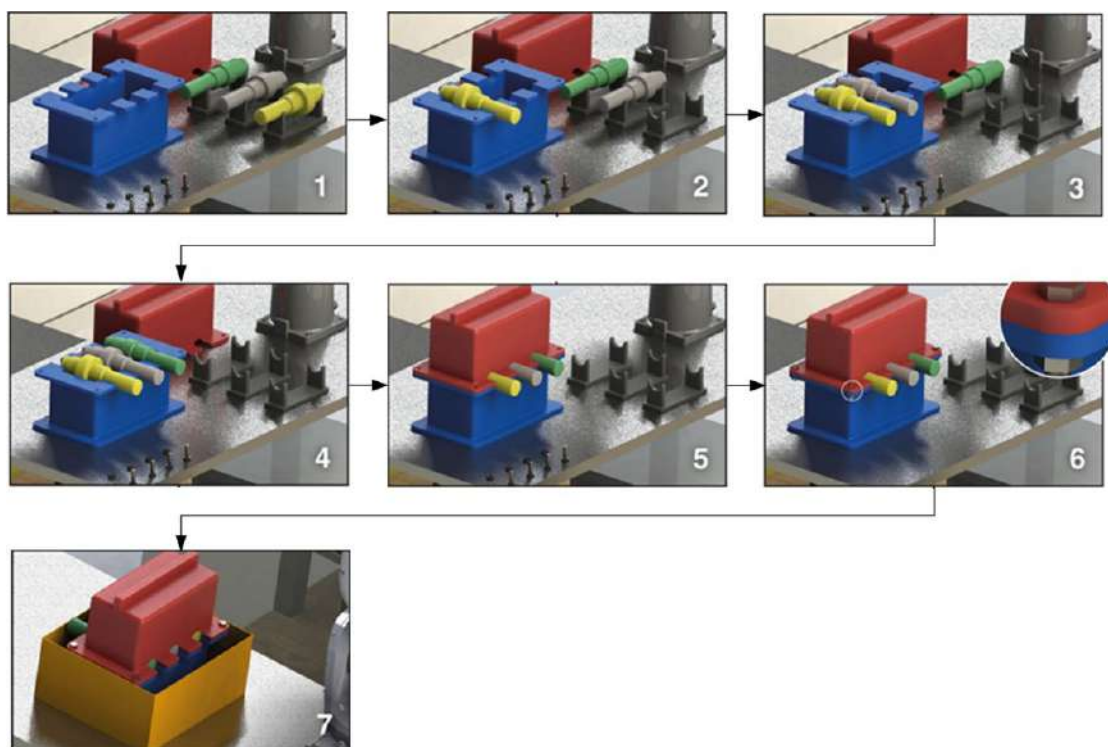
The industrial robot IRB 1200 and the collaborative robot GoFa CRB 15000 [9, 10] were chosen to perform selected operations. Both robots are manufactured by ABB, thanks to which it would be possible to simulate the workplace in the ABB Robot Studio program. To handle the components, both robots are equipped with an RG6 gripper from OnRobot, which has a finger span of 160 mm and a load capacity of 10 kg. The robots are installed on tables with the dimensions length: 1500 mm, width: 700 mm and height: 780 mm, these tables are also used to perform work operations. The visualization of the proposed educational workplace in a 3D environment is shown in fig. 4.



*Fig. 4 A 3D view of the proposed educational workplace*

The individual steps of the sequence of work operations are as follows, fig. 5:

- In the first step, one places the individual components in their starting positions.
- In the second to fourth steps, individual shafts are grasped, moved and placed in the holes in the lower part of the gearbox by a collaborative robot.
- In the fifth step, the collaborative robot grabs, moves and places the upper part of the gearbox on the lower part of the gearbox.
- In the sixth step, a person creates bolted connections between the upper and lower parts of the gearbox using bolts and nuts.
- In the seventh step, the resulting assembly is grabbed, moved and stored in the box by an industrial robot.



*Fig. 5. Sequence of work operations*

We ensured the safety of the robotic educational workplace with the help of three laser scanners [11]. These scanners are placed under the table and create protective zones around the workplace, fig. 6. The surroundings of the workplace are also visually delimited by safety tape.

After a person enters protective zone 1, the activity of the collaborative robot slows down and the activity of the industrial robot stops, in this zone there is interaction between the person and the collaborative robot. After a person enters protective zone 2, the activity of the industrial and collaborative robot will stop, in this zone interaction between the person and the robot is not possible.



*Fig. 6. Protection zones of the training workplace*



The workplace is designed in such a way that each student can be assigned a unique assignment. This is ensured by the fact that the individual shafts can be stored in the holes in the lower part of the gearbox in six different combinations, and at the same time there are two different storage positions for each shaft, creating a total of forty-eight variations in the way the task is performed. Variations of shaft placement based on possible mutual orientations are shown in fig. 7.

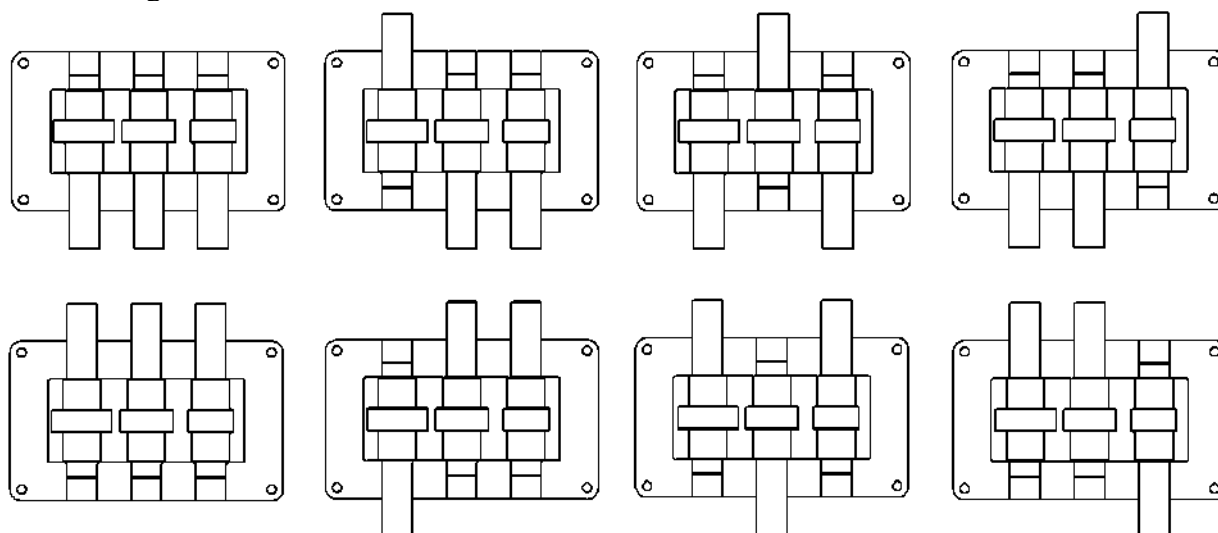


Fig. 7. Variation of shaft placement based on orientation

The program for the collaborative robot can be made to grasp shafts of any diameter, but only grasping the  $\varnothing 50$ ,  $\varnothing 60$  diameter (shaft 3) and the face of the largest diameter (shaft 1 and 2) guarantees collision-free storage.

**Conclusions.** This article shows the design of an educational robotic workplace, where a collaborative and industrial robot is used. The workplace is designed so that it is possible to assign individual assignments to individual students. The student who implements the programming of the workplace is also part of the programmed assembly process. In addition to programming two robots, it is necessary for the student to solve the issue of workplace safety. For this reason, three safety laser scanners are part of the workplace. The parts that the students manipulate are made by 3D printing to reduce production costs. This creates the possibility of manufacturing additional components allowing to implement a change in the handling process.

#### Acknowledgements

This research was supported by project KEGA: 020TUKE-4/2022 Development and implementation of new approaches in teaching industrial and collaborative robotics and project VEGA: 1/0215/23 Research and development of robotic workplaces equipped with industrial and collaborative robots.

#### References

1. Tölli, A. (2018). Possibilities of Collaborative Robotics. *Thesis for Bachelor's degree in Automation engineering*. Seinäjoki University of Applied Sciences. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/166472/T%C3%B6lli\\_Arttu.pdf?sequen](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/166472/T%C3%B6lli_Arttu.pdf?sequen)
2. Hand, S. (2020). *A Brief History of Collaborative Robots*. <https://www.mhlnews.com/technology-automation/article/21124077/a-brief-history-of-collaborative-robots>
3. DLR. Institute of Robotics and Mechatronics. (n.d.). *History of the DLR LWR*. [https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-12464/21732\\_read-44586/](https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-12464/21732_read-44586/)

4. Universal Robots. (2017). *History of the Cobots - The Cobots from Universal Robot*. <https://www.universal-robots.com/about-universal-robots/news-centre/the-history-behind-collaborative-robots-cobots/>
5. ABB. (2020). *ABB's ground-breaking YuMi® robot has set new standards for collaborative robotics for five years*. <https://new.abb.com/news/detail/63763/yumi-five-years>
6. Galin, R. a Meshcheryakov, R. (2019). *Automation and robotics in the context of Industry 4.0: the shift to collaborative robots*. Moscow (Russia): V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2019.
7. Roehl, C. (2022). *Know Your Machine: Traditional Industrial Robots vs. Cobots*. <https://www.universal-robots.com/blog/know-your-machine-traditional-industrial-robots-vs-cobots/>
8. OSHA (n.d.). *OSHA Technical Manual. Industrial Robot System and Industrial Robot System Safety*. <https://www.osha.gov/otm/section-4-safety-hazards/chapter-4>
9. ABB. (n.d.). *IRB 1200*. <https://new.abb.com/products/robotics/robots/articulated-robots/irb-1200>
10. ABB. (n.d.). *GoFa™ CRB 15000*. <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/crb-15000>
11. PILZ. (2022). *Pilz has put together a solution package comprising safety and security, for comprehensive safeguarding of automated guided vehicle systems – mobile safety – and security!* <https://www.pilz.com/en-CA/company/press/messages/articles/235087>

Отримано 28.07.2023

UDC 621.865.8

**Давид Ковалюк<sup>1</sup>, Ян Семйон<sup>2</sup>, Матус Сабол<sup>3</sup>, Даріус Русіньяк<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Аспірант кафедри виробничих систем і робототехніки Кошицького технічного університету (Кошице, Словаччина)  
E-mail: [david.kovaluk@student.tuke.sk](mailto:david.kovaluk@student.tuke.sk)

<sup>2</sup>Доцент кафедри виробничих систем і робототехніки Кошицького технічного університету (Кошице, Словаччина)  
E-mail: [jan.semjon@tuke.sk](mailto:jan.semjon@tuke.sk). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9076-7808>  
ResearcherID: ААН-6272-2019. Scopus Author ID: [55571411200](https://orcid.org/0000-0002-9076-7808)

<sup>3</sup>Аспірант кафедри виробничих систем і робототехніки Кошицького технічного університету (Кошице, Словаччина)  
E-mail: [matus.sabol@student.tuke.sk](mailto:matus.sabol@student.tuke.sk)

<sup>4</sup>Інж. студент кафедри промислової автоматики та мехатроніки Кошицького технічного університету (Кошице, Словаччина)  
E-mail: [darius.rusinak@student.tuke.sk](mailto:darius.rusinak@student.tuke.sk)

## ПРОЕКТУВАННЯ НАВЧАЛЬНОГО РОБОЧОГО МІСЦЯ З КОЛАБОРАТИВНИМ І ПРОМИСЛОВИМ РОБОТОМ

У статті розглядається конструкція монтажного навчального робочого місця, обладнаного двома роботами, один з яких є промисловим, а інший – колаборативним. Це роботи від компанії АВВ, а промисловий робот – IRB 1200, а колаборативний – GoFa CRB 15000. Використання роботів від компанії АВВ обумовлено тим, що у нас є автономне середовище Robot Studio, на робочому місці. Це дає змогу створювати симуляції, переміщуючи обох роботів, виявляти стан зіткнення та оптимізувати траєкторії руху. Кінцеві механізми роботів від компанії OnRobot, зокрема це двокулачний захват RG6 вантажопідйомністю 10 кг. Пропоноване робоче місце має розміри 2000 x 2500 мм і оснащено парою робочих столів. Збірка моделі коробки передач призначена лише для навчання, вона не базується на фактично виготовлених деталях. Модель коробки передач оснащена трьома різними валами, де їх довжина однакова, а різниця полягає лише в найбільшому діаметрі валів. Весь процес складання вимагає взаємної співпраці промислового колаборативного робота та людини-оператора. За допомогою складальних деталей можна створювати велику кількість комбінацій, так що на робочому місці може виникати багато окремих завдань. Це пов'язано з тим, що ми можемо зберігати кожен із валів у трьох місцях корпусу коробки передач, а їх можна зберігати у двох положеннях. Комбінуючи зазначені варіанти зберігання валів, можна досягти до 48 варіацій. Безпека працівників на робочому місці вирішується використанням безпечних лазерних сканерів. Вони зберігаються в зонах, де можливий доступ людини до робочого місця. Захисні зони навчального робочого місця дозволяють уповільнити або зупинити рух промислового робота.

**Ключові слова:** Промисловий робот; колаборативний робот; навчальне робоче місце; співробітництво.

**Юрій Коротич**

старший викладач кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна)

E-mail: [korotitch.iury@ukr.net](mailto:korotitch.iury@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1961-5318>

**СКЛАДАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВІБРАЦІЙНОГО СТОЛУ**

*В статті отримана математична модель, яка об'єднує між собою конструктивні і технологічні параметри технологічного комплексу обладнання для виробництва бетонних виробів (вібростолу), у якого віброзбуджувач закріплюється на важелі вертикально по центру під віброплитою. Математична модель складена за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду, які є найбільш загальним методом при розв'язуванні задач про рух механічної системи. При складанні були використані методи математичної фізики та фізико-математичне моделювання методами прикладної механіки. В результаті отримано математичну модель вібраційного столу у вигляді системи з семи диференціальних рівнянь другого порядку, яка описує просторовий рух поверхні вібростолу. Визначені теоретичні значення амплітуди коливань вібростолу при змінній довжині важеля та порівняні з експериментальними даними при однакових вихідних параметрах. Виявлено, що важільне закріплення дозволяє майже лінійно підвищити амплітуду віброколивань за рахунок збільшення довжини важеля.*

**Ключові слова:** вібростіл, важіль, віброзбуджувач, математична модель, кінетична енергія, узагальнена сила, амплітуда віброколивань, енергозаощадження.

**Актуальність теми дослідження.** Вібрування є найпоширенішим методом ущільнення бетонних композитів [1,2]. Понад 90 % всіх будівельних виробів з бетону й залізобетону виготовляється з використанням цього методу ущільнення бетонної суміші [3]. Це пояснюється тим, що в процесі вібраційного впливу на бетонні суміші створюються сприятливі умови тиксотропного розрідження та найбільш компактного розміщення частинок заповнювачів [4,5].

Існує величезна безліч вібраційних машин, що застосовуються в будівництві, які розрізняються по конструктивному виконанню та за призначенням. Огляд різноманітних конструкцій вібраційного обладнання показує, що при виробництві широкої номенклатури бетонних виробів використовується обладнання з необхідними робочими параметрами, за допомогою яких досягається якісне віброущільнення бетонної суміші. Сучасний розвиток будівництва потребує впровадження новітніх технологій та встановлення інженерного обладнання з різним призначенням за критеріями мінімізації енергії та високої ефективності виконання технологічного процесу. І, насамперед, слід призначати велику увагу розробленню та впровадженню енергозаощадних технологій та обладнання.

**Постановка проблеми.** Для того, щоб з'ясувати вплив окремих параметрів розробленого нами технологічного комплексу обладнання для виробництва бетонних виробів [6] на рух його робочого органу та енергоспоживання, потрібно скласти математичну модель цієї механічної системи.

**Аналіз останніх джерел досліджень.** У сучасному виробництві для формування бетонних виробів використовують вібраційні машини з гармонійними (круговими коливаннями у вертикальній площині, вертикально й горизонтально направленими коливаннями, просторовими коливаннями) та з ударно-вібраційними (на пружних прокладках, двомасові з горизонтальними чи вертикальними направленими коливаннями) рухами робочого органу. Все більший розвиток і впровадження отримують такі технології формування бетонних виробів, як вібропресування, вібровакуумування та імпульсний метод ущільнення [7].

Широке використання вібраційної техніки, численні теоретичні та експериментальні дослідження динаміки вібраційних машин дозволили виявити особливості їх роботи, пояснити і застосувати на практиці своєрідні ефекти, які виникають під час дії вібрації на механічні системи [8,9,10]. Тому багато досліджень та розробок приділяється цьому питанню [11], в яких розкриваються такі переваги вібраційного обладнання, як висока ефективність ущільнення, простота конструкції, висока надійність та відносно невелика металоемність і енергоємність.

Одним з пріоритетних напрямків розвитку будівельної вібраційної техніки є зменшення енергетичних витрат при виробництві. Енергозаощадні технології наряду зі збільшенням продуктивності та підвищенням якості продукції займають першочергове місце в сучасному будівництві. Напрямок енергозаощадження розвивається за рахунок оптимізації технологічних параметрів обладнання та використання сучасних технологій.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Необхідно скласти математичну модель розробленого та сконструйованого технологічного комплексу обладнання для виробництва бетонних виробів (вібростіл) за кінематичною схемою, яка раніше не використовувалася.

**Мета статті.** Для підтвердження технологічних можливостей конструкції вібростолу з важільним закріпленням вібробуджувача з метою зменшення обсягу лабораторних досліджень нами запропоновано розробити математичну модель вібростолу, яка б пов'язувала між собою амплітуду коливань на поверхні вібростолу з його конструктивними і технологічними параметрами, такими, як коливальна маса вібростолу, жорсткість віброопор, маса вантажу, маса дебалансу, ексцентриситет дебалансу та відстань від центру мас віброплити до осі обертання дебалансного валу, яка визначається довжиною важіля  $l_{важ}$ . Одержана залежність дозволить проводити математичне моделювання з метою оптимізації перелічених параметрів у напрямку покращення енергозбереження та технологічних можливостей вібростолу. Нами були поставлені наступні завдання для досягнення визначеної мети:

- створити математичну модель, яка б об'єднувала між собою конструктивні і технологічні параметри вібростолу з важільним закріпленням вібробуджувача, вказуючи їх вплив на амплітуду коливань робочої поверхні вібростолу;
- одержати підтвердження створеної математичної моделі адекватно описувати вплив зміни конструктивних і технологічних параметрів експериментальним шляхом;
- гуртуючись на результатах експериментальних досліджень і математичного моделювання, визначити рівень впливу використання важільного закріплення вібробуджувача на підвищення ефективності роботи дослідної конструкції вібростолу.

Дана робота є продовженням отриманих результатів в роботах [12, 13].

**Виклад основного матеріалу.** Для з'ясування загальної тенденції впливу окремих параметрів технологічного комплексу обладнання для виробництва бетонних виробів на рух його робочого органа, а також взаємного впливу руху окремих вузлів даного обладнання розглянемо його як механічну систему і отримаємо математичну модель цієї механічної системи.

Загальний вигляд технологічного комплексу обладнання для виробництва бетонних виробів (вібростіл) зображено на рис. 1.

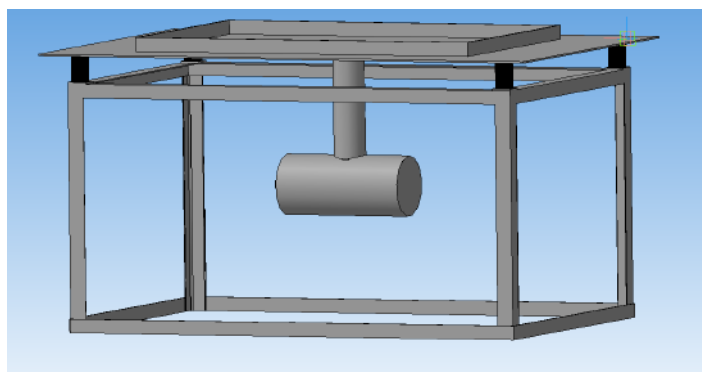


Рис. 1. Загальний вигляд технологічного комплексу обладнання для виготовлення бетонних виробів

Для отримання математичної моделі вібростолу зобразимо його кінематичну схему (рис. 2), як механічну систему, що складається з віброплити 1, важеля 2, корпусу віброзбуджувача 3, його дебалансного вала 4, розташованого на ньому дебалансу 5 та ємності з бетонною сумішшю 6.

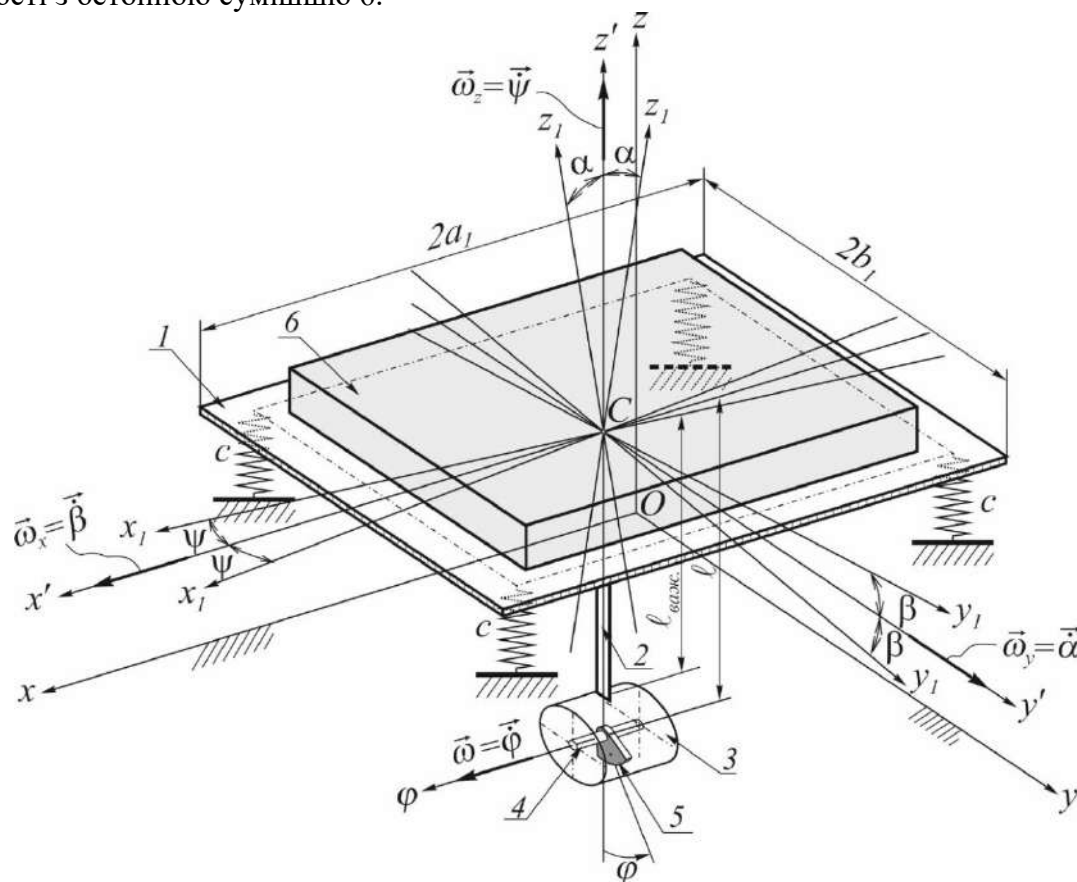


Рис. 2. Кінематична схема вібраційного столу

Математична модель вібраційного столу для виготовлення бетонних виробів [14] у вигляді рівнянь Лагранжа другого роду

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, i, \dots, s) \quad (1)$$

де  $T$  – кінетична енергія механічної системи, визначена у роботі [12];

$Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_s$ , де  $Q_i$  – узагальнена сила, що відповідає узагальненій координаті  $q_i$ , визначені у роботі [13];

$\frac{\partial T}{\partial q_i}$  – частинна похідна за узагальненою швидкістю  $\dot{q}_i$  від кінетичної енергії  $T$ ,  $\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}$  – частинна похідна за узагальненою координатою  $q_i$  від кінетичної енергії  $T$ ,  $\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right)$  – загальна похідна за часом  $t$  від частинної похідної за узагальненою швидкістю  $\dot{q}_i$  від кінетичної енергії  $T$ .

Метод рівнянь Лагранжа другого роду є найбільш загальним методом, який використовують при розв’язуванні задач про рух механічної системи. Рівняння (1) – це система звичайних диференціальних рівнянь другого порядку відносно  $s$  невідомих функцій  $q_i = q_i(t)$ , що являють собою закон руху досліджуваної механічної системи. Кількість рівнянь (1) дорівнює числу  $s$  ступенів вільності, тобто їх найменш можливому числу, а форма запису цих рівнянь ніяк не залежить від конкретного вибору системи узагальнених координат.

Оскільки вібраційні кути  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\psi$  набувають тільки малих значень (не більше 0,01 рад.), то, розкладаючи в формулі кінетичної енергії  $T$  [12] тригонометричні функції  $\sin$  і  $\cos$  у ряди Маклорена, обмежимося тільки їх першими доданками. Також врахуємо те, що величини  $\alpha^2$  і  $\alpha \cdot \beta$  [12] є малими величинами другого порядку, якими знехтуємо. За такого припущення дістанемо, що

$$\begin{aligned}
 T = & \frac{M}{2} \cdot \dot{x}_C^2 + \frac{M}{2} \cdot \dot{y}_C^2 + \frac{M}{2} \cdot \dot{z}_C^2 - \\
 & - [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{x}_C \cdot \dot{\alpha} - m \cdot e \cdot \dot{x}_C \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos\phi - \\
 & - m \cdot e \cdot \dot{x}_C \cdot \dot{\psi} \cdot \sin\phi + [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\beta} + \\
 & + m \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\beta} \cdot \cos\phi - m \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\psi} \cdot \psi \cdot \sin\phi + \\
 & + m \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi + [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\alpha} \cdot \alpha + \\
 & + m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\alpha} \cdot \alpha \cdot \cos\phi + [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\beta} \cdot \beta + \\
 & + m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\beta} \cdot \sin\phi + m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \sin\phi + \frac{m_3 \cdot \ell^2 + m_6 \cdot \ell_6^2}{2} \cdot \dot{\alpha}^2 - \frac{m \cdot \ell^2}{2} \cdot \dot{\alpha}^2 + \\
 & + m\ell \cdot e \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \cos\phi - \frac{me^2}{2} \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \cos^2\phi + \frac{(m_3 + m) \cdot \ell^2 + m_6 \cdot \ell_6^2 + m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\beta}^2 + \\
 & + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta}^2 \cdot \cos\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta}^2 \cdot \beta \cdot \sin\phi - \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\psi}^2 \cdot \sin^2\phi + \\
 & + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\beta} \cdot \alpha \cdot \sin\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\psi} \cdot \sin\phi + \\
 & + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \sin\phi + \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\beta} \cdot \alpha \cdot \sin 2\phi + \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\psi} \cdot \sin 2\phi + \\
 & + \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \sin 2\phi - m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\psi} \cdot \psi \cdot \sin\phi + \\
 & + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \beta \cdot \sin\phi - \\
 & - \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\psi} \cdot \psi \cdot \sin 2\phi + m \cdot e^2 \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} - \\
 & - \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \psi \cdot \sin 2\phi + \frac{I_y}{2} \cdot \dot{\alpha}^2 + \frac{I_x}{2} \cdot \dot{\beta}^2 + \frac{I_z}{2} \cdot \dot{\psi}^2 + \frac{I_5}{2} \cdot \dot{\phi}^2.
 \end{aligned}$$

Також за означених припущень модулі  $Q_4$  і  $Q_5$  узагальнених сил  $\vec{Q}_4$  і  $\vec{Q}_5$  [13] набувають значень

$$Q_4 = -(m_3 + m) \cdot g \cdot \ell \cdot \alpha + m_6 \cdot g \cdot \ell_6 \cdot \alpha - m \cdot g \cdot e \cdot \alpha \cdot \cos\phi - c_e \cdot \alpha^2 \cdot \alpha$$

$$Q_5 = -(m_3 + m) \cdot g \cdot \ell \cdot \beta + m_6 \cdot g \cdot \ell_6 \cdot \beta - c_e \cdot \beta^2 \cdot \beta.$$

Розглядувана механічна система має  $s = 7$  ступенів вільності, узагальненими координатами є  $q_1 = x_C, q_2 = y_C, q_3 = z_C, q_4 = \alpha, q_5 = \beta, q_6 = \psi$  і  $q_7 = \phi$ , а узагальненими швидкостями –  $\dot{q}_1 = \frac{dx_C}{dt} = \dot{x}_C, \dot{q}_2 = \frac{dy_C}{dt} = \dot{y}_C, \dot{q}_3 = \frac{dz_C}{dt} = \dot{z}_C, \dot{q}_4 = \frac{d\alpha}{dt} = \dot{\alpha}, \dot{q}_5 = \frac{d\beta}{dt} = \dot{\beta}, \dot{q}_6 = \frac{d\psi}{dt} = \dot{\psi}$  і  $\dot{q}_7 = \frac{d\phi}{dt} = \dot{\phi}$ .

Обчислимо частинні похідні  $\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}$  і  $\frac{\partial T}{\partial q_i}$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ).

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} = \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_C} = & \frac{M}{2} \cdot 2 \cdot \dot{x}_C - [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot 1 \cdot \dot{\alpha} - \\
 & - m \cdot e \cdot 1 \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos\phi - m \cdot e \cdot 1 \cdot \dot{\psi} \cdot \sin\phi
 \end{aligned}$$

або

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} = \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_C} = M \cdot \dot{x}_C - [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{\alpha} -$$

$$-m \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos\phi - m \cdot e \cdot \dot{\psi} \cdot \sin\phi;$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_1} = \frac{\partial T}{\partial x_C} = 0.$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2} = \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_C} = M \cdot \dot{y}_C + [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{\beta} +$$

$$+ m \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \cos\phi - m \cdot e \cdot \dot{\psi} \cdot \psi \cdot \sin\phi + m \cdot e \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi;$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_2} = \frac{\partial T}{\partial y_C} = 0.$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_3} = \frac{\partial T}{\partial \dot{z}_C} = M \cdot \dot{z}_C + [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{\alpha} \cdot \alpha +$$

$$+ m \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \alpha \cdot \cos\phi + [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{\beta} \cdot \beta +$$

$$+ m \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \sin\phi + m \cdot e \cdot \dot{\phi} \cdot \sin\phi;$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_3} = \frac{\partial T}{\partial z_C} = 0.$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_4} = \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} = I_y \cdot \dot{\alpha} + (m_3 \cdot \ell^2 + m_6 \cdot \ell_6^2) \cdot \dot{\alpha} - m \cdot \ell^2 \cdot \dot{\alpha} +$$

$$+ 2 \cdot m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos\phi - m \cdot e^2 \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos^2\phi -$$

$$- [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{x}_C - m \cdot e \cdot \dot{x}_C \cdot \cos\phi +$$

$$+ [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{z}_C \cdot \alpha + m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \alpha \cdot \cos\phi +$$

$$+ m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \alpha \cdot \sin\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\psi} \cdot \sin\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \sin\phi +$$

$$+ \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\beta} \cdot \alpha \cdot \sin 2\phi + \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\psi} \cdot \sin 2\phi + \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \sin 2\phi;$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_4} = \frac{\partial T}{\partial \alpha} = [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\alpha} + m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos\phi +$$

$$+ m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\beta} \cdot \sin\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin\phi +$$

$$+ \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\beta} \cdot \sin 2\phi + \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin 2\phi.$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_5} = \frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} = I_x \cdot \dot{\beta} + [(m_3 + m) \cdot \ell^2 + m_6 \cdot \ell_6^2 + m \cdot e^2] \cdot \dot{\beta} + 2 \cdot m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \cos\phi +$$

$$+ 2 \cdot m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \beta \cdot \sin\phi +$$

$$+ [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{y}_C + m \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \cos\phi + m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \sin\phi +$$

$$+ [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{z}_C \cdot \beta + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \alpha \cdot \sin\phi +$$

$$+ \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\alpha} \cdot \alpha \cdot \sin 2\phi - m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\psi} \cdot \psi \cdot \sin\phi +$$

$$+ m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\phi} \cdot \beta \cdot \sin\phi - \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\psi} \cdot \psi \cdot \sin 2\phi + m \cdot e^2 \cdot \dot{\phi};$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_5} = \frac{\partial T}{\partial \beta} = [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\beta} +$$

$$+ m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta}^2 \cdot \sin\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin\phi.$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_6} = \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} = I_z \cdot \dot{\psi} - m \cdot e^2 \cdot \dot{\psi} \cdot \sin^2\phi - m \cdot e \cdot \dot{x}_C \cdot \sin\phi -$$

$$- m \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \psi \cdot \sin\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \sin\phi +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\alpha} \cdot \sin 2\phi - m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \psi \cdot \sin \phi - \\
 & - \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\beta} \cdot \psi \cdot \sin 2\phi - \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\phi} \cdot \psi \cdot \sin 2\phi; \\
 & \frac{\partial T}{\partial q_6} = \frac{\partial T}{\partial \psi} = -m \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\psi} \cdot \sin \phi - \\
 & -m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \psi \cdot \sin \phi - \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\beta} \cdot \psi \cdot \sin 2\phi - \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin 2\phi.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_7} = \frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} & = I_5 \cdot \dot{\phi} + m \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \cos \phi + m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \sin \phi + \\
 & + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \alpha \cdot \sin \phi + \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\alpha} \cdot \alpha \cdot \sin 2\phi + \\
 & + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \cos \phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \beta \cdot \sin \phi + \\
 & + m \cdot e^2 \cdot \dot{\beta} - \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\psi} \cdot \psi \cdot \sin 2\phi;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial T}{\partial q_7} = \frac{\partial T}{\partial \phi} & = m \cdot e \cdot \dot{x}_C \cdot \dot{\alpha} \cdot \sin \phi - m \cdot e \cdot \dot{x}_C \cdot \dot{\psi} \cdot \cos \phi - \\
 & - m \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\beta} \cdot \sin \phi - m \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\psi} \cdot \psi \cdot \cos \phi - m \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi - \\
 & - m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\alpha} \cdot \alpha \cdot \sin \phi + m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\beta} \cdot \cos \phi + m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi - \\
 & - m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \sin \phi + m \cdot e^2 \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \cos \phi \cdot \sin \phi - m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta}^2 \cdot \sin \phi + \\
 & + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta}^2 \cdot \beta \cdot \cos \phi - m \cdot e^2 \cdot \dot{\psi}^2 \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\beta} \cdot \alpha \cdot \cos \phi + \\
 & + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\psi} \cdot \cos \phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \cos \phi + \\
 & + m \cdot e^2 \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\beta} \cdot \alpha \cdot \cos 2\phi + m \cdot e^2 \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\psi} \cdot \cos 2\phi + m \cdot e^2 \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \cos 2\phi - \\
 & - m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\psi} \cdot \psi \cdot \cos \phi - m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \beta \cdot \cos \phi - \\
 & - m \cdot e^2 \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\psi} \cdot \psi \cdot \cos 2\phi - m \cdot e^2 \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \psi \cdot \cos 2\phi.
 \end{aligned}$$

Візьмемо загальні похідні  $\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right)$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ ).

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} \right) & = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_C} \right) = M \cdot \ddot{x}_C - [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot \ddot{\alpha} - m \cdot e \cdot \ddot{\alpha} \cdot \cos \phi + \\
 & + m \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi - m \cdot e \cdot \ddot{\psi} \cdot \sin \phi - m \cdot e \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi = \\
 & = M \cdot \ddot{x}_C - [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6 + m \cdot e \cdot \cos \phi] \cdot \ddot{\alpha} + \\
 & + m \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi - m \cdot e \cdot (\ddot{\psi} \cdot \sin \phi + \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi).
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2} \right) & = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_C} \right) = M \cdot \ddot{y}_C + [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot \ddot{\beta} + \\
 & + m \cdot e \cdot \ddot{\beta} \cdot \cos \phi - m \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi - \\
 & - m \cdot e \cdot \ddot{\psi} \cdot \psi \cdot \sin \phi - m \cdot e \cdot \dot{\psi}^2 \cdot \sin \phi - m \cdot e \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \psi \cdot \cos \phi + \\
 & + m \cdot e \cdot \ddot{\phi} \cdot \cos \phi - m \cdot e \cdot \dot{\phi}^2 \cdot \sin \phi = \\
 & = M \cdot \ddot{y}_C + [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6 + m \cdot e \cdot \cos \phi] \cdot \ddot{\beta} - \\
 & - m \cdot e \cdot \ddot{\psi} \cdot \psi \cdot \sin \phi - m \cdot e \cdot \dot{\psi}^2 \cdot \sin \phi - m \cdot e \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \psi \cdot \cos \phi - m \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi + \\
 & + m \cdot e \cdot \ddot{\phi} \cdot \cos \phi - m \cdot e \cdot \dot{\phi}^2 \cdot \sin \phi = \\
 & = M \cdot \ddot{y}_C + [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6 + m \cdot e \cdot \cos \phi] \cdot \ddot{\beta} - \\
 & - m \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi - m \cdot e \cdot (\ddot{\psi} \cdot \psi + \dot{\psi}^2) \cdot \sin \phi - m \cdot e \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \psi \cdot \cos \phi + \\
 & + m \cdot e \cdot (\ddot{\phi} \cdot \cos \phi - \dot{\phi}^2 \cdot \sin \phi).
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_3} \right) &= \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{z}_C} \right) = M \cdot \dot{z}_C + [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot \ddot{\alpha} \cdot \alpha + \\ &+ [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{\alpha}^2 + m \cdot e \cdot \ddot{\alpha} \cdot \alpha \cdot \cos\phi + \\ &+ m \cdot e \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \cos\phi - m \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \sin\phi + \\ &+ [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot \ddot{\beta} \cdot \beta + [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{\beta}^2 + \\ &+ m \cdot e \cdot \ddot{\beta} \cdot \sin\phi + m \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi + m \cdot e \cdot \ddot{\phi} \cdot \sin\phi + m \cdot e \cdot \dot{\phi}^2 \cdot \cos\phi = \\ &= M \cdot \dot{z}_C + [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot (\ddot{\alpha} \cdot \alpha + \dot{\alpha}^2) + \\ &+ m \cdot e \cdot (\ddot{\alpha} \cdot \alpha + \dot{\alpha}^2) \cdot \cos\phi - m \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \sin\phi + \\ &+ [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot (\ddot{\beta} \cdot \beta + \dot{\beta}^2) + \\ &+ m \cdot e \cdot (\ddot{\beta} \cdot \sin\phi + \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi) + m \cdot e \cdot (\ddot{\phi} \cdot \sin\phi + \dot{\phi}^2 \cdot \cos\phi) = \\ &= M \cdot \dot{z}_C + [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6 + m \cdot e \cdot \cos\phi] \cdot (\ddot{\alpha} \cdot \alpha + \dot{\alpha}^2) - \\ &- m \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \sin\phi + [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot (\ddot{\beta} \cdot \beta + \dot{\beta}^2) + \\ &+ m \cdot e \cdot (\ddot{\beta} \cdot \sin\phi + \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi) + m \cdot e \cdot (\ddot{\phi} \cdot \sin\phi + \dot{\phi}^2 \cdot \cos\phi). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_4} \right) &= \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) = I_y \cdot \ddot{\alpha} + (m_3 \cdot \ell^2 + m_6 \cdot \ell_6^2) \cdot \ddot{\alpha} - m \cdot \ell^2 \cdot \ddot{\alpha} + \\ &+ 2 \cdot m \cdot \ell \cdot e \cdot \ddot{\alpha} \cdot \cos\phi - 2 \cdot m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin\phi - \\ &- m \cdot e^2 \cdot \ddot{\alpha} \cdot \cos^2\phi + m \cdot e^2 \cdot \dot{\alpha} \cdot 2 \cdot \cos\phi \cdot \sin\phi \cdot \dot{\phi} - \\ &- [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot \ddot{x}_C - m \cdot e \cdot \ddot{x}_C \cdot \cos\phi + m \cdot e \cdot \dot{x}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \sin\phi + \\ &+ [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{z}_C \cdot \alpha + [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\alpha} + \\ &+ m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \alpha \cdot \cos\phi + m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\alpha} \cdot \cos\phi - m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \sin\phi + \\ &+ m \cdot \ell \cdot e \cdot \ddot{\beta} \cdot \alpha \cdot \sin\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\alpha} \cdot \sin\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \cos\phi + \\ &+ m \cdot \ell \cdot e \cdot \ddot{\psi} \cdot \sin\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi + \\ &+ m \cdot \ell \cdot e \cdot \ddot{\phi} \cdot \alpha \cdot \sin\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\phi} \cdot \dot{\alpha} \cdot \sin\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\phi}^2 \cdot \alpha \cdot \cos\phi + \\ &+ \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \ddot{\beta} \cdot \alpha \cdot \sin 2\phi + \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\alpha} \cdot \sin 2\phi + m \cdot e^2 \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \cos 2\phi + \\ &+ \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \ddot{\psi} \cdot \sin 2\phi + m \cdot e^2 \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos 2\phi + \\ &+ \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \ddot{\phi} \cdot \alpha \cdot \sin 2\phi + \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\phi} \cdot \dot{\alpha} \cdot \sin 2\phi + m \cdot e^2 \cdot \dot{\phi}^2 \cdot \alpha \cdot \cos 2\phi. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_5} \right) &= \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} \right) = I_x \cdot \ddot{\beta} + [(m_3 + m) \cdot \ell^2 + m_6 \ell_6^2 + m \cdot e^2] \cdot \ddot{\beta} + \\ &+ 2 \cdot m \cdot \ell \cdot e \cdot \ddot{\beta} \cdot \cos\phi - 2 \cdot m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin\phi + \\ &+ 2 \cdot m \cdot \ell \cdot e \cdot \ddot{\beta} \cdot \beta \cdot \sin\phi + 2 \cdot m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta}^2 \cdot \sin\phi + 2 \cdot m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \beta \cdot \cos\phi + \\ &+ [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot \ddot{y}_C + m \cdot e \cdot \ddot{y}_C \cdot \cos\phi - m \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \sin\phi + \\ &+ m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \sin\phi + m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi + \\ &+ [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{z}_C \cdot \beta + [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\beta} + \\ &+ m \cdot \ell \cdot e \cdot \ddot{\alpha} \cdot \alpha \cdot \sin\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \sin\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \cos\phi + \\ &+ \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \ddot{\alpha} \cdot \alpha \cdot \sin 2\phi + \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \sin 2\phi + m \cdot e^2 \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \cos 2\phi - \\ &- m \cdot \ell \cdot e \cdot \ddot{\psi} \cdot \psi \cdot \sin\phi - m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\psi}^2 \cdot \sin\phi - m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \psi \cdot \cos\phi + \\ &+ m \cdot \ell \cdot e \cdot \ddot{\phi} \cdot \cos\phi - m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\phi}^2 \cdot \sin\phi + \\ &+ m \cdot \ell \cdot e \cdot \ddot{\phi} \cdot \beta \cdot \sin\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\phi} \cdot \dot{\beta} \cdot \sin\phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\phi}^2 \cdot \beta \cdot \cos\phi - \\ &- \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \ddot{\psi} \cdot \psi \cdot \sin 2\phi - \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\psi}^2 \cdot \sin 2\phi - m \cdot e^2 \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \psi \cdot \cos 2\phi + m \cdot e^2 \cdot \ddot{\phi}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_6} \right) &= \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} \right) = I_z \cdot \ddot{\psi} - \\ &- m \cdot e^2 \cdot \ddot{\psi} \cdot \sin^2 \phi - 2 \cdot m \cdot e^2 \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi - \\ &- m \cdot e \cdot \ddot{x}_C \cdot \sin \phi - m \cdot e \cdot \dot{x}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi - \\ &- m \cdot e \cdot \ddot{y}_C \cdot \psi \cdot \sin \phi - m \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\psi} \cdot \sin \phi - m \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \psi \cdot \cos \phi + \\ &+ m \cdot \ell \cdot e \cdot \ddot{\alpha} \cdot \sin \phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi + \\ &+ \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \ddot{\alpha} \cdot \sin 2\phi + m \cdot e^2 \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos 2\phi - \\ &- m \cdot \ell \cdot e \cdot \ddot{\beta} \cdot \psi \cdot \sin \phi - m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\psi} \cdot \sin \phi - m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \psi \cdot \cos \phi - \\ &- \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \ddot{\beta} \cdot \psi \cdot \sin 2\phi - \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\psi} \cdot \sin 2\phi - m \cdot e^2 \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \psi \cdot \cos 2\phi - \\ &- \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \ddot{\phi} \cdot \psi \cdot \sin 2\phi - \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\phi} \cdot \dot{\psi} \cdot \sin 2\phi - m \cdot e^2 \cdot \dot{\phi}^2 \cdot \psi \cdot \cos 2\phi. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_7} \right) &= \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} \right) = I_5 \cdot \ddot{\phi} + m \cdot e \cdot \ddot{y}_C \cdot \cos \phi - m \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi + \\ &+ m \cdot e \cdot \ddot{z}_C \cdot \sin \phi + m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi + \\ &+ m \cdot \ell \cdot e \cdot \ddot{\alpha} \cdot \alpha \cdot \sin \phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \sin \phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \cos \phi + \\ &+ \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \ddot{\alpha} \cdot \alpha \cdot \sin 2\phi + \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \sin 2\phi + m \cdot e^2 \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \cos 2\phi + \\ &+ m \cdot \ell \cdot e \cdot \ddot{\beta} \cdot \cos \phi - m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi + \\ &+ m \cdot \ell \cdot e \cdot \ddot{\beta} \cdot \beta \cdot \sin \phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta}^2 \cdot \sin \phi + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \beta \cdot \cos \phi + \\ &+ m \cdot e^2 \cdot \ddot{\beta} - \\ &- \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \ddot{\psi} \cdot \psi \cdot \sin 2\phi - \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot \dot{\psi}^2 \cdot \sin 2\phi - m \cdot e^2 \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \psi \cdot \cos 2\phi. \end{aligned}$$

Підставляючи усі знайдені значення відповідних похідних і узагальнених сил в рівняння (1) Лагранжа другого роду та зробивши скорочення, перегрупування, перетворення і обчислення остаточно отримуємо математичну модель вібраційного столу для виготовлення бетонних виробів [6] у вигляді системи з семи диференціальних рівнянь другого порядку

$$\begin{aligned} M \cdot \ddot{x}_C + c_{ex} \cdot x_C &= [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6 + m \cdot e \cdot \cos \phi] \cdot \ddot{\alpha} - \\ &- m \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi + m \cdot e \cdot (\ddot{\psi} \cdot \sin \phi + \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi) + c_{ex} \cdot \delta \cdot \alpha. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} M \cdot \ddot{y}_C + c_{ey} \cdot y_C &= -[(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6 + m \cdot e \cdot \cos \phi] \cdot \ddot{\beta} + \\ &+ m \cdot e \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi + m \cdot e \cdot (\ddot{\psi} \cdot \psi + \dot{\psi}^2) \cdot \sin \phi + m \cdot e \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \psi \cdot \cos \phi - \\ &- m \cdot e \cdot (\ddot{\phi} \cdot \cos \phi - \dot{\phi}^2 \cdot \sin \phi) - c_{ey} \cdot \delta \cdot \beta. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} M \cdot \ddot{z}_C + c_e \cdot z_C &= -[(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6 + m \cdot e \cdot \cos \phi] \cdot (\ddot{\alpha} \cdot \alpha + \dot{\alpha}^2) + \\ &+ m \cdot e \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \alpha \cdot \sin \phi - [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot (\ddot{\beta} \cdot \beta + \dot{\beta}^2) - \\ &- m \cdot e \cdot (\ddot{\beta} \cdot \sin \phi + \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi) - m \cdot e \cdot (\ddot{\phi} \cdot \sin \phi + \dot{\phi}^2 \cdot \cos \phi). \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} [I_y + (m_3 - m) \cdot \ell^2 + m_6 \cdot \ell_6^2] \cdot \ddot{\alpha} &+ m \cdot e \cdot \cos \phi \cdot (2 \cdot \ell - e \cdot \cos \phi) \cdot \ddot{\alpha} - \\ &- [2 \cdot m \cdot e \cdot \dot{\phi} \cdot (\ell - e \cdot \cos \phi) \cdot \sin \phi] \cdot \dot{\alpha} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left\{ [(m_3 + m) \cdot \ell + m \cdot e \cdot \cos\phi] \cdot (\ddot{z}_C + g) + \right. \\
 & \quad + m_6 \cdot \ell_6 \cdot (\ddot{z}_C - g) - m \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \sin\phi + \\
 & \quad + m \cdot \ell \cdot e \cdot (\ddot{\beta} \cdot \sin\phi + \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi + \ddot{\phi} \cdot \sin\phi + \dot{\phi}^2 \cdot \cos\phi) + \\
 & \quad \left. + \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot [(\ddot{\beta} + \ddot{\phi}) \cdot \sin 2\phi + 2 \cdot (\dot{\beta} + \dot{\phi}) \cdot \dot{\phi} \cdot \cos 2\phi] + c_e \cdot a^2 \right\} \cdot \alpha = \\
 & = [(m_3 + m) \cdot \ell + m_6 \cdot \ell_6] \cdot \ddot{x}_C + m \cdot e \cdot (\ddot{x}_C \cdot \cos\phi - \dot{x}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \sin\phi) - \\
 & - \frac{m \cdot e}{2} \cdot [(2 \cdot \ell \cdot \sin\phi + e \cdot \sin 2\phi) \cdot \ddot{\psi} + 2 \cdot (\ell \cdot \cos\phi + e \cdot \cos 2\phi) \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi}]. \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & [I_x + (m_3 + m) \cdot \ell^2 + m_6 \ell_6^2 + m \cdot e^2] \cdot \ddot{\beta} + 2 \cdot m \cdot \ell \cdot e \cdot (\cos\phi + \beta \cdot \sin\phi) \cdot \ddot{\beta} + \\
 & \quad + m \cdot \ell \cdot e \cdot \dot{\beta}^2 \cdot \sin\phi - 2 \cdot m \cdot \ell \cdot e \cdot (\sin\phi - \beta \cdot \cos\phi) \cdot \dot{\beta} \cdot \dot{\beta} + \\
 & + \left\{ [(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot (\ddot{z}_C + g) + m \cdot \ell \cdot e \cdot (\ddot{\phi} \cdot \sin\phi + \dot{\phi}^2 \cdot \cos\phi) + c_e \cdot b^2 \right\} \cdot \beta = \\
 & = -[(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot \ddot{y}_C - m \cdot e \cdot (\ddot{y}_C \cdot \cos\phi - \dot{y}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \sin\phi) - \\
 & \quad - m \cdot e \cdot (\ddot{z}_C \cdot \sin\phi + \dot{z}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi) - \\
 & \quad - m \cdot e \cdot (\ell + e \cdot \cos\phi) \cdot (\ddot{\alpha} \cdot \alpha + \dot{\alpha}^2 - \ddot{\psi} \cdot \psi - \dot{\psi}^2) \cdot \sin\phi - \\
 & \quad - m \cdot e \cdot (\ell \cdot \cos\phi + e \cdot \cos 2\phi) \cdot (\dot{\alpha} \cdot \alpha - \dot{\psi} \cdot \psi) \cdot \dot{\phi} - \\
 & \quad - m \cdot \ell \cdot e \cdot (\ddot{\phi} \cdot \cos\phi - \dot{\phi}^2 \cdot \sin\phi) - m \cdot e^2 \cdot \ddot{\phi}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & I_z \cdot \ddot{\psi} - m \cdot e^2 \cdot \ddot{\psi} \cdot \sin^2\phi - m \cdot e^2 \cdot \dot{\psi} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin 2\phi - \\
 & - \left\{ m \cdot e \cdot (\ddot{y}_C \cdot \sin\phi + \dot{y}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi) + m \cdot \ell \cdot e \cdot (\ddot{\beta} \cdot \sin\phi + \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi) + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot [(\ddot{\beta} + \ddot{\phi}) \cdot \sin 2\phi + 2 \cdot (\dot{\beta} + \dot{\phi}) \cdot \dot{\phi} \cdot \cos 2\phi] - c_{ex} \cdot b^2 - c_{ey} \cdot a^2 \right\} \cdot \psi = \\
 & = m \cdot e \cdot (\ddot{x}_C \cdot \sin\phi + \dot{x}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi) - m \cdot \ell \cdot e \cdot (\ddot{\alpha} \cdot \sin\phi + \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi) - \\
 & \quad - \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot (\ddot{\alpha} \cdot \sin 2\phi + 2 \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos 2\phi). \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & I_5 \cdot \ddot{\phi} + m \cdot e \cdot \ddot{y}_C \cdot \cos\phi + m \cdot e \cdot (\ddot{z}_C + g) \cdot \sin\phi - \\
 & \quad - m \cdot e \cdot (\dot{x}_C \cdot \dot{\alpha} - \dot{y}_C \cdot \dot{\beta} - \dot{z}_C \cdot \dot{\alpha} \cdot \alpha) \cdot \sin\phi + \\
 & \quad + m \cdot e \cdot (\dot{x}_C \cdot \dot{\psi} + \dot{y}_C \cdot \dot{\psi} \cdot \psi - \dot{z}_C \cdot \dot{\beta}) \cdot \cos\phi + \\
 & \quad + m \cdot \ell \cdot e \cdot [(\ddot{\alpha} \cdot \alpha + \ddot{\beta} \cdot \beta) + 2 \cdot (\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2)] \cdot \sin\phi + \\
 & \quad + m \cdot \ell \cdot e \cdot [\dot{\beta} - \dot{\beta}^2 \cdot \beta - (\dot{\alpha} \cdot \alpha - \dot{\psi} \cdot \psi) \cdot \dot{\beta} - \dot{\alpha} \cdot \dot{\psi}] \cdot \cos\phi + \\
 & \quad + \frac{m \cdot e^2}{2} \cdot (\ddot{\alpha} \cdot \alpha - \ddot{\psi} \cdot \psi) \cdot \sin 2\phi - m \cdot e^2 \cdot [(\dot{\alpha} \cdot \alpha - \dot{\psi} \cdot \psi) \cdot \dot{\beta} + \dot{\alpha} \cdot \dot{\psi}] \cdot \cos 2\phi = \\
 & \quad = M_{дв.} - m \cdot e^2 \cdot \dot{\beta} \quad (8)
 \end{aligned}$$

Проведемо аналіз отриманих нами рівнянь. Перші три рівняння (2), (3), (4) відповідають за координати переміщення  $x_C$ ,  $y_C$ ,  $z_C$  по координатним осям, якими є відповідно осі  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ . Рівняння (5), (6), (7) описують кути повороту  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\psi$  навколо осей  $Oy$ ,  $Ox$  та  $Oz$  відповідно. Рівняння (8) описує кут повороту  $\phi$  дебалансу навколо осі обертання дебалансного валу вібробуджувача.

Дана математична модель у вигляді системи з семи диференціальних рівнянь другого порядку описує рух у просторі будь-якої точки поверхні вібростолу. Для того, щоб визначити амплітуду вертикальних коливань вібростолу, відповідаючи за якісне ущільнення бетонної суміші, розглянемо детальніше рівняння (4). Воно містить в собі координату  $z_c$  переміщення центру мас віброплити по осі  $Oz$ , яка і являє собою амплітуду вертикальних коливань. Також в його складі є ряд значущих факторів, впливаючих на величину даної амплітуди. Ними є коливальна маса вібростолу, жорсткість віброопор, маса вантажу, маса дебалансу, ексцентриситет дебалансу та відстань від центру мас віброплити до осі обертання дебалансного валу, до складу якої входить довжина важеля  $\ell_{важ.}$ .

Розглядаючи рух вібростолу від дії збурюючої сили, яку створює віброзбуджувач обертанням дебалансу (див. рис. 2), приходимо до висновку, що значення координати переміщення  $x_c$  та кути повороту  $\alpha$  і  $\psi$  будуть дорівнювати нулю, а отже і їх похідні першого та другого порядку також будуть дорівнювати нулю. Враховуючи вищенаведене, рівняння (4) набуде наступного вигляду

$$M \cdot \ddot{z}_c + c_e \cdot z_c = -[(m_3 + m) \cdot \ell - m_6 \cdot \ell_6] \cdot (\ddot{\beta} \cdot \beta + \dot{\beta}^2) - m \cdot e \cdot (\ddot{\beta} \cdot \sin\phi + \dot{\beta} \cdot \dot{\phi} \cdot \cos\phi) - m \cdot e \cdot (\ddot{\phi} \cdot \sin\phi + \dot{\phi}^2 \cdot \cos\phi). \quad (9)$$

Як приклад застосування рівняння (9) побудуємо діаграми вертикальних коливань вібраційного столу залежно від довжини важеля  $\ell_{важ.}$ , до якого віброзбуджувач закріплюється по центру під віброплитою. Для побудови була використана математична програма "Mathcad Prime". Величини значущих факторів, які входять до рівняння (9), приймаємо виходячи з технологічних показників проектного вібростолу в межах раціональних параметрів (див. табл. 1).

Таблиця 1 – Раціональні параметри вібростолу.

№	Назва параметру	Позначення	Одиниця вимірювання	Величина
1.	Колівальна маса вібростолу	$M$	кг	332
2.	Маса віброплити	$m_1$	кг	170
3.	Маса віброзбуджувача	$m_3$	кг	10
4.	Маса дебаланса	$m$	кг	2
5.	Маса вантажу з формою	$m_6$	кг	150
6.	Ексцентриситет дебаланса	$e$	м	0,03
7.	Жорсткість віброопор	$c_e$	Н/м	570000

Для приклада були використані параметри віброзбуджувача ИВ-99БУ2 (потужність  $N = 0,5$ кВт, частота 50 Гц, частота обертання  $n = 3000$  хв<sup>-1</sup>, збурююча сила  $P = 3$  кН). Довжина важеля  $\ell_{важ.}$  приймалась рівною відповідно 0; 100; 200 мм виходячи з зображень, що амплітуда буде збільшуватись від значень, які не достатні для якісного ущільнювання (менше 0,3 мм), до значень, що забезпечують якісне ущільнення (більше 0,3 мм).

Отримані діаграми наведені на рис. 3 – 5.

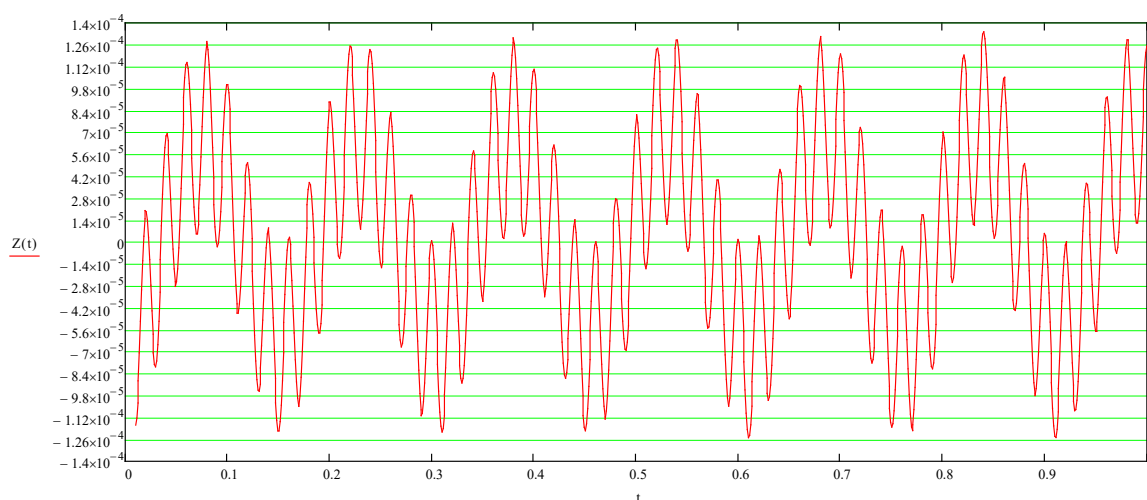


Рис. 3. Діаграма вертикальних коливань вібростолу при довжині важеля  $\ell_{\text{важ.}} = 0$  мм. (без важеля)

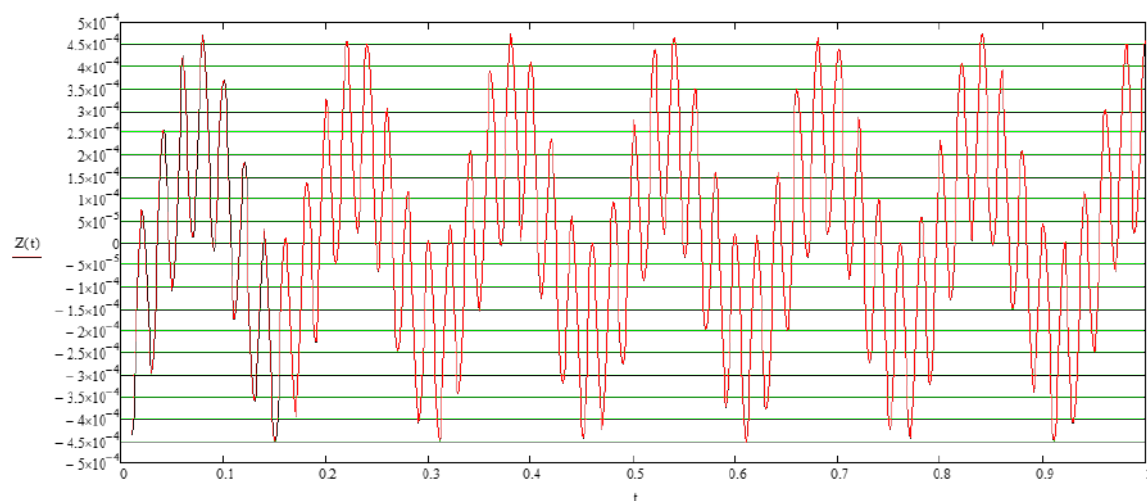


Рис. 4. Діаграма вертикальних коливань вібростолу при довжині важеля  $\ell_{\text{важ.}} = 100$  мм.

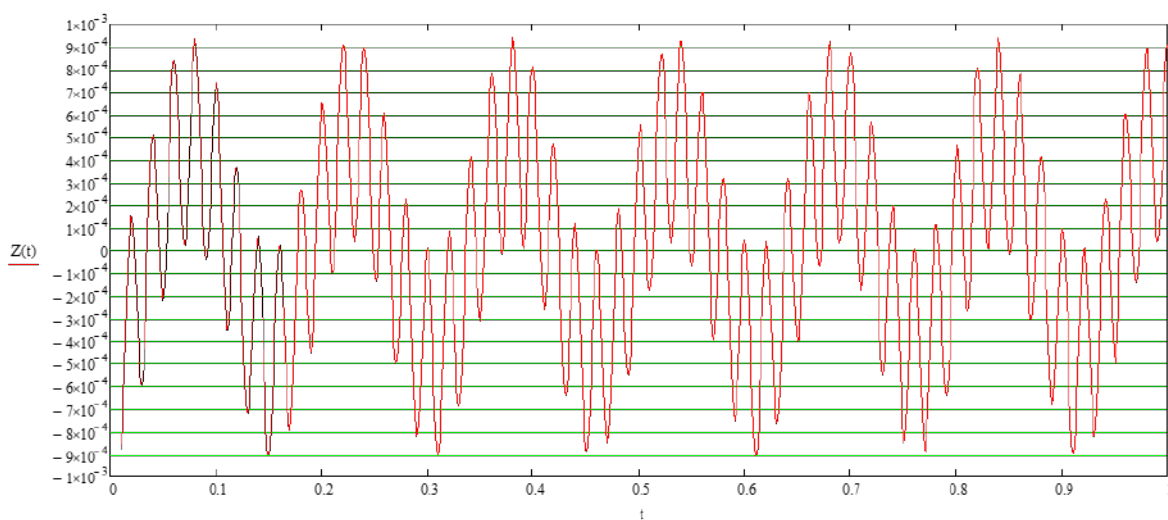


Рис. 5. Діаграма вертикальних коливань вібростолу при довжині важеля  $\ell_{\text{важ.}} = 200$  мм.

Теоретично одержані чисельні значення параметрів віброколивень, зображених на рис. 3-5, визначених при раціональних значеннях конструктивних параметрів вібростолу, розрахованих при змінній довжині важеля, через який віброзбуджувач приєднується до вібростолу, були порівняні з експериментальними даними при однакових вихідних параметрах. Похибка склала не більше, ніж 15%, що підтверджує адекватність створеної математичної моделі реальному технологічному процесу віброуцілення на вібростолі, який досліджується.

Використовуючи дані з рис. 3-5, побудуємо графік зміни величини амплітуди вертикальних коливень  $Z_c$  в залежності від довжини важеля  $\ell_{важ.}$  (рис. 6).

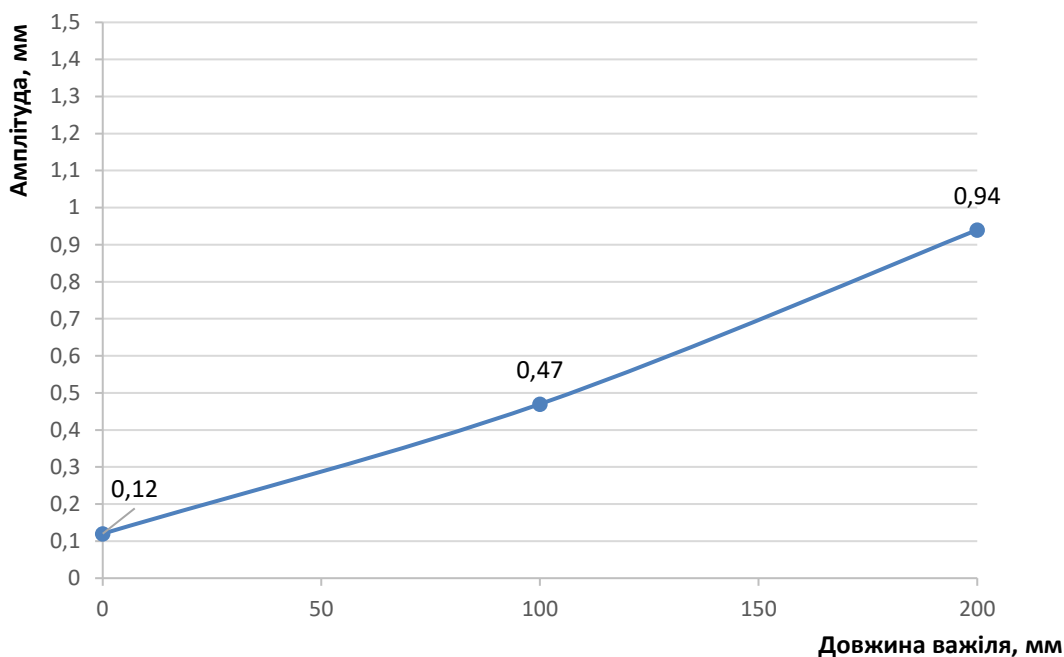


Рис. 6. Графік зміни величини амплітуди вертикальних коливень від довжини важеля

Аналіз одержаної залежності на рис. 6 зміни амплітуди віброколивень на робочій поверхні вібростолу від зміни довжина важеля, на якому закріплюється віброзбуджувач, вказує, що важільне закріплення віброзбуджувача дозволяє майже лінійно підвищити амплітуду вертикальних коливень аналогічно такому ж зменшенню енерговитрат віброзбуджувача при довжині важеля 200 мм.

**Висновки.** Створена математична модель, яка об'єднує між собою конструктивні і технологічні параметри вібростолу з важільним закріпленням віброзбуджувача, такими, як коливальна маса вібростолу, жорсткість віброопор, маса вантажу, маса дебалансу, ексцентриситет дебалансу та відстань від центру мас віброплити до осі обертання дебалансного валу, яка визначається довжиною важеля  $\ell_{важ.}$ . Одержана залежність дозволяє проводити математичне моделювання з метою оптимізації перелічених параметрів у напрямку покращення технологічних можливостей вібростолу.

Грунтуючись на створеній математичній моделі і раціональних конструктивних параметрах вібростолу визначені теоретичні значення амплітуди коливень вібростолу при змінній довжині важеля, через який віброзбуджувач приєднується до вібростолу. Збіг теоретичних і експериментальних даних при однакових вихідних параметрах відрізняється не більше, ніж на 15%, що підтверджує адекватність створеної математичної моделі реальному технологічному процесу віброуцілення на вібростолі, який досліджується.

З аналізу одержаної залежності зміни амплітуди віброколивень на робочій поверхні вібростолу від зміни довжина важеля, на якому закріплюється віброзбуджувач, слідує що важільне закріплення віброзбуджувача дозволяє майже лінійно підвищити амплітуду віброколивень аналогічно такому ж зменшенню енерговитрат віброзбуджувача при довжині важеля 200 мм.

### Список використаних джерел

1. Назаренко, І. І. Вібраційні машини і процеси будівельної індустрії : навч. посіб. / І. І. Назаренко. – Київ : КНУБА, 2007. – 230 с.
2. Дудар, І. Н. Теоретичні основи технології виробів із пресованих бетонів : монографія / І. Н. Дудар. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 89 с.
3. Гусев, Б. В. Вібраційна технологія бетону / Б. В. Гусев, В. Г. Зазимко. – Київ : Будівельник, 1991. – 230 с.
4. Ручинський, М. М. Огляд і аналіз існуючих режимів ущільнення бетонних сумішей / М. М. Ручинський, А. Г. Свідерський, О. С. Д'яченко // Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта : міжнар. наук.-практ. конф. – Київ, 2019.
5. Назаренко І. І. Фізичні основи механіки будівельних матеріалів / І. І. Назаренко, М. М. Ручинський. – Львів : Афіша, 2002. – 128 с.
6. Патент 146691 Україна. МПК В28В 1/08 (2006.01). Вібростіл з важільним закріпленням віброзбуджувача / Б.О. Коробко, Ю.Ю. Коротич, Є.А. Васильєв; власник НУ "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка". – № и 2020 06563; заявл. 12.10.2020; опубл. 10.03.2021, Бюл. № 10.
7. Загреба, В. П. Технологія роздільного віброімпульсного формування каменебетонних виробів: монографія / В. П. Загреба, І. Н. Дудар, А. О. Коваленко. — Вінниця : ВНТУ, 2012. — 92 с.
8. Дворкін, Л. Й. Проектування складів бетону із заданими властивостями / Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Гарніцький Ю. В. – Рівне : Вид-во РДТУ, 2000. – 215 с.
9. Nesterenko, M. P. Study of vibrations of plate of oscillation cassette setting as active working organ / M. P. Nesterenko, P. O. Molchanov // Problems of energy and nature use 2013 : Conference reports materials / Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, University of Tuzla, China University of Petroleum) – Budapest, 2014. – P. 146-151.
10. Конструкційні матеріали нового покоління та технології їх впровадження у будівництво / Р. Ф. Рунова, В. І. Братчун, В. І. Гоц та ін. – Київ : УВПК ЕксОб, 2008. – 360 с.
11. Нестеренко, М. П. Класифікація та оцінка споживчих якостей сучасних вібраційних машин для формування залізобетонних виробів / М. П. Нестеренко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава : ПолтНТУ, 2007. – Вип. 20. – С. 20-25.
12. Korobko, B. Determination of the vibrating table kinetic energy / B. Korobko, S. Zhyhylii, Yu. Korotych // Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering. –2022. – Т. 2 (59). – С. 17-26.
13. Korotych, Yu. Determination of generalized vibration table forces / Yu. Korotych // Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering. – Т. 1 (60). – С. 5-11.
14. Morin, D. Introduction to Classical Mechanics: With Problems and Solutions / D. Morin. – Cambridge : Cambridge University Press, 2008. – 734 p.

### References

1. Nazarenko, I. I. (2007). *Vibration machines and processes of the construction industry*. Kyiv: KNUBA Publ.
2. Dudar, I. N. (2006). *Theoretical foundations of the technology of products from pressed concrete*. Vunnytsia: UNIVERSUM-Vunnytsia.
3. Husev, B. V. (1991). *Concrete Vibration Technology*. Kyiv: Budivelnik.
4. Ruchynskiy, M. M., Sviderskiy, A. H. & D'iachenko, O. S. (2019). *Review and analysis of existing modes of compaction of concrete mixtures*. Kyiv: MNTK «Prohresywna tekhnika, tekhnolohiia ta inzhenerna osvita».
5. Nazarenko, I. I. & Ruchynskiy, M. M. (2002). *Physical Foundations of Building Materials Mechanics*. Lviv: Afisha.

6. Korobko, B. O., Korotych, Yu. Yu. & Vasyliiev, Ye. A. (2021). *Vibrating table with lever fastening of the vibrating exciter*. Ukraine, Patent № 146691 (10.03.2021, Biul. № 10) MPK V28 V 1/08 (2006.01).
7. Zahreba, V. P., Dudar, I. N. & Kovalenko, A. O. (2012). *Technology of Separate Vibro-Pulse Molding of Stone-Concrete Products*. Vunnytsia: VNTU.
8. Dvorkin, L. Y., Dvorkin, O. L. & Harnitskyi, Yu. V. (2000). *Design of concrete compositions with specified properties*. Rivne: RDTU Publ.
9. Nesterenko, M. P. & Molchanov, P. O. (2014). Study of vibrations of plate of oscillation cassette setting as active working organ. *Proceedings of the Conference «Problems of energy and nature use 2013»* (Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, University of Tuzla, China University of Petroleum). *Budapest*. P. 146–151.
10. Runova, R. F., Bratchun, V. I. & Hots V. I. (2008). *Structural materials of the new generation and technologies of their implementation in construction*. Kyiv: UVPK EksOb.
11. Nesterenko, M. P. (2007). Classification and Evaluation of Consumer Qualities of Modern Vibration Machines for the Formation of Reinforced Concrete Products. *Zbirnyk naukovykh prats (haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo)*, 20, 20–25.
12. Korobko, B. O., Zhyhylii, S. M. & Korotych, Yu. Yu. (2022). Determination of the vibrating table kinetic energy. *Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2 (59), 17–26.
13. Korotych, Yu. Yu. (2023). Determination of generalized vibration table forces. *Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 1 (60), 5–11.
14. Morin, D. (2008). *Introduction to Classical Mechanics: With Problems and Solutions*. (1st edition). Cambridge University Press.

Отримано 09.09.2023

UDC 621.01-861:519.711

**Yuriy Korotych**

senior lecturer department of branch machinery and mechatronics  
National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» (Poltava, Ukraine)  
E-mail: [korotitch.iury@ukr.net](mailto:korotitch.iury@ukr.net). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1961-5318>

## VIBRATION TABLE MATHEMATICAL MODEL COMPOSING

*In this article, a mathematical model is obtained, which combines the design and technological parameters of the technological set of equipment for the concrete goods production (vibrating table), in which the vibrating exciter is fixed on the lever vertically in the center under the plate compactor. This equipment is used for the manufacture of small-sized concrete products. The mathematical model is composed with the help of Lagrange equations of the second kind, which are the most common method for solving problems about the motion of a mechanical system. Methods of mathematical physics and physical and mathematical modeling by methods of applied mechanics were used in the compilation. To determine the position and describe the free motions of the material bodies that make up the mechanical system under consideration, an orthogonal vibrational reference system of three coordinate systems was used. Analyzing the kinematic diagram of the vibration table, it is determined that the position in space of all material bodies of the mechanical system, which simulates the specified vibrating table, can be uniquely set by the following independent parameters: Cartesian coordinates, vibration angles and the angle of rotation of debalance. Thus, the mechanical system in question has seven degrees of freedom with seven generalized coordinates. As a result, a mathematical model of a vibrating table for concrete products manufacturing in the form of seven second order differential equations system, which describes the vibrating table spatial motion surface, is obtained. The theoretical values of the vibrating table vibrations amplitude at variable lever length were also determined and compared with experimental data at the same initial parameters. The difference was 15%, which confirms the adequacy of the created mathematical model to the real technological process on the vibrating table, which is being studied. Analyzing the change in the vibration oscillations amplitude on the vibrating table working surface from the change in the lever length on which the vibrating exciter is fixed, it was found that the lever fixation allows an almost linear increase in the amplitude of vibration oscillations due to an increase in the lever length. This, in turn, makes it possible to reduce energy consumption when compacting the concrete mixture.*

**Keywords:** vibrating table, lever, vibration exciter, mathematical model, kinetic energy, generalized force, amplitude of vibrations, energy saving.



**Dušan Mlinarček<sup>1</sup>, Rudolf Jánoš<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD. student of the Department of Production Systems and Robotics, Technical University of Košice (Košice, Slovakia)

E-mail: [dusan.mlinarcek@student.tuke.sk](mailto:dusan.mlinarcek@student.tuke.sk)

<sup>2</sup>Associate Professor, Associate Professor of the Department of production systems and robotics, Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)

E-mail: [rudolf.janos@tuke.sk](mailto:rudolf.janos@tuke.sk) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5754-9278> ResearcherID: AAH-5449-2019.

Scopus Author ID: [55016528600](https://orcid.org/0000-0002-5754-9278)

## USE OF THE OMRON F150-3 CAMERA FOR THE POSITIONING OF RANDOMLY DISTRIBUTED PARTS

*The article discusses the development of a testing workplace for the handling of 3D objects. The workplace is equipped with an industrial SCARA robot, an intelligent input conveyor, pallet and depalletizing equipment, a vibrating feeder and vibrating trays, switch effectors, universal gripper, and other components. The workplace is also equipped with two OMRON F150-S1 cameras, which are used to create a 3D camera system. The article describes how the 3D camera system is used to determine the position of objects on the conveyor belt. The system first uses the density averaging function to determine the average optical density of the region without any objects. This value is then used as a threshold to determine whether an object is present in the workspace. If an object is present, the system uses the gravity and area functions to calculate the X and Y coordinates of the object from the center of the measuring platform. The system then uses the edge position function to calculate the Z coordinate of the object.*

**Keywords:** robotic workstation, 3D camera, manipulation of unoriented objects

Fig.:3. Tables.:1. References:8.

**Relevance of the research.** Orientation of parts using a 3D camera is a current topic because it has many advantages over traditional methods. 3D cameras are able to determine the orientation of parts with high accuracy, which is important in applications such as manufacturing and assembly. 3D cameras can orient parts quickly, which is important in applications where a large number of parts need to be processed. 3D cameras can be automated, meaning they can be used to orient parts without human intervention. This can save time and money. 3D cameras can be used to orient parts of different shapes and sizes.

**Problem statement.** Current methods of component orientation have a number of disadvantages. Manually orienting parts can be time-consuming and not always accurate. Traditional methods of automatic part orientation are often limited to certain types of parts and cannot be used to orient parts of different shapes and sizes.

**Analysis of recent research and publications.** The OMRON F150-3 camera is a 3D camera that is commonly used for the positioning of randomly distributed parts. It has a number of features that make it well-suited for this application, including:

- A high resolution, which allows it to accurately capture the shape and orientation of parts.
- A wide field of view, which allows it to capture multiple parts in a single image.
- A fast frame rate, which allows it to capture images of moving parts.

A number of recent research papers have been published on the use of the OMRON F150-3 camera for the positioning of randomly distributed parts. These papers have investigated a variety of methods for using the camera to determine the position of parts, including:

- Feature-based methods: These methods use the features of the parts, such as their shape or size, to determine their position.
- Background subtraction methods: These methods use the background of the image to determine the position of parts.
- Template matching methods: These methods use a template image of the part to determine its position [1,2].

**Uninvestigated parts of a common problem.** Despite the progress that has been made in this area, there are still areas that are not sufficiently explored. For example, researchers are still working on developing methods to orient parts that are resistant to adverse conditions such as dust, moisture and light. Researchers are also working to develop methods to orient parts that are affordable and easy to use.

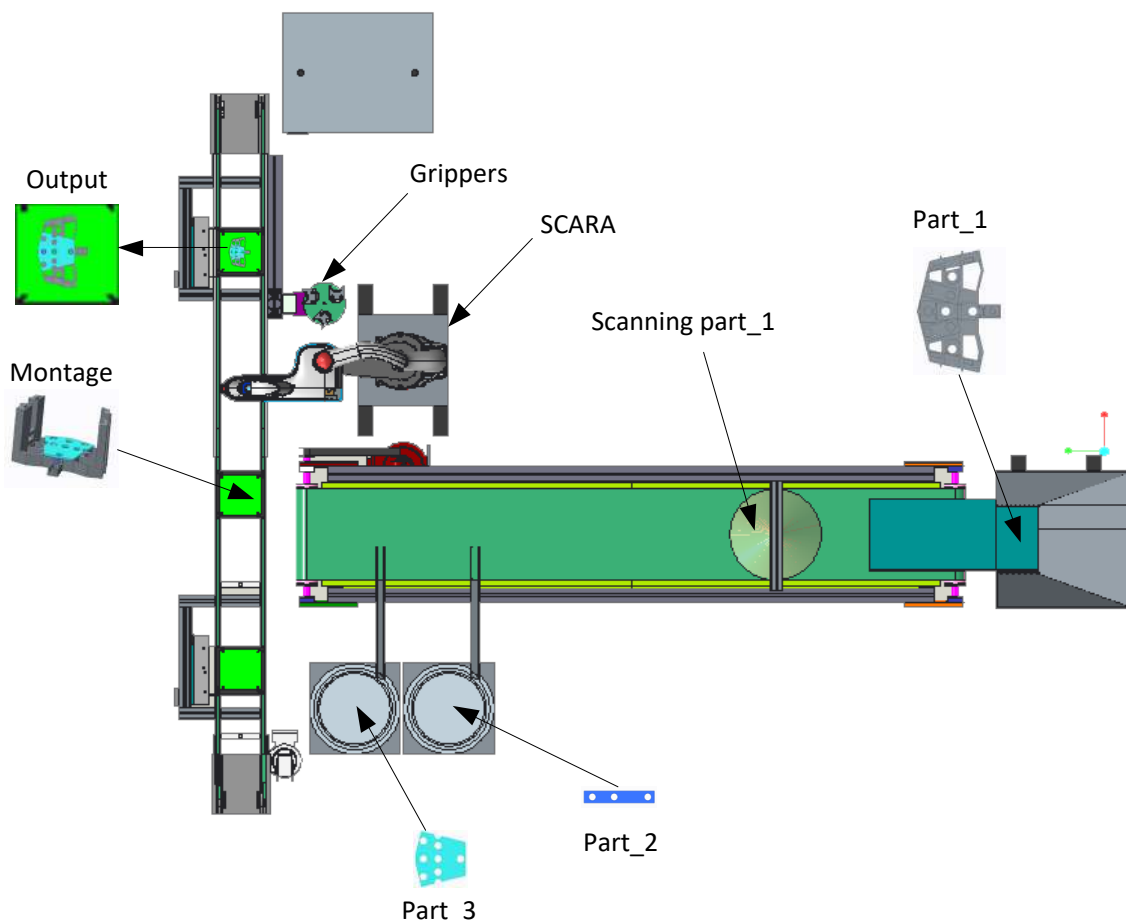
**Research objective.** The goal of this research is a new method for part orientation using 3D cameras that will be fast, sufficiently accessible and affordable. The new method will be based on a combination of traditional and new methods and algorithms. The method will be tested on different types of parts under different conditions.

**The statement of basic materials.** Recently, more and more frequently we encounter rapid development in the field of automation of cyclically recurring processes. These processes occur not only in the deployment, but also in our daily lives. Most of us about them or just have no idea, and it has long since become a normal part of our. The camera systems, cyclically repeated steps: getting data from the source, their processing and evaluation in real time, and last but not least activity depend on the evaluation thereof. These steps we've taken advantage of in the construction testing workplace for the handling of 3D objects created in the project: applied research systems smart handling of industrial robots with unoriented 3D objects. Visual sensor subsystems are an essential part already or not adaptive, but directly to autonomous complex mechatronic systems. Their integration into the production cycle, the monitoring of technological processes and operations increases flexibility, production flexibility and partially eliminating the need for human intervention [3].

**Equipment of research workplace** Robotics research workplace serving for verification of selected types of methods and algorithms of randomly oriented objects. The main parts of this workplace include the following components:

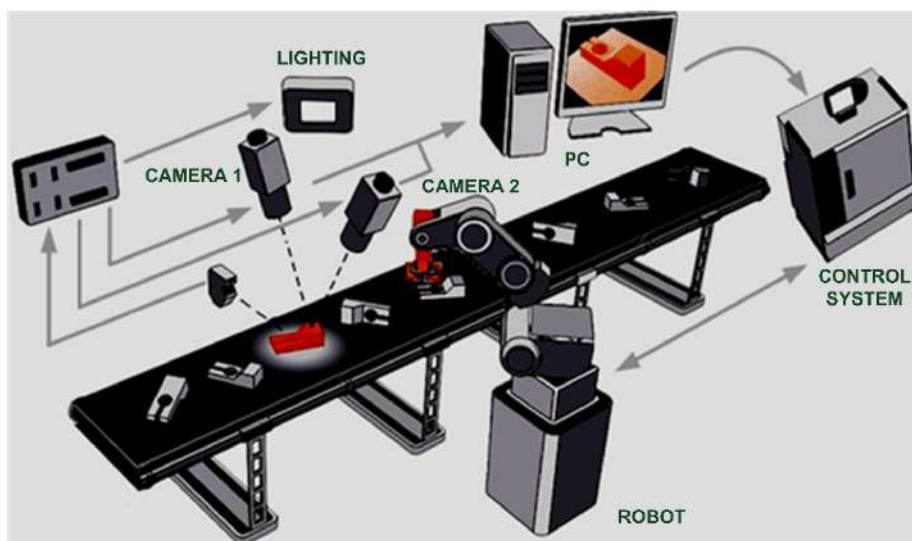
- Industrial robot Scara
- Intelligent input conveyor
- Pallet respectively Depalletizing equipment
- Vibrating conveyor and vibrating trays
- Replacement of equipment effectors and universal gripper
- Other components (control computer, PLC control, rotary actuators, linear and rotary modules)

The structure of the research robotic workstation (fig. 1 and fig. 2) consists of industrial SCARA robot, intelligent input conveyor, pallet and depalletizing equipment, vibrating feeder and vibrating trays, switch effectors and universal gripper and other components (control computer, PLC control, rotary actuators, linear and rotary modules) [4].



*Fig. 3. Layout of research workplace*

The aim of the establishment of the research department is the possibility of using it, inter alia, in at teaching process for the preparation of students in the field of Robotics and automation. Provides the ability to use for experimental and research purposes and significantly contributes to the preparation of students for practical as well as a better theoretical page [5].



*Fig. 4. Layout of research workplace*

As shown in fig. 2, handling variously oriented subjects in the area of one camera is not enough. For this type of application must be built. 3D camera system while may be issued in two ways. Either purchase industrial 3D camera with evaluation software or a combination of two or more cameras to create a 3D system in which using geometric relationships relevant coordinates of the object in space are extracted, calculated [6].

A crucial and critical place of each visual system specific parameters of the cameras. On the test facility are used cameras OMRON F150-S1, Fig. 3, which have the following main parameters.

- resolution camera system :512 (H) x 484 (V), and the camera 659 (H) x 494 (V)
- focal length: 35 mm
- The range image depending on whether the camera is mounted on an intelligent light source, the distance of the measurement object from the camera and use the spacer - additional intermediate links between the lens and the camera itself.



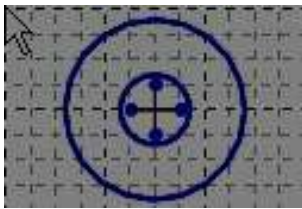

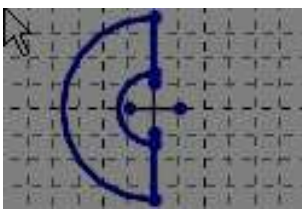
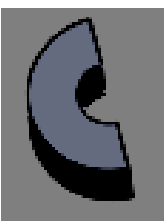


*Fig. 5 Camera OMRON F150-S1*

Visual inspection system OMRON F150-3 has 16 scenes (one measuring stage for one component together so settings can be saved for up to 16 products), has the option to record in the memory up to 32 images controlled subjects and 16 measurement functions. Because of the manipulation necessary to ascertain the position of the object on the conveyor belt. To determine whether the object whose coordinates we need to identify the center of gravity is not at work, the scene measuring function is used Density averaging based on the difference in the brightness of the image units. As part of this exercise will evaluate the density of each pixel based on its brightness (values from 0 to 255, so. Grayscale, gray scale), calculate the overall average for crawled area (search region) and on the basis of the calculated measurement made [7].

At the beginning of measurement made for the empty stage to determine what is the average optical density of the region without building measurements. The measurement showed that under the given lighting conditions, the average optical density of the searched area bounding box is equal to the value of 64.525. In the next step, access to the operation which is referred to as thresholding - we define thresholds, under which the system will be able to say with certainty

whether the component in the workspace is present or not. In implementing the thresholding operation, thus entering the limit values for separation of compliant products from spoilage, the following procedure was followed: The verdict OK was set to 100 for objects with a correlation value of 84 or higher with the reference object. All objects with measurement values of 83 or lower were marked as error parts, as shown in, tab. 1.

Tab. 1 Example of correlation products with the reference object

Component	Leayout	3D model	Corelation
reference component			100
component 1			50
component 2			40

After calibrated measuring range to the display poles we can move to the measured X and Y coordinates of the selected object from the center of the measuring platform, from the bottom left corner of the screen within the external coordinate system use the function Gravity and area. The said function can calculate the mean of the sheet object (top view), provided that the recognized object is formed on the screen, a preponderance of white pixels and the rest of the scene is black.

To extract the coordinates of the third applies the function "edge position", a feature that can detect the edges of objects and their position is considered sufficient contrast between the background and object recognition. As with the deployment tool "Gravity and area" We have to edit the scene through BGS - background suppression (post-processing, image processing after receipt) so that between the edge and the background is visible difference. The background is cut off, so to speak, determines the upper and lower limits (0 to 255) pixels and brightness only areas covered by this difference of the measurement are taken into account. If the position of the side edge is to be measured, the product is selected in the desired direction. If the subject is dark and the background is light, the "Light to Dark" option is chosen. Of course, before drawing, the area where the edge of the object in question should be located is defined. [8].

To perform a test, the standard deviation measurements for X - coordinate was 0.015, 0.064 for Y, Z for 0,009. The cause of the greatest deviations of measurements for the Y - coordinate

maybe fact that has not been used for measurements intelligent light source, measured in scene and lights steadily and the results achieved probably be relevant effect lighting in the premises of the laboratory of a relatively large vertical distance of the camera from the object of measurement.

**Conclusions.** Practical verification, we found that camera system OMRON F150-3 is applicable to the assembly lines with sufficient accuracy without special lighting. The next step in addressing the interconnection of the camera system and robot who will take part and classes.

### Acknowledgements

This article was created thanks to the KEGA project support: 004TUKE-4/2021 Development of innovative teaching materials for learning multi-agent robotics.

### References

1. Taranenko, G, Taranenko, W, Świć, A, Szabelski, J. (2010). Modelling of dynamic systems of low-rigidity shaft machining. *Maintenance and Reliability*, 4(48), 4-15.
2. Balaz, V., Sukop, M. (2005). Multiagentnije sistemy. Automation: problems ideas, decisions. Sevastopol: SevNTU.
3. Swic, A., Wolos, D., Litak, G. (2014) Method of control of machining accuracy of low-rigidity elastic-deformable shafts. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2, 260-278.
4. Hajduk, M., a kol. (2015). Robotika - Robotická technika. (1. vyd.). Košice: TU Košice.
5. OMRON. (2012). Xpectia FZD. Xpectia Vision system
6. Rusnák, M. (2011). Návrh kamerového systému s průmyslovým robotem KUKA. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky.
7. Krajcar, M. (2009). Robotické vidění s průmyslovými roboty KUKA. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky.
8. Siciliano, B., Khatib, O. (2008). Handbook of robotics. Springer.

Отримано 14.07.2023

УДК 621.8

**Душан Млінарчек<sup>1</sup>, Рудольф Янош<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Аспірант кафедри виробничих систем і робототехніки Кошицького технічного університету (Кошице, Словаччина)  
E-mail: [dusan.mlinarcek@student.tuke.sk](mailto:dusan.mlinarcek@student.tuke.sk)

<sup>2</sup> Доцент, доцент кафедри виробничих систем і робототехніки Кошицького технічного університету (Кошице, Словаччина)  
E-mail: [rudolf.janos@tuke.sk](mailto:rudolf.janos@tuke.sk). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5754-9278> ResearcherID: AАН-5449-2019.  
Scopus Author ID: [55016528600](https://orcid.org/0000-0002-5754-9278)

## ВИКОРИСТАННЯ КАМЕРИ OMRON F150-3 ДЛЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ВИПАДКОВО РОЗПОДІЛЕНИХ ДЕТАЛЕЙ

У статті розглядається розробка тестового робочого місця для роботи з 3D об'єктами. Робоче місце оснащено промисловим роботом SCARA, інтелектуальним вхідним конвеєром, обладнанням для палетування та депалетування, віброживильником та вібротокми, ефекторами перемикачів та універсальним захватом та іншими компонентами. Також робоче місце оснащено двома камерами OMRON F150-S1, які використовуються для створення системи 3D камер. У статті описано, як система 3D-камер використовується для визначення положення об'єктів на конвеєрі. Система спочатку використовує функцію усереднення цілності, щоб визначити середню оптичну ціліність області без об'єктів. Потім це значення використовується як порогове значення для визначення наявності об'єкта в робочій області. Якщо об'єкт присутній, система використовує функцію гравітації та площі для обчислення координат X і Y об'єкта від центру of the measuring platform. The system then uses the edge position function to calculate the Z coordinate of the object.

**Ключові слова:** роботизована робоча станція, 3D-камера, маніпуляції з неорієнтованими об'єктами

**Павло Гавриш<sup>1</sup>, Вадим Юсіфов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор, професор кафедри підйомно-транспортних і металургійних машин  
Донбаської державної машинобудівної академії

(Краматорськ, Україна)

E-mail: [nauka.breda@gmail.com](mailto:nauka.breda@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9999-0099>

ResearcherID: [AAx-4741-2020](https://orcid.org/0000-0001-9999-0099). Scopus Author ID: [7801588222](https://orcid.org/0000-0001-9999-0099)

<sup>2</sup>аспірант кафедри підйомно-транспортних і металургійних машин

Донбаської державної машинобудівної академії (Краматорськ, Україна)

E-mail: [vadim.yusifov.97@gmail.com](mailto:vadim.yusifov.97@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0201-4836>

**ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ЕКСКАВАТОРА CAT 349D2**

На основі удосконалення гідравлічної системи шляхом встановлення додаткового навісного обладнання – знижена забрудненість гідравлічної системи в процесі експлуатації екскаватора. Це дало змогу знизити робочі температури трансмісійної і гідравлічної системи. Таким чином розроблено і розраховано спосіб встановленого додаткового обладнання що підвищує продуктивність екскаватора. Крім того, зменшуються витрати на технічне обслуговування і ремонт.

**Ключові слова:** гідравлічна система; трансмісійна система; клапан для промивки; продуктивність екскаватора; технічне обслуговування та ремонт; температура системи.

Рис.:5; Бібл.:12.

**Актуальність теми дослідження.** Сучасне виробництво вимагає застосування спеціалізованих підйомно-транспортних машин, що дозволяють більш ефективно та економічно виконувати технології виробництва земляних робіт. Гідравлічний екскаватор використовується при розробці ґрунтів (гірських порід, корисних копалин) та навантаженні сипких матеріалів. Безперечними перевагами таких машин є не тільки їх потужність та продуктивність, але також і простота пристрою, нескладне керування та мінімальні потреби у технічному обстеженні. Тому від таких показників екскаватору як продуктивність, працездатність і довговічність залежить швидкість видобутку та розкриву корисних копалин. А це в свою чергу – підвищення економічної стабільності держави.

**Постановка проблеми.** На надійність роботи кар'єрних екскаваторів впливають експлуатаційні фактори та їх сукупності (геологія родовища, температура навколишнього середовища, завантаженість, технологія розробки). Однак організаційно-технічні фактори не менш важливі і приводять до погіршення технічного стану функціональних вузлів машини, а це є причиною простою екскаваторів та зниження коефіцієнту їх ефективного використання [1, 2].

У гідростатичній трансмісії екскаватора є два гідравлічні контури, кожен з яких має своє функціональне призначення і підключені до нього компоненти. Це головний контур системи, контур охолодження і подачі рідини, що підживлює. Робоча рідина циркулює між контурами за рахунок витоків і витрати через клапан для промивання, якщо система їм обладнана. Якість робочої рідини забезпечується насамперед за рахунок контуру підживлення/охолодження, але основним споживачем високоякісної робочої рідини є головний контур. Забруднення контуру призводить до подальшого руйнування фрикційного механізму гідромотора та планетарних механізмів редуктора ходу, і відповідно до зупинки агрегату. Тому, результатом пошуку способів зниження забруднення гідравлічного контуру є насамперед зменшення простоїв машини, зменшення витрат на технічне обслуговування, підвищення продуктивності [3, 4]. Хоча поняття продуктивності є добре вивченою областю діяльності, але огляд наукової літератури виявив невідповідності між ефективністю палива, робочої рідини гідравлічних систем і поняттям продуктивності гідравлічних екскаваторів. Чим більше потужність екскаватора, тим більше політична стурбованість осіб, які намагаються захищати навколишнє середовище

від більш потужних викидів в атмосферу. Наша мета – без збільшення потужності збільшити продуктивність машини.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Науковці [5] виконали теоретичне дослідження з метою визначення оптимальної системи упорскування палива дизеля OM537 Common Rail. Звісно, конструкція інжекторів дуже важлива для стабільної роботи дизеля, але вона не вирішує основного завдання проблеми стабілізації якості робочої рідини впродовж експлуатації екскаватора. KG Pugin [6] у своїх дослідженнях вивчав питання підвищення надійності гідравлічних систем технологічних машин. Дійсно, ми погоджуємося з автором, що підвищити надійність гідросистем можливо за рахунок використання якісних елементів в її складі. Елементи гідравлічної системи – це силові циліндри і гідромотори, гідророзподільники, гідроклапани, дроселі, фільтри тощо. Більш якісні елементи коштують значно дорожче, а при роботі вони все одно зношуються і забруднюють робочу рідину. Можна також використати передові, сучасні методи технічного обслуговування. Проте ми вважаємо, що незважаючи на важливість діагностики гідравлічної системи необхідно використовувати методи, що попереджають забруднення системи понад норму. Важливу роль грають як сама конструкція, так і методи з'єднання її з металоконструкцією екскаватора [7, 8].

За даними D.J. Edwards [9] і інших науковців понад 45% екскаваторів Caterpillar Inc. (CAT), Komatsu Ltd. and J C Bamford Excavators Ltd. – обладнані гідравлічним приводом, що підтверджує важливість і необхідність проведення робіт з удосконалення елементів гідравлічної системи. Науковці з Великобританії [10] пропонують установити поточний моніторинг для прогнозування забрудненості робочої рідини гідравлічних систем. Так, це дуже цікаво і надасть позитивні зміни як у майбутніх конструкцій, так і у проведенні діагностики і технічного обслуговування машини. Але на нашу думку, додаткові датчики і нові електронні пристрої для екскаватора, що працює у важких виробничих умовах є доцільними у лабораторних умовах. Lei Ge [11] і інші науковці пропонують для приводів екскаваторів нову систему узгодження потужності і енергоефективності гідравлічних пристроїв. Ми вважаємо, що напрямки узгодження потужності і енергоефективності з метою підвищення продуктивності екскаваторів Caterpillar дадуть ідеї для створення нових екскаваторів. Jennifer A. Harding та Jacqueline Glass [12] у своїй експериментальній роботі встановили зв'язок між паливною економічністю та продуктивністю. Крім того встановлено, що досягання максимальної швидкості руху екскаватора не пов'язано з максимальною продуктивністю. І навпаки налаштування низьких обертів не обов'язково приводить до споживання найменшої кількості палива для виконання того ж завдання. Результати наукового дослідження також показують, що наполовину заповнений ківш екскаватора може мати максимальний ефект покращення продуктивності на 30%, з економією палива 24%.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Аналіз опублікованих статей показав їх неоднакову спрямованість, широке коло проблем і методів вирішення. Але конкретне вирішення проблеми підвищення продуктивності і реалізований на практиці метод не знайшов висвітлення у останніх публікаціях. Тому пропонований спосіб підвищення продуктивності без підвищення потужності екскаватора є актуальним і реалізованим у процесі експлуатації.

**Метою статті** є розробка способу підвищення продуктивності, що не потребує збільшення потужності самого екскаватора.

**Виклад основного матеріалу.** Поняття продуктивності тісно пов'язане з розвитком теорії проектування, техніки та вдосконалення технології гірничих робіт. Змінна експлуатаційна продуктивність характеризує продуктивність ходової частини агрегату протягом робочої зміни з урахуванням використання агрегату як у часі, так і по завантаженню



(вантажопідйомності). Фактори, що впливають на продуктивність ходової частини екскаватора:

- труднощі розробки гірничої маси, яка оцінюється категорією породи та її станом;
- технічні дані, стан та надійність ходової частини;
- якість забою, що оцінюється його висотою, умовами підходу транспорту до місця навантаження. Ці фактори неможливо повністю усунути, крім того рівень забруднення головного циліндру екскаватора CAT 349D2, що допустимий при експлуатації не допустимий для інших елементів гідравлічної системи.

В екскаваторі CAT 349D2 використовується аксіально-поршневий гідромотор з похилим диском (див. рис. 1). Принцип роботи аксіально-поршневих гідравлічних моторів полягає в паралельному переміщенні поршнів до осі валу гідромотора. Поршні у циліндри з'єднуються з валом. Далі поршні штовхають вал, що створює крутний момент.



*Рис.1. Аксіально-поршневий гідромотор з похилим диском [1]:*

*1 – блок гідроциліндрів з похилим диском; 2 – корпус вала з підшипниками; 3 – вал*

Забруднення гідравлічного контуру призводить до подальшого руйнування фрикційного механізму гідромотора та планетарних механізмів редуктора ходу, і відповідно до зупинки агрегату. Щоб запобігти несправності редуктора ходу, пропонується встановлення додаткового обладнання, а саме – клапана для промивання контуру.

При розробці конструкції додаткового обладнання, а саме клапана промивання гідравлічного контуру гідромотора, повинні враховуватися параметри гідромотора та його особливості конструкції, для подальшої установки клапана. Екскаватор CAT 349D2 має на борту двоконтурний аксіально-поршневий гідромотор, з можливістю встановлення додаткового обладнання, без механічного втручання. Проектування промивного клапана гідростатичного контуру полягає у виборі його конструктивної форми, найбільш повно відповідної конструкції гідромотора, визначаються розміри патрубків, для установки в гідромотор вхідного патрубка, і вихідного в розподільник.

Гідравлічний тиск у кожній точці гідростатичного контуру промивного клапана схильний до змін в результаті коливання температури гідравлічної рідини через попадання в контур забруднюючих елементів, і як наслідок відбувається зміна кількості та температури циркулюючого теплоносія.

На (рис. 2) представлено варіант встановлення додаткового обладнання через гідророзподільник.

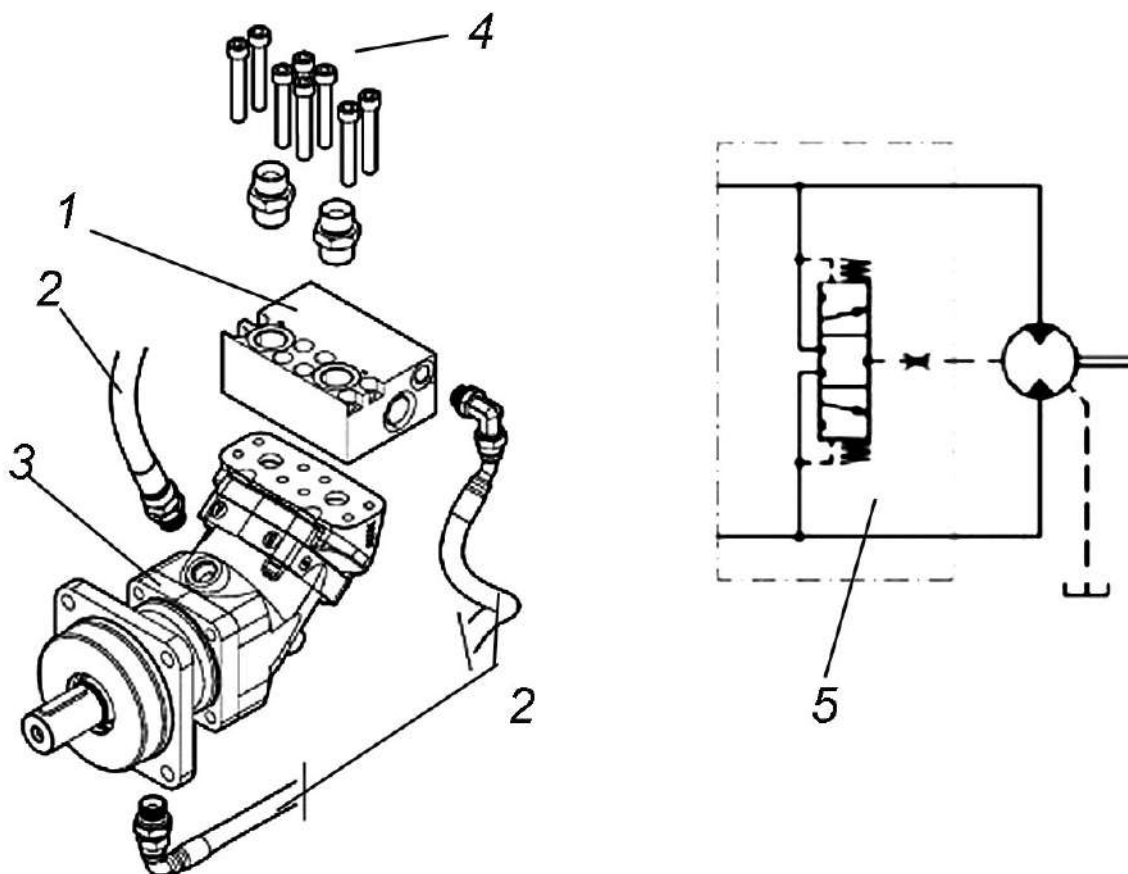


Рис. 2. Варіант встановлення промивного клапана: 1 – клапан для промивання контуру, 2 – гідравлічні рукави системи, 3 – гідромотор, 4 – з'єднувальні елементи, 5 – гідравлічна схема промивного клапана

Джерело: розроблено авторами при використанні обладнання

<https://hydromarket.com.ua/ua/p575130754-promyvochnyj-klapan-sunfab.html>

Існує два шляхи, за допомогою яких можна вирішити проблему перегріву та попадання забруднюючих речовин у гідравлічних системах. Перший шлях – зниження теплової потужності. Другий – збільшення здатності системи до розсіювання тепла та бруду. Промивний клапан є компонентом гідравлічної системи, який дозволить контролювати подачу якісної робочої рідини в головний контур, для запобігання руйнування механізмів ходового обладнання.

Промивний клапан значно покращує відведення тепла та забруднень з головного контуру, покращуючи якість робочої рідини та продовжуючи термін служби компонентів. Гідравлічна схема розташування проектованого промивного клапана показана на (рис. 3).

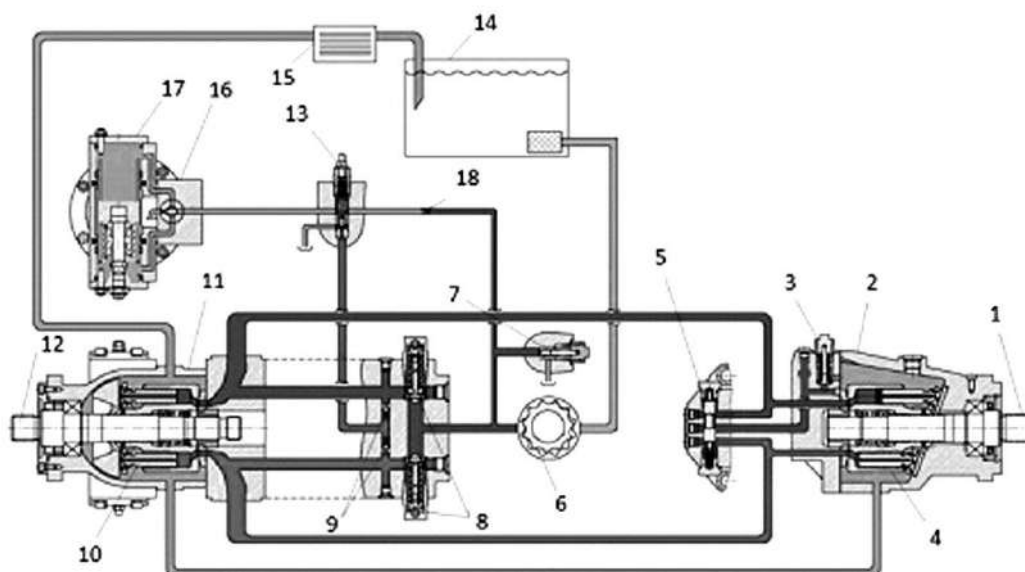


Рис. 3. Гідравлічна схема встановлення клапану: 1 – вал; 2 – гідромотор; 3 – клапан живлення; 4 – вузол підкачки; 5 – промивний клапан; 6 – насос підживлення; 7 – клапан підживлення; 8 – зворотньо-запобіжні клапани; 9 – зворотні клапани; 10 – вузол підкачки; 11 – гідронасос; 12 – вал; 13 – клапан відсічення; 14 – гідробак; 15 – теплообмінник; 16 – механізм сервокерування; 17 – розподільник; 18 – трубопровід

Джерело: розроблено авторами з використанням [1]

Для дослідження процесу роботи екскаватора з додатковим обладнанням виконали вимірювання температури гідравлічної та трансмісійної рідини з додатковим обладнанням, і без нього. Температури робочих рідин вказуються на комп'ютерній панелі екскаватора у кабіні машиніста. Вимірювання температур виконано при русі екскаватора на відстані 3 км від виробленого вибою до робочого (рис. 4).

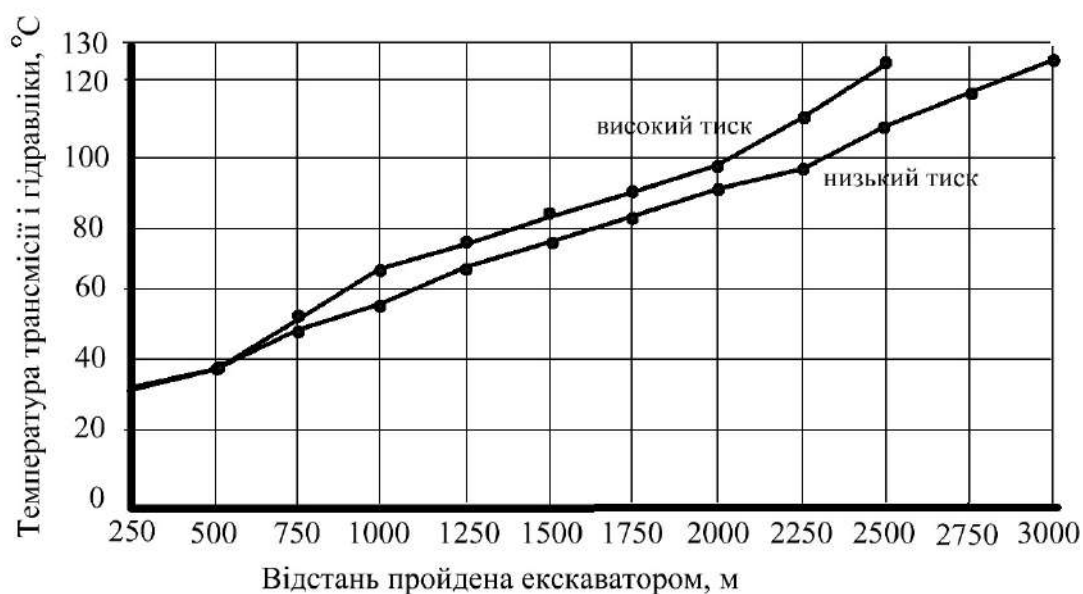


Рис. 4. Залежність температури при русі екскаватора без додаткового обладнання

Джерело: розроблено авторами

При випробуваннях екскаватора в режимі високої швидкості необхідно стежити за звуком ходового редуктора, оскільки екскаватор долає відстань, на яку ходове обладнання не розраховане, а це може призвести до руйнування блоку сателітів, тому при наявності зайвого шуму або критичного підвищення температури необхідно зупинити рух. На (рис. 4) наведено побудовані графіки залежності температури трансмісії і гідравліки від пройденої відстані екскаватором при високому і низькому тиску без додаткового обладнання на (рис. 5) з додатковим обладнанням. Треба відзначити, що при підвищенні температури (високий тиск) понад норму екскаватор було зупинено (див.рис.4 – 2500 м).

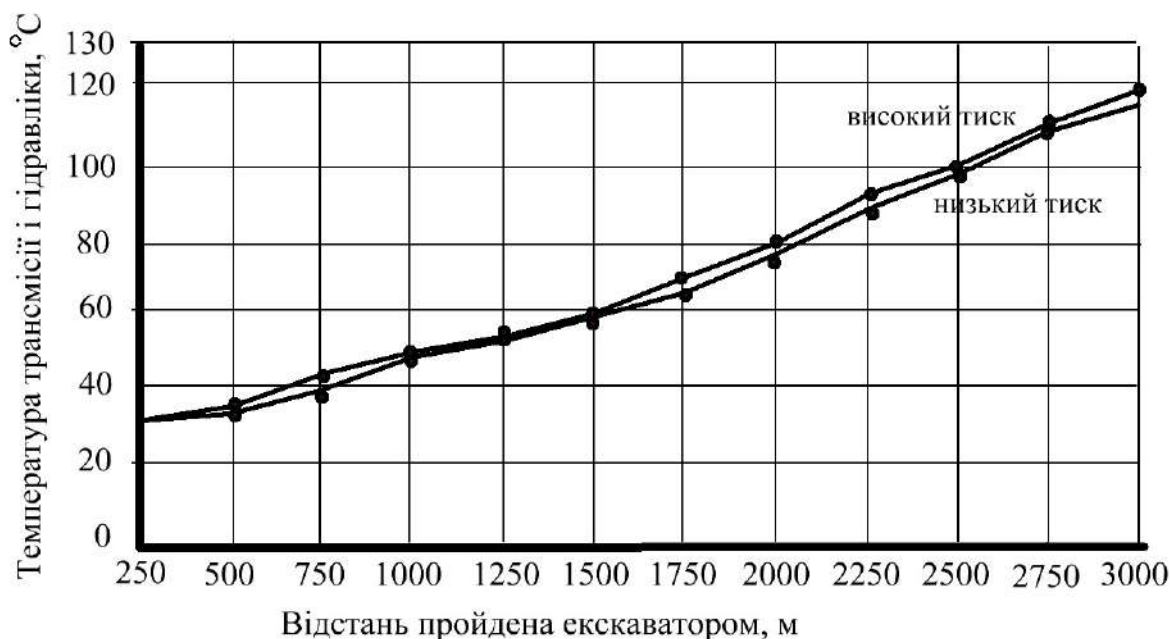


Рис.5. Залежність температури при русі екскаватора з додатковим обладнанням

Джерело: розроблено авторами

Проведення ходових випробувань екскаватора з додатковим обладнанням – промивний клапан, можна зробити висновки, що це є доцільним рішенням для оптимізації ходової частини, а саме її механізмів, гідромотора і редуктора ходу. Промивний клапан дозволяє знизити рівень температури трансмісійної та гідравлічної рідин, тим самим запобігти руйнуванню фрикційного механізму гідромотора та блоку сателітів редуктора ходу.

#### Висновки.

1. Підвищення продуктивності екскаваторів – актуальна і важлива задача задля збільшення видобутку корисних копалин та підвищення економічної самостійності України.

2. Спосіб зменшення забруднень гідравлічної системи дає можливість зменшити витрати підприємства на технічне обслуговування та ремонт.

3. Встановлення додаткового гідравлічного елемента не спотворює роботу гідравлічної системи, а, навпаки, – гарантує підвищення терміну експлуатації гідравлічних елементів.

4. Зниження максимальних робочих температур є напрямком удосконалення конструкції гідравлічних систем.

**Список використаних джерел**

1. CAT Parts Manual 349D2 Excavator. – Пеорія, Арізона :Caterpillar Intruder, 2014. – 1108 с.
2. Беркман, И. Л. Одноковшовые экскаваторы / И. Л. Беркман, А. В. Раннев, А. К. Рейш. – Москва : Машиностроение, 1964. – 358 с.
3. Горбатюк, Є. В. Робочі органи землерийних машин з роздільним потоком розвантаження / Є. В. Горбатюк // Науково-практичні проблеми моделювання та прогнозування надзвичайних ситуацій : зб. наук. статей. – Київ : МНС України, КНУБА, 1999. – Вип. 2. – С. 117-119.
4. Громадський, А. С. Проектування, формування та використання комплексів гірничорудного механізованого обладнання : навч. посіб. / А. С. Громадський, Ю. Г. Горбачов, О. С. Ліфенцов. – Кривий Ріг : КНУ, 2017. – 229 с.
5. Pourdarbani, R. Theoretical study to determine the proper injection system for upgrading fuel system of diesel engine om357 to common rail system / R. Pourdarbani, R. Aminfar // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – № 7(4). – P. 2594-2597. DOI : <http://doi:10.14419/ijet.v7i4.17364>.
6. Pugin, K. G. Improving the reliability of hydraulic systems of technological machines / K. G. Pugin // [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering](http://doi:10.1088/1757-899X/971/5/052042). – 2020. – Vol. 971: [Machine Science, Mechanization, Auotomatization and Robotics](http://doi:10.1088/1757-899X/971/5/052042). DOI : <http://doi:10.1088/1757-899X/971/5/052042>.
7. Havrysh, P. A. Manual «Features of metal structure repair by welding» [Osoblivosti metodiv remontu metalokonstrukcij zvaryuvannyam] / P. A. Havrysh. – Kramatorsk : DSEA, 2020. – 120 p.
8. Improvement of technology for repair of ore-bucket unloader metal structure working under cyclic loading / P. A. Gavrish, A.V. Perig, E. P. Gribkov, M. Yu. Dorokhov. // Advances in Materials and Processing Technologies. – 2021. – № 7(3). – P. 280-399. DOI : <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1805683>.
9. Edwards, D. A linear programming decision tool for selecting the optimum excavator / D. J. Edwards, H. Malekzadeh, S. B. Yisa // Struct. Surv. – 2001. – № 19(2). – P. 113-120. DOI : <https://doi.org/10.1108/EUM0000000005628>.
10. Ng, F. Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring / F. Ng, J. A. Harding, J. Glass // Mech. Syst. Signal Process. – 2016. – P. 816-831. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.06.006i>.
11. Power Matching and Energy Efficiency Improvement of Hydraulic Excavator Driven with Speed and Displacement Variable Power Source / L. Ge, L. Quan, X. Zhang, Z. Dong, J. Yang // Chin. J. Mech. Eng. – 2019. – № 32:100. – P. 9-12. DOI : <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0415-x>.
12. Ng, F. An eco-approach to optimise efficiency and productivity of a hydraulic excavator / F. Ng, J. A. Harding, J. Glass // Journal of Cleaner Production. – 2016. – № 112. – P. 3966-3976. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.110>.

**References**

1. CAT Parts Manual 349D2 Excavator. (2014). Peoria, Arizona: Caterpillar Intruder.
2. Berkman, I.L., Rannev, A.V. (1964). *Universal single-bucket excavators*. Moscow: Mashynobuduvannia.
3. Gorbatur, E.V. (1999). Working parts of earth-moving machines with separate flow of sanitatio. *Scientific and practical problems of modelling and forecasting of critical situations*, 2, 117–119.
4. Gromagskii, A.C., Gorbachev, Y.G., Lifentsov, O.S. (2017). *Design, molding and development of complexes for mining ore mechanized equipment*. Kryvyi Rih: KNU.
5. Pourdarbani, R., Aminfar, R. (2018). Theoretical study to determine the proper injection system for upgrading fuel system of diesel engine om357 to common rail system. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4), 2594–2597. <http://doi:10.14419/ijet.v7i4.17364>.
6. Pugin, K.G. (2020). Improving the reliability of hydraulic systems of technological machines. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 971, 052042. <http://doi:10.1088/1757-899X/971/5/052042>.
7. Havrysh, P.A. (2020). Features of metal structure repair by welding. Kramatorsk: DSEA.

8. Gavrish, P.A., Perig, A.V., Gribkov, E.P., Dorokhov, M.Yu. (2021). Improvement of technology for repair of ore-bucket unloader metal structure working under cyclic loading. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 7(3), 280–399. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1805683>.

9. Edwards, D.J., Malekzadeh, H., Yisa, S.B. (2001). A linear programming decision tool for selecting the optimum excavator. *Struct. Surv.*, 19(2), 113–120. <https://doi.org/10.1108/EUM0000000005628>.

10. Ng, F., Harding, J.A., Glass, J. (2016). Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring. *Mech. Syst. Signal Process.*, 816–831. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.06.006>.

11. Ge, L., Quan, L., Zhang, X., Dong, Zh. and Yang, J. (2019). Power Matching and Energy Efficiency Improvement of Hydraulic Excavator Driven with Speed and Displacement Variable Power Source. *Chin. J. Mech. Eng.*, 32(100), 9–12. <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0415-x>.

12. Ng, F., Harding, J.A., Glass, J. (2016). An eco-approach to optimise efficiency and productivity of a hydraulic excavator. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3966–3976. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.110>.

Отримано 21.09.23

UDC 62-82

**Pavlo Havrysh<sup>1</sup>, Vadim Usifov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> PhD in Technical Sciences, Professor of the Department Handling systems, Transport and Metallurgical machines  
Donbass State Engineering Academy  
(Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: [nauka.breda@gmail.com](mailto:nauka.breda@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9999-0099>  
ResearcherID: [AAX-4741-2020](https://orcid.org/0000-0001-9999-0099). Scopus Author ID: [7801588222](https://orcid.org/0000-0001-9999-0099)

<sup>2</sup> postgraduate of the Department Handling systems, Transport and Metallurgical machines Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: [vadim.yusifov.97@gmail.com](mailto:vadim.yusifov.97@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0201-4836>

## INCREASED PRODUCTIVITY OF EXCAVATOR CAT 349D2

The use of hydraulic excavators in mining is the adoption of a technological process. The creation of new designs and improvement of existing designs of mining equipment are needed to increase their productivity, durability, and operability. An analysis of research and publications of scientific articles showed that the topic for our research is relevant and important, not only for our country. Thus, scientists from Iran, Great Britain, China, India, and Belgium are researching ways and means of reducing contamination of hydraulic systems in order to increase the productivity, durability, and performance of excavators. However, such proposals from scientists as: installing total control over the quality of hydraulic fluids, changing the design of the excavator, measuring the wear of parts of the hydraulic system, etc. – are not always acceptable in practice.

For example, the installation of total control over the quality of hydraulic fluids entails the need for large investments in the development and creation of such control systems; to change the design of an excavator, not only design development and full-scale testing are required, but all such improvements are not possible at enterprises that operate excavators.

The purpose of the article is to improve the hydraulic system of the machine by installing additional equipment. Such equipment is designed to reduce the level of contamination of hydraulic fluid. There is no need for huge capital expenditures. This additional equipment was installed on the CAT 349D2. Studies of the thermal load on the excavator drive have been carried out. Research has shown the feasibility and reliability of installing additional equipment. Reducing the operating temperatures of the drive hydraulic fluid increases the productivity, durability, and operability of excavators.

A real reduction in the cost of maintenance and repairs of the drive allows you to reduce the cost of soil development and increases the competitiveness of the operating machine compared to new expensive machines.

**Keywords:** hydraulic system, transmission system, flush valve, excavator productivity, technical maintenance and repair, system temperature.

**Pavlo Protsenko**

PhD in Technical Sciences, senior lecturer of the Department of machine design,  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [pavloprocenko64@gmail.com](mailto:pavloprocenko64@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9390-0718>

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE SCREW PITCH OF THE SPIRAL GROOVE ON THE PROCESS OF PROFILING A SPIRAL TUBE BY ROLLER SPINNING**

*In this work, a numerical analysis, based on the finite element method, of the process of roller spinning of the spiral groove on the tube and the influence of its screw pitch on the stress-strain state of the tube in the zone of plastic deformation was carried out. The obtained graphical dependences of the influence of the screw pitch of the mandrel spiral groove on the maximum values equivalent strain  $\epsilon_i$  show that with a tenfold increase in the screw pitch of the spiral groove of the mandrel the maximum equivalent strain increases by 1.5 times. The increase in the equivalent strain is caused by a decrease in the width of the groove at large steps of its screw in a section that is perpendicular to the direction of the screw line, which reduces the size of the roller rounding radius that affects the dimensions of the local zone of plastic deformation of the tube.*

*The obtained results can be applied during the development of technology for the production of heat exchange surfaces for heat exchange devices with high efficiency coefficients (up to 40%).*

**Keywords:** spiral tube, spiral groove, roller spinning, heat exchanger, stress-strain state of the tube.

*Fig.: 10. References: 19.*

**Urgency of the research.** Today, the development of energy-saving technologies is an important task that contributes to reducing the consumption of energy resources, especially fossil fuels. This allows to increase the efficiency of the equipment, reduces harmful emissions into the atmosphere and dependence on non-democratic states, whose economy is usually based on the extraction of minerals.

One of the methods of energy saving is the use of secondary heat from a spent energy resource. For these purposes, heat exchange devices with specific heat exchange surfaces that intensify heat exchange processes are used [1-3].

The scope of application of such devices is quite wide. For the most part, they are used in power engineering, hot water supply and heating systems, refrigerating plants, a promising direction of use is in regenerators and gas heaters of gas turbine plants.

At the Department of Aircraft Production Technology of Education and Research Institute of Mechanical Engineering, work was carried out on the development of technology for the production of heat exchange surfaces of the heat exchanger (Fig. 1) for the heat regenerator of the gas turbine installation of the gas transportation system of Ukraine. The heat exchanger includes 33 spiral brass tubes with a diameter of 16 mm with a screw pitch of 8 mm and a depth of about 1 mm.



*Fig. 1 The heat exchanger, developed at the department of Aircraft Production Technology of Education and Research Institute of Mechanical Engineering [4]*

Studies of the heat exchange of spiral tubes have shown [1-4] that they provide a two-fold increase in the intensity of heat exchange compared to a smooth tube, while it should be noted that the aerodynamic resistance also increases by 5-10 times.

**Target setting.** The production of heat exchange devices requires the development of a simple, waste-free, productive and low-cost manufacturing technology for their heat exchange surfaces.

**Actual scientific researches and issues analysis.** The roller spinning processes and heat exchange of corrugated tubes are considered in works [5-9]. Turbulization of the flow flowing in the middle of the spiral tube depends on the ratio of the depth of the spiral groove in relation to the diameter of the tube. Intensification of heat exchange is achieved due to the creation of a turbulent vortex in the middle of the tube, which mixes the wall layers and the central layers of the coolant. Research has shown [9] that at ratio values  $e/D > 0.6$  (Fig. 2) the increase in resistance to coolant flow is twice as great as the increase in heat transfer in the tube.

In work [10], to achieve optimal values for the increase in heat transfer intensity in relation to the growth of the aerodynamic resistant, it is recommended to turbulize the wall ball with a thickness of up to 5% of the radius of the tube. Further research [4] showed that the optimal geometric parameters of a spiral tube are: depth  $h = 1.0 \dots 1.5$  mm and the width of the spiral grooves  $t = 8 \dots 12$  mm (Fig. 2).

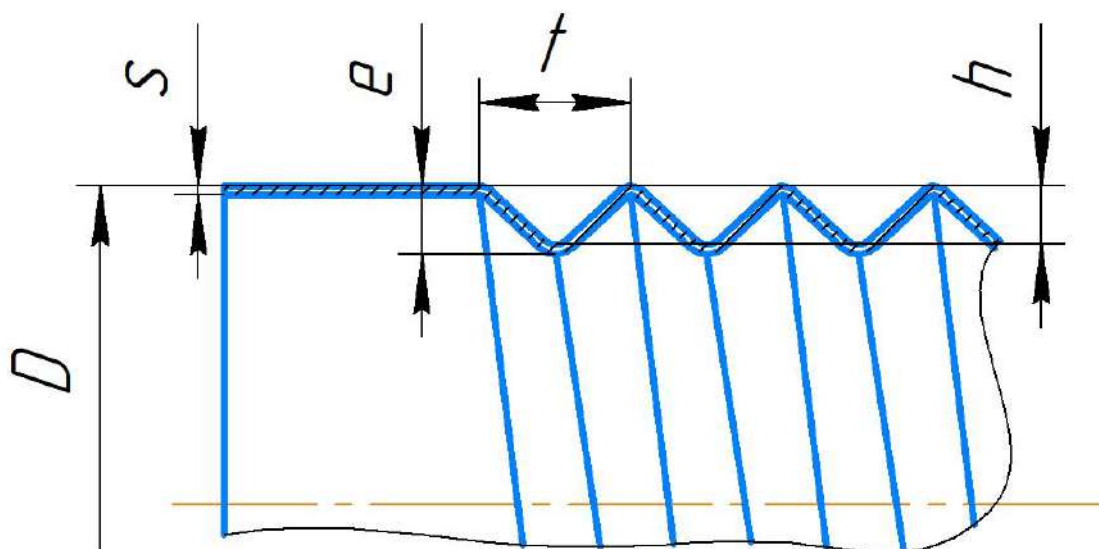


Fig. 2 Geometrical parameters of a spiral tube

In addition to the roller spinning process, hydroforming is also used to obtain profiled tubes. The process of hydroforming is performed by creating a high pressure liquid in the chamber where the tube is placed, due to which plastic deformation of the tube occurs in accordance with the template in which or on which it was installed. In works [11-13], the processes of hydroforming of bellows and spiral stainless steel tubes are considered. Research on the hydroforming of steel tubes [13] with a wall thickness of 5 mm at various temperatures for this process (22-800°C) showed that an increase in the process temperature by 100°C provides a pressure drop of 100 MPa, which makes the hydroforming process much easier. In the cited works [11-13], during the hydroforming process, a change in the thickness of the tube wall is observed in local areas with the maximum equivalent strain.

In National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, work was carried out on the development of the technology of manufacturing such products by methods of hydroforming [4, 14] and roller spinning [4, 15-16]. Precisely the roller spinning method (Fig. 3) produced the tubes, photos of which are shown in Fig. 4.





*Fig. 3. The process of manufacturing a spiral corrugated tube by the method of roller spinning on the 16K20 screw lathe [4]*

The process of roller spinning of spiral tubes is performed in two stages [4]:

- pressing the roller into the tube;
- rotation of the tube with the roller pressed into it.



*a)*



*b)*

*Fig. 4 Spiral corrugated tubes: a - brass (it is a component of the heat exchanger shown above) with a screw pitch of 8 mm and a diameter of 16 mm; b - made of X18H10T(AISI 304) steel with a screw pitch of 12 mm and a diameter of 38 mm [4].*

The analysis of the roller spinning process of spiral corrugated tubes can be performed on the basis of its first stage. This is due to the fact that the spiral profile on the tube is formed as a result of the thinning of its wall and the dent is formed the same way, when the roller is pressed into the tube at the first stage.

In the process of developing the technology for manufacturing such products by roller spinning, it is important to choose such process parameters that make it possible to reduce the equivalent strain in the local zone of plastic deformation of the tube, which makes it possible to ensure the quality of the product, namely the absence of cracks.

To implement the roller spinning process, you can use a screw lathe with special equipment, which is named a rolling head that is fixed in the cutter holder or on the machine's support. The implementation of the hydroforming process requires the purchase of press equipment with a special stamp with an integrated high-pressure fluid control system. The simpler implementation of the process of roller spinning of tubes and the ability to perform profiling of long tubes (more than 2 m) [17] by using this process were the main reasons why this process was studied rather than hydroforming.

Both experimental and numerical studies were carried out on the process of roller spinning of spiral corrugated tubes, the results of which are shown in the papers [4, 18]. The process of

roller spinning of the tubes from stainless steel X18H10T (AISI 304) and aluminum-2017 was researched.

Experimental studies of the roller spinning process of tubes were performed by measuring the microhardness of points in cross-sections of formed grooves on the tubes. Local sections of the tube, where plastic deformation occurs, are strengthened as a result of strain hardening and, accordingly, the hardness of the metal in these sections increases. Using the G. Del's experimental-analytical approach [19], the hardness distribution in the cross section of the groove formed on the tube was recalculated into an equivalent stress distribution according to the following dependence:

$$\sigma_i = K \cdot HV, \tag{1}$$

where  $K = 0,3$  (for steel [19]),  $HV$  is Vickers hardness. The results of the microhardness experimental study of the groove sample of the spiral tube with the screw pitch of 8 mm are shown in Fig. 4, a.

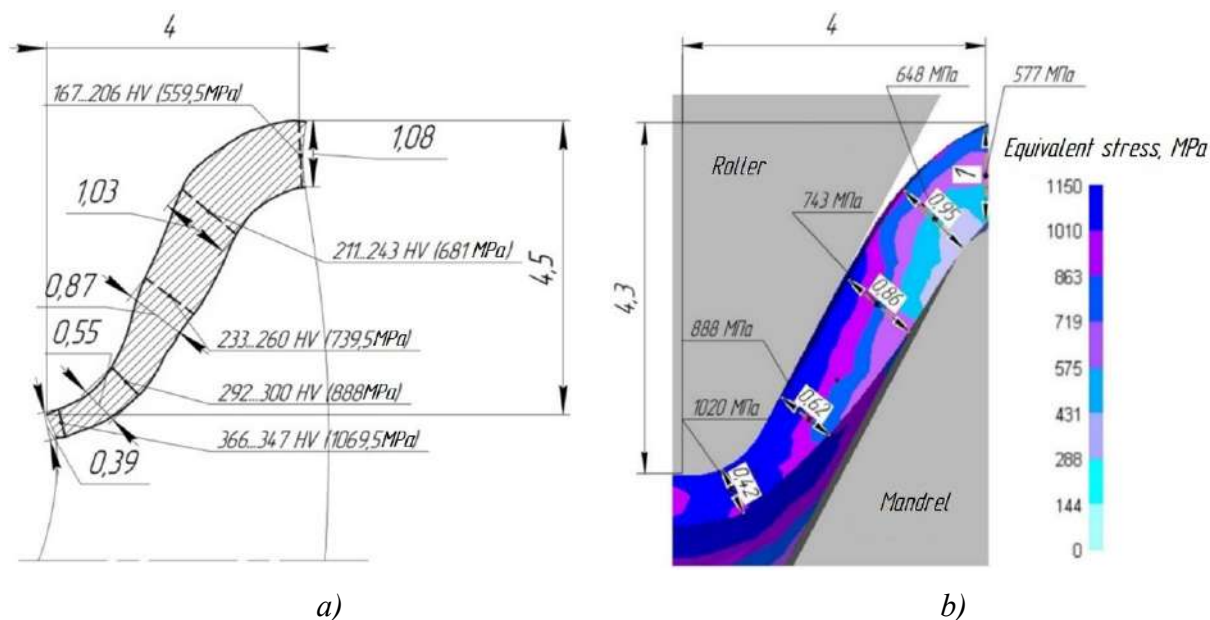


Fig. 4 Equivalent stress distributions in the cross section of the groove: a) experiment, b) simulation in DEFORM 3D

Numerical studies were performed in the DEFORM 3D program using the finite element method (Fig. 5). Modelling of roller spinning of a spiral stainless steel (AISI-304) tube stainless steel, the hardening curve of which is shown in Fig. 6 with a screw pitch of 8 mm showed similar results (see Fig. 4, b) of the equivalent stress distribution in relation to the experimental results (see Fig. 4, a). The created model of the roller spinning process of spiral tube in the specified program reproduces this process with permissible accuracy (the error is about 6...10%).

By means of numerical modelling in previous studies [4, 18], it was established that the greatest influence on the process of roller spinning of a spiral tube has the next parameter ratios: the relative radius of rounding of the roller  $r/t$  and the relative depth  $h/t$ .

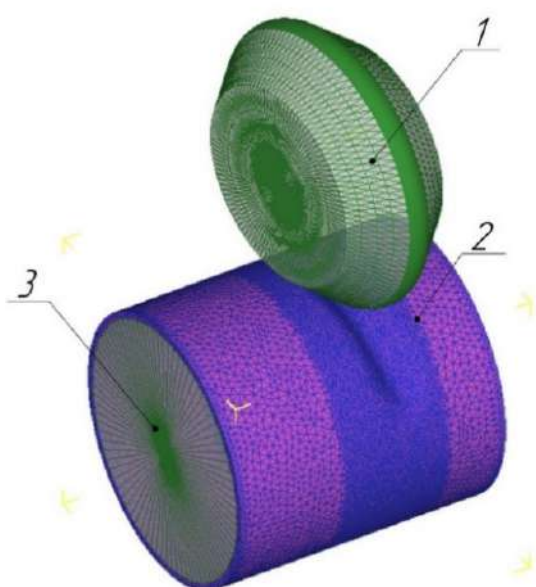


Fig. 5 Model of the roller spinning process of a spiral tube : 1 – roller, 2 – tube, 3 – mandrel

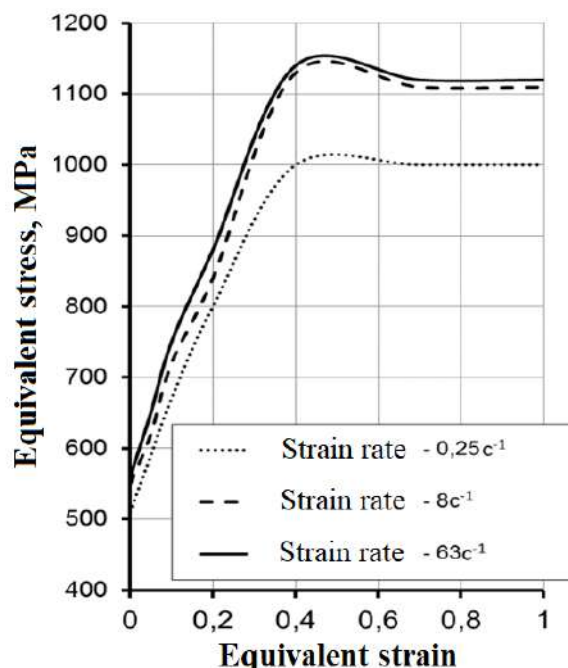


Fig. 6 Hardening curve of AISI 304 steel

In order to minimize values of the equivalent strain in the local section of the tube, the specified ratio of parameters should be limited:  $h/t \leq 0.4$ ,  $r/t \geq 0.25$ . Other parameters, such as  $D_r/D$  and the number of roller passes  $j$ , for which the final profile of the spiral groove is obtained, have a smaller effect on the progress of the roller spinning process. When implementing the roller spinning process, it is recommended to take the diameter of the roller as:

$$D_r = 3D, \tag{2}$$

where  $D$  is the diameter of the tube.

Due to the use of large-diameter rollers ( $D_r \geq 100$  mm), the local degree of tube deformation can be reduced. This happens due to an increase in the contact area of the roller with the tube, which increases the area of the local area of the tube where plastic deformation occurs [18].

**Uninvestigated parts of general matters defining.** In previous works [4, 18], numerical and experimental studies were conducted on the production of tubes with the width of the spiral grooves and their screw pitch: 6, 8, 12, and 20 mm. A study of the roller spinning process at large screw pitches of spiral grooves was not conducted.

**The research objective.** To analyze of the influence of the screw pitch of the spiral groove on the stress-strain state of the tube in the zone of plastic deformation in the process of rolling spinning.

**The statement of basic materials.** A series of numerical simulations was performed to study the stress-strain state of a screw groove on a tube with a large screw pitch during the roller spinning process. In each numerical simulation, the following kinematic parameters were set:

- the rotation frequency of the tube with the mandrel:  $n_1 = 160$  rpm;
- the rotation frequency of the roller, depending on the rotation frequency of the tube with

the mandrel and the depth of the formed groove:  $n_r = \frac{n_1 \left( \frac{D}{2} - h \right)}{R_r}$ , where  $R_r$  is the roller radius;

radius;

- the speed of the roller's longitudinal movement:  $V_r = \frac{tn_1}{60}$ .

The mechanical characteristics of the tube material corresponded to AISI 304 steel according to Fig. 6. Tube geometry: outer diameter –  $D = 38$  mm, thickness –  $s = 1$  mm, width of the formed groove –  $t = 8$  mm. The roller diameter was  $D_r = 40$  mm. An important parameter in the roller spinning process is the rounding radius of the roller, which is determined by the parameters of the formed screw groove (Fig. 7) and its helix angle. The optimal rounding radius of the roller can be calculated using the following dependence:

$$r = \cos\left(\arctg\left(\frac{k}{\pi D_m}\right)\right) \sqrt{\left[\left(\frac{t}{2} - \frac{s}{\cos\left(\frac{\gamma_g}{2}\right)}\right)^2 + \left[\left(\frac{t}{2} - \frac{s}{\cos\left(\frac{\gamma_g}{2}\right)} - h^2\right) / 2h\right]^2}\right.}, \quad (3)$$

where  $k$  is the groove screw pitch;  $D_m$  is the mandrel diameter;  $t$  is the groove width;  $s$  is the tube thickness;  $\gamma_g$  is the angle between the side walls of the groove of the mandrel;  $h$  is the depth of the formed groove on the tube.

The tube was divided into a grid of finite tetrahedral elements. In the local deformation zone of the tube, the dimensions of the elements were 0.4 mm. According to the work [4], this size of elements ensures sufficient accuracy of calculations.

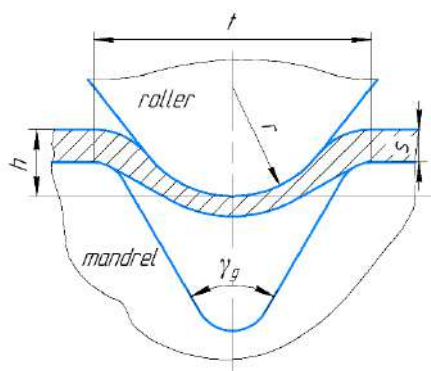


Fig. 7 Geometric parameters of the cross section of the spiral groove

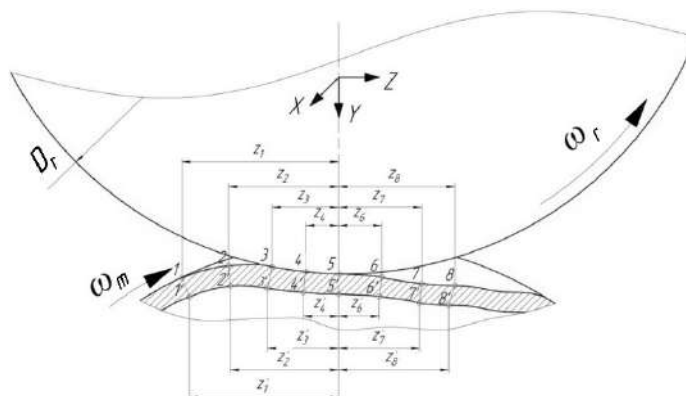


Fig. 8 Points along the z axis and their coordinates in the tube cross-section, which were used to analyze the roller spinning process of a spiral tube

To analyze the roller spinning process, points were selected in the tube cross-section in accordance with Fig. 8, in each of which the stress-strain state was analyzed. Graphs of the distribution of equivalent stress  $\sigma_i$  and strains  $\epsilon_i$  were drawn up based on the values of the stress-strain state at selected points, which were further approximated by a quadratic dependence.

An example of the graph of the distribution of the equivalent strain  $\epsilon_i$ , which was used in the further analysis of the influence of the screw pitch of the spiral groove on the stress-strain state on the inner surface of the tube, is shown in Fig. 9.

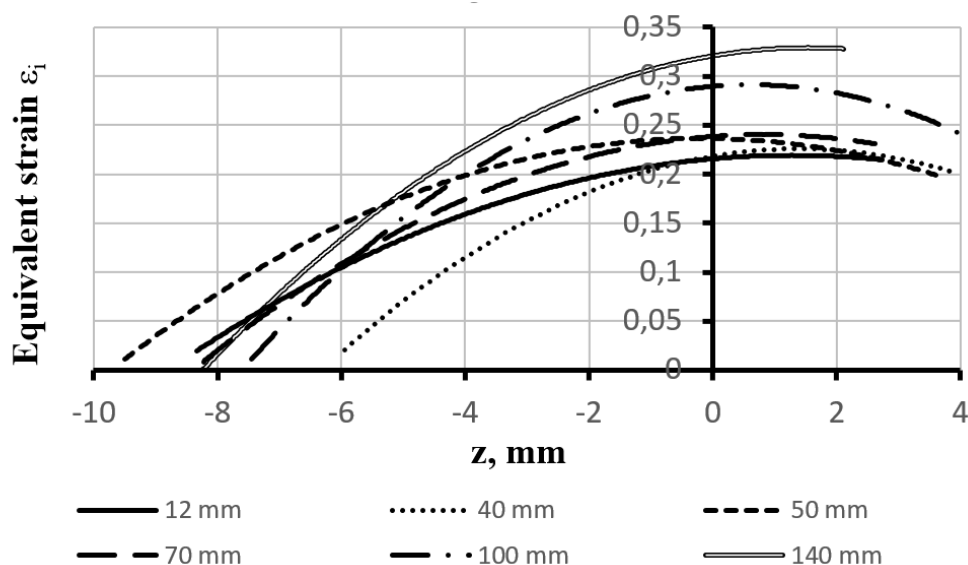


Fig. 9 Distributions of the equivalent strain  $\epsilon_i$  on the inner surfaces of the tubes in the process of roller spinning at different values of the screw pitch of the grooves

Further analysis of the roller spinning process was carried out on the basis of the graphs of the influence of the pitch of the spiral groove formed on the tube on the maximum values of the equivalent stress and strain (Fig. 10). These graphs were obtained from the equivalent stress and strain distributions graphs, as shown in Fig. 9.

Shown in Fig. 10 dependences, especially the dependences of the equivalent strain on the screw pitch of the spiral groove can be used during the development of the roller spinning technology of spiral tubes. As can be seen from the graphs in fig. 10-b, when developing the roller spinning technology of a tube, it is desirable to limit the value of the screw pitch in relation to the width of the groove  $k/t < 8$ .

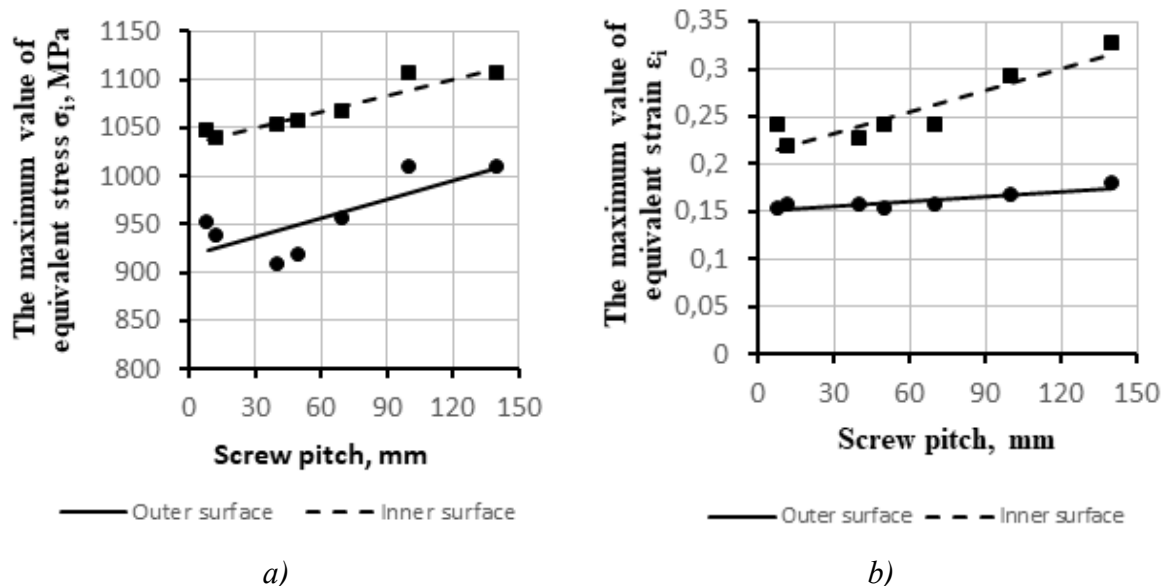


Fig. 10 The influence of the screw pitch of the spiral groove on the maximum values of: a) equivalent stress, b) equivalent strain

Further research is aimed at obtaining analytical dependencies of the influence of the geometric parameters of the tools and the kinematic parameters of the roller spinning process on the maximum values of equivalent stress and strain in the local zone of plastic deformation of the tube.

**Conclusions:** 1. The process of roller spinning of a tube with the formation of a spiral groove on it takes place due to the thinning of its wall. To intensify this process, it is necessary to increase the local zone of plastic deformation. This can be achieved by using a roller with an optimal rounding radius, which can be determined from the geometrical conditions of the spiral groove of the mandrel by formula (3).

2. An analysis was carried out of the influence of the screw pitch of a spiral groove with a width of  $t = 8$  mm, formed on a tube with a diameter of 38 mm and a thickness of 1 mm, on the stress-strain state of the tube. The obtained dependences of the maximum values of the equivalent stress and strain (Fig. 10), from which it can be seen that with a large screw pitch of the spiral groove, the value of the equivalent strain increases. With a 10-fold increase in the screw pitch of the spiral groove, the equivalent strain increases by 1.5 times. Therefore, when performing the process of roller spinning a one-groove tube, it is desirable to make the pitch of its spiral groove equal to the groove width  $t$ .

3. In the process of profiling multi-grooves tubes, a large number of grooves and, accordingly, their larger screw pitch causes an increase in the equivalent strain (Fig. 10, b) in the zone of local plastic deformation, which is associated with a decrease in the roller rounding radius. Therefore, when developing the technology of manufacturing spiral tubes by roller spinning, it is desirable to take into account the limitation of  $k/t < 8$ .

### References

1. Теплообмен и аэродинамика пакетов винтообразных труб с равноразвитой поверхностью / [Е. Н. Письменный, В. А. Рогачев, А. В. Баранюк та ін.]. // Современная наука. Исследования, идеи результаты, технологии. – 2013. – №1(12). – С. 13-18.
2. Розробка рівнорозвинених поверхонь теплообміну для регенераторів теплоти ГТУ газотранспортних систем і дослідження їх теплоаеродинамічних характеристик : звіт про НДР (заключ.) НТУУ "КПІ" / кер. роб. Є. М. Письменний. – Київ, 2013. – 206 с.+CD-ROM. – Д/б №2538-п.
3. Письменный Е. Н. Равноразвитые поверхности теплообмена и методика численных исследований их гидравлических характеристик / Письменный Е. Н., Баранюк А. В., Вознюк М. М. // Промышленная теплотехника. – 2012. – Т. 34, №1. – С. 45-54.
4. Розробка технології та обладнання для профілювання гвинтоподібних та ребристих труб та створення високоефективних теплообмінників : звіт про НДР (заключ.) НТУУ "КПІ" / кер. роб. М. І. Бобир. – Київ, 2017. – 313 с.+CD-ROM. – Д/б №2925-п.
5. Sadighi Dizaji H. Experimental studies on heat transfer and pressure drop characteristics for new arrangements of corrugated tubes in a double pipe heat exchanger / H. Sadighi Dizaji, S. Jafarmadar, F. Mobadersani // International Journal of Thermal Sciences. – 2015. – Vol. 96. – С. 211-220. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.05.009
6. Ball Spin Forming for Flexible and Partial Diameter Reduction in Tubes / [S. Hirama, T. Ikeda, S. Gondo та ін.]. // Metals. – 2020. – Vol. 10 (12), 1627. DOI: 10.3390/met10121627
7. Euvazian, A. Experimental Study of Corrugated Metal-composite Tubes under Axial Loading / A. Euvazian, H. Mozafari, A. M. S Hamouda // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 173. – С. 1314-1321. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.169
8. Use of corrugated pipe heat exchangers in waste heat recovery steam generators / [S. Nayak, S. Jena, A. Sharique S. Khan та ін.] // Materials Science and Engineering : IOP Conf. Series. – 2021. – Vol.1123. – С. 1-12. DOI:10.1088/1757-899X/1123/1/012037
9. Eiamsa-ard S. Counter-rotation vortex flows and heat transfer mechanisms in a V-spirally-corrugated tube / S. Eiamsa-ard, P. Promthaisong // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. – 2019. – Vol. 233(7). – С. 821-958. DOI:10.1177/0957650919829367
10. Калинин, Э. К. Интенсификация теплообмену в каналах / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Ярхо. – Москва : Машиностроение, 1990. – 199 с.
11. Changshuai Shi External high-pressure forming of metal spiral tube of equal wall thickness / Changshuai Shi, Jinping Li, Juan Deng, Xiaohua Zhu // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 235(2). – С. 151-656. DOI:10.1177/0954408920967786

12. Paunoiu, V. Numerical study of tube hydroforming technology / V. Paunoiu, O. Ciocan, D. Nicoara // *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*. – 2010. – Vol. II. No. 1. – P. 67-72.
13. Shi, C. Research on Hydroforming Micro-Sized Spiral Pipe With Equal Wall Thickness [Electronic resource] / Changshuai Shi, Jinping Li, Xiaohua Zhu // *Research Square*. – 2021. — Access mode: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-694676/v1>.
14. Патент 85412 UA, МПК В 21 D 15/00. Штамп для формування канавок на трубі / В. О. Маковей, П. Ю. Проценко (UA) – № u201301239; заявл. 01.02.2013; опубл. 25.11.2013, Бюл. №22.
15. Патент 60663 UA, МПК В 21 D 15/00. Спосіб формування гвинтових канавок на трубчастих тонкостінних заготовках роликковим обкочуванням з використанням внутрішнього протитиску / В.О. Маковей, Ю. П. Бородій П. Ю. Проценко А. В. Кліско. – № u201014396; заявл. 01.12.2010; опубл. 25.06.2011, Бюл. 12.
16. Патент на корисну модель №107828 UA, МПК В21D 15/00. Спосіб профілювання довгомірних гвинтоподібних труб / М. І. Бобир, В. О. Маковей, В. С. Мельник. – № u201512274; заявл. 11.12.15; опубл. 24.06.16, Бюл. № 12.
17. Маковей В. О. Удосконалення технологічного процесу виготовлення трубок з гвинтоподібним профілем / В. О. Маковей, В. С. Мельник // *Обработка материалов давлением*. – 2015. – № 1 (40). – С. 81-84.
18. Маковей, В. О. Профилирование винтообразных труб теплообменников / В. О. Маковей, М. І. Бобир, П. Ю. Проценко. – Балті : LAP Lambert Academic Publishing, 2017. – 226 с.
19. Дель, Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. – Москва : Машиностроение, 1971. – 200 с.

#### References (in language original)

1. Pysmennyi, Y., Rohachev, V., Baraniuk, O., Reva, S., Panasiuk, A. (2013). Heat transfer and aerodynamics of spiral corrugated tubes packages with the uniformly developed surface. *Modern science. Research, ideas, results, technologies*, 1(12), 13-18.
2. Pysmennyi, Y. (2013). Development of uniformly developed heat exchange surfaces for heat regenerators of gas turbine installations of gas transportation systems and research of their thermo-aerodynamic characteristics: report on research work (final). National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, Tech. Rep. 2538-П, 2013.
3. Pysmennyi, Y., Baraniuk, O., Vozniuk, M. (2012). Uniformly developed heat exchange surfaces and methods for numerical studies of their hydraulic characteristics. *Industrial Heat Engineering*, 34(1), 45-54.
4. Bobyr, M. (2017). Development of technology and equipment for profiling spiral corrugated and finned tubes and creating highly efficient heat exchangers: report on research work (final). National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, Tech. Rep. 2925-П, 2017.
5. Sadighi Dizaji, H., Jafarmadar, S., Mobadersani, F. (2015). Experimental studies on heat transfer and pressure drop characteristics for new arrangements of corrugated tubes in a double pipe heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, 96, 211-220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.05.009>.
6. Hirama, S., Ikeda, T., Gondo, S., Kajikawa, S., Kuboki, T. (2020). Ball Spin Forming for Flexible and Partial Diameter Reduction in Tubes. *Metals*, 10(12), 1627. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10121627>.
7. Eyvazian, A., Mozafari, H., Hamouda, A.M.S. (2017). Experimental Study of Corrugated Metal-composite Tubes under Axial Loading. *Procedia Engineering*, 173, 1314–1321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.169>.
8. Nayak, S., Jena S., Khan, A.S.S., Paswan, M.K., Sharma, V. K. (2021). Use of corrugated pipe heat exchangers in waste heat recovery steam generators. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1123, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1123/1/012037>.
9. Eiamsa-ard, S., Promthaisong, P. (2019). Counter-rotation vortex flows and heat transfer mechanisms in a V-spirally-corrugated tube. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 233(7), 821-958. DOI: <https://doi.org/10.1177/0957650919829367>.
10. Kalinin, E., Dreytser, G., Yarho, S. (1990). Intensification of heat transfer in channels. Moscow: Mashinostroenie.
11. Shi, C., Li, J., Deng, J., Zhu, X. (2021). External high-pressure forming of metal spiral tube of equal wall thickness. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 235(2), 151-656. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954408920967786>.

12. Paunoiu, V., Ciocan, O., Nicoara, D. (2010). Numerical study of tube hydroforming technology. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, II(1), 67-72.
13. Shi, C., Li, J., Zhu, X. (2021). Research on Hydroforming Micro-Sized Spiral Pipe With Equal Wall Thickness. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-694676/v1>.
14. Protsenko, P., Makovei, V. (2013). Stamp for forming grooves on the tube. UA Patent 85412, Nov. 25, 2013.
15. Makovei, V., Protsenko, P., Borodii, Yu., Klisko, A. (2011). The method of forming spiral grooves on thin-walled tubular blanks by roller spinning using internal back pressure. UA Patent 60663, Jun. 25, 2011.
16. Bobyr, M., Makovei, V., Melnyk, V. (2016). The method of profiling long spiral corrugated tubes. UA Patent 107828, Jun. 24, 2016.
17. Makovei, V., Melnyk, V. (2015). Improvement of the technological process of manufacturing tubes with the spiral corrugated profile. *Materials working by pressure*, 1(40), 81-84.
18. Makovei, V., Bobyr, M., Protsenko, P. (2017). Profiling of spiral corrugated tubes of heat exchangers. Balti: LAP Lambert Academic Publishing.
19. Del, H. (1971). Determination of stresses in the plastic region by hardness distribution. Moscow: Mashinostroenie.

Отримано 18.09.2023

UDC 621.88.082.8

### Павло Проценко

К.т.н. кафедра конструювання машин, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [pavloprocenko64@gmail.com](mailto:pavloprocenko64@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9390-0718>

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВЕЛИЧИНИ КРОКУ ГВИНТОВОЇ КАНАВКИ НА ПРОЦЕС ПРОФІЛЮВАННЯ ГВИНТОПОДІБНОЇ ТРУБИ ОБКОЧУВАННЯМ РОЛИКОМ

В даній роботі проводився аналіз процесу роликкового обкочування гвинтової канавки на трубі та впливу її кроку гвинта на напружено-деформований стан труби в зоні пластичної деформації.

Процес роликкового обкочування, на ряду із гідроформуванням, є перспективною технологією виготовлення поверхонь з високими теплоаеродинамічними характеристиками, на базі яких можна розробити теплообмінні апарати з високими коефіцієнтами корисної дії (біля 40%). Розробка високоефективних теплообмінних апаратів позитивно вплине на споживання енергоресурсів, що, відповідно, зменшить витрати на функціонування системи, яка пов'язана з теплообмінним апаратом, знизить шкідливі викиди в атмосферу та залежність від недемократичних держав, які зазвичай будують свою економіку на основі видобутку корисних копалин.

Створена чисельна модель, на базі методу скінчених елементів, процесу обкочування гвинтоподібної труби дала можливість виконати аналіз впливу величини кроку гвинта гвинтової канавки оправки на розподіл напружено-деформованого стану труби в зоні її пластичної деформації. Для виконання процесу обкочування труби в чисельній моделі використаний ролик з оптимальним радіусом скруглення, що визначався по залежності, яка враховує геометрію гвинтової канавки оправки та її кут підйому гвинтової лінії.

Отримані графічні залежності впливу кроку гвинта гвинтової канавки оправки на максимальні величини інтенсивності напружень  $\sigma_t$  та деформацій  $\epsilon_t$  показують, що зі збільшенням кроку гвинта гвинтової канавки без зміни її геометричних параметрів, в першу чергу ширини, збільшуються максимальні величини інтенсивності напружень  $\sigma_t$  та деформацій  $\epsilon_t$ . Більш важливо знати характер росту інтенсивності деформацій, як фактор оцінки можливості вичерпання пластичності матеріалу. При десятикратному збільшенні величини кроку гвинта гвинтової канавки оправки максимальна величина інтенсивності деформацій зростає в 1,5 рази. Ріст величини інтенсивності деформацій спричинений тим, що при більших значеннях кроку гвинта гвинтової канавки відбувається зменшення її ширини в перерізі, який перпендикулярний до напрямку гвинтової лінії. Це впливає на величину радіусу скруглення ролика, який може бути використаний в процесі обкочування труби, та на розміри локальної зони пластичної деформації труби.

Отримані результати можуть бути застосовані під час розробки технології виготовлення гвинтоподібних труб обкочуванням роликом.

**Ключові слова:** гвинтоподібні труби, гвинтова канавка, обкочування роликом, теплообмінники, напружено-деформований стан труби

Рис.: 10. Бібл.: 19.



## РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-121-129

УДК 004.451.84

*Антон Костюк<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>аспірант, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [1999kostyukanton@gmail.com](mailto:1999kostyukanton@gmail.com)

### МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ІНТЕРАКТИВНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ

*В статті розглядаються сучасні методи підвищення ефективності проектування інтерактивних інтерфейсів, продемонстровано використання покращеного методу аналізу зв'язків для проектування сучасних інтерфейсів завдяки новітнім технологіям.*

*Стаття присвячена проблемі проектування сучасних інтерактивних інтерфейсів. З високим зростанням використання програмних додатків та веб-сервісів, які вимагають зручних та легко зрозумілих інтерфейсів, важливість оптимального проектування стає критичною. У статті розглядаються різні підходи до покращення якості інтерактивних інтерфейсів. Перш за все, досліджуються методи визначення потреб користувачів та їхніх очікувань, такі як проведення спостережень. Опрацьовано питання ергономіки та юзабіліті використовуваних методів. Особливу увагу приділено можливостям покращеного методу аналізу посилань. Також велику увагу приділяється алгоритмам і методам, які спрощують процес розробки інтерактивних інтерфейсів, зокрема використанню патернів проектування та фреймворків. Досліджуються методи автоматизованої верифікації інтерфейсів для виявлення можливих проблем та помилок ще на ранніх етапах розробки.*

*Загалом, стаття надає комплексний огляд методів та алгоритмів, що сприяють підвищенню ефективності проектування інтерактивних інтерфейсів, та акцентує на важливості врахування потреб та зручності користувачів у процесі розробки програмних продуктів.*

**Ключові слова:** інтерфейси, проектування, традиційний метод аналізу зв'язків, вдосконалений метод аналізу зв'язків.

*Рис.: 5. Бібл.: 7. References: 7.*

**Актуальність теми дослідження.** На сьогодні з ускладненням та збільшенням функціональності систем засоби людино-машинної взаємодії стають вузьким місцем через те, що не можуть забезпечити інтерактивний діалог з користувачем із необхідною ефективністю. На відміну від традиційних інтерфейсів на основі клавіатури та миші або традиційних методів аналізу зв'язків, сучасні системи забезпечують гнучкіше використання потоків інформації. Це дає можливість людині вибирати найбільш зручний спосіб передачі або прийому інформації.

Залежно від використаних вхідних та вихідних даних виділяють кілька основних типів інтерфейсів (мова + жести, мова + читання по губах, напрям погляду + вказівка + мова і т.д.). Також виділяють інтерактивні та неінтерактивні інтерфейси. У неінтерактивних інтерфейсах процес виконання завдання визначено заздалегідь, і користувач не може на нього вплинути, наприклад, при автоматичному транскрибуванні записів (засідань, семінарів), автоматичному індексуванні мультимедійних даних (радіо, телевізійних новин). Навпаки, в інтерактивних інтерфейсах користувач під час діалогу з машиною отримує необхідний йому сервіс і сам визначає хід роботи програми. Прикладами таких програм є інтерактивне телебачення, довідкові діалогові системи, управління технічними системами, інформаційна підтримка нарад.

В даний час при розробці програмного продукту дуже важлива швидкість обробки інформації, доступність, зберігання та передача. Однак, не малу роль відіграє створення інтерфейсу користувача, так як саме він визначає, наскільки легко та зручно буде користуватися програмою. Інтерфейс користувача являє собою сукупність використовуваних у програмі

засобів введення даних, способів відображення інформації та елементів управління. Ефективність роботи програмного продукту визначається не тільки функціональними можливостями, а й доступністю цих можливостей. Тому створення інтуїтивно-зрозумілого інтерфейсу є важливим завданням при розробці програмного продукту. Актуальність цієї теми полягає у тому, що саме інтерфейс бачить користувач і саме за інтерфейсом він оцінює весь продукт.

**Постановка проблеми.** Традиційний метод аналізу зв'язків недостатній для оцінки перехідних витрат, пов'язаних із доступністю виділення певного елемента керування на інтерфейсі, а таблиця посилань, яка зазвичай використовується, не містить інформації про напрямки для оцінки складності. Для вирішення цих двох проблем в статті пропонується метод для підвищення ефективності проектування інтерактивних інтерфейсів, бо саме аналіз є одним із найбільш широко використовуваних методів проектування інтерфейсу користувача для розміщення елементів керування на інтерфейсі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним з найбільш поширених способів підвищення є традиційний метод аналізу зв'язків. Він є кількісним і об'єктивним методом дослідження зв'язків між компонентами інтерфейсу, який можна використовувати для оптимізації розташування компонентів та спрямований на покращення дизайну інтерфейсу шляхом вивчення вмісту завдання, характеристик кожного окремого компонента інтерфейсу та зв'язків між ними. Вартість кожної операції в завданні кількісно визначається значенням зв'язку, і значенням зв'язку може бути функція важливості, частоти, відстані, складності або інших характеристик руху між двома елементами. Попередні дослідження, пов'язані з посиланнями, пропонували різні методи аналізу посилань, коли цільові інтерфейси мали різні функції та коли оператор виконував різні завдання.

Поведінка та інформаційні технології спричиняє непослідовність в оцінці зручності використання. Навіть за однакової базової методології результат оцінювання юзабіліті може бути дуже різним через відмінності у виборі завдань і налаштувань вмісту для оцінювання. Ситуація, в якій оператору потрібно виконати процедурні операції, значно відрізнялася від ситуації, коли користувач міг довільно виконувати певні дії для досягнення кінцевої мети. Варіативність, пов'язана з типами інтерфейсів користувача та характером завдань, передбачає, що для аналізу зв'язків застосовані інтерфейси мають визначатися властивостями попиту (фізичними або когнітивними), характеристиками представлення (фіксованими або динамічними) та очікуваною поведінкою користувачів (процедурною або випадковою). Якщо властивості попиту, функції представлення та очікувана поведінка користувача цільового інтерфейсу не визначені чітко, вартість може бути недійсною для оцінки зручності використання цільового інтерфейсу. Тобто використовувалася комп'ютерна програма для автоматичного розподілу елементів керування та відображення в інтерфейсі користувача (розглядається як автоматична генерація інтерфейсу користувача Automatic Generation of User Interface (AGUI) або прикладні обчислювальні моделі, щоб допомогти розробникам інтерфейсу користувача розподілити елементи. Однак більшість цих досліджень проводилися експертами з інформатики, і вони зосереджувалися на тому, як узгодити специфікації програмування з певною бібліотекою віджетів, щоб створити макет на основі точки зору дизайнера, максимізуючи корисність простору; однак два обмеження традиційного Link analysis (LA) не розглядалися систематично в цих дослідженнях.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Традиційний метод недостатній для оцінки перехідних витрат, пов'язаних із легкістю доступу до певного елемента на інтерфейсі, а таблиця посилань, яка зазвичай використовується, не містить інформації про напрямки для оцінки складності.

**Мета статті.** Метою дослідження є розробка вдосконаленого методу аналізу, розробленого на модифікованій таблиці зв'язків і алгоритмі розгалужень і меж. Таким чином, незважаючи на те, що традиційний метод може значно покращити інтерфейс шляхом оптимізації близькості між елементами керування, вдосконалений метод може додатково покращити інтерфейс шляхом оптимального обміну між доступністю та близькістю. Метод можна застосувати до інтерфейсу, який вимагає фізичних рухів між користувачем та інтерфейсом і всередині інтерфейсу, особливо сенсорного екрана та панелей керування. Головною метою аналізу посилянь є мінімізація «загальних витрат» шляхом зміни макета, поки оператор використовує цільовий інтерфейс відповідно до певних вимог завдання. Тобто мета цього дослідження полягає в тому, щоб запропонувати вдосконалений метод аналізу зв'язків, який включає модифіковану таблицю зв'язків, яка могла б враховувати обидва типи рухів і містила інформацію про напрямки рухів. По-перше, до модифікованої таблиці зв'язків буде включено додатковий елемент, початкову точку руки, щоб рухи U-I могли бути представлені в комірках, пов'язаних із початковою точкою руки. По-друге, рядки та стовпці використовувалися окремо для позначення початку та кінця рухів і у свою чергу напрямки рухів можна було визначити за їхніми позиціями в змінній таблиці посилянь. Тобто кожне значення посилення в клітинці представляє відносну вагу руху. Рух і його напрямки можна побачити за розташуванням комірки, в яку він заповнений. Крім того, значення посилення було перероблено, щоб об'єднати частоту та важливість в один складений індекс, щоб цей індекс міг мати відповідну вагу для переходів. Індекс складності переходу, який є визначальним для часу виконання, потім розглядався як репрезентативний перехідної вартості та зважений за значеннями посилянь. Отже, складність зваженого індексу може бути більш репрезентативною для загальних перехідних витрат. Нарешті, загальні перехідні витрати будуть оптимізовані за допомогою алгоритму розгалужень і меж. Щоб проілюструвати, як використовувати новий метод на практиці, було запропоновано тематичне дослідження в реальній системі ядерного контролю. На основі прикладу було проведено експеримент, щоб перевірити ефективність нового методу порівняно з традиційним методом зв'язків щодо скорочення часу роботи користувачів.

**Виклад основного матеріалу.** Традиційний метод аналізу зв'язків [6] використовує таблицю зв'язків або діаграму зв'язків для представлення «зв'язків» між компонентами інтерфейсу. На рисунку 1 показана діаграма зв'язку автомобільного радіоприймача, а на рисунку 2 — таблиця зв'язку. Кожен рух між компонентами інтерфейсу представлено прямою лінією. Наприклад, щоб витягнути компакт-диск, користувачеві потрібно натиснути кнопку А, а потім кнопку F. Але деякі операції «одним дотиком», такі як натискання кнопки Н лише для зворотного відтворення, можуть не розглядатися ні на схемі зв'язку, ні в таблицю посилянь. Крім того, використовується лише половина таблиці зв'язків, тому операції іншої послідовності ( $A \rightarrow F / F \rightarrow A$ ) не можна розрізнити в таблиці (і  $F \rightarrow A$ , очевидно, не має сенсу). Нарешті, значення зв'язку представляє, скільки рухів між двома компонентами має бути виконано після завершення одного запуску всіх завдань. Базуючись на таблиці посилянь, традиційний аналіз посилянь покращить інтерфейс шляхом мінімізації довжини наявних посилянь в інтерфейсі. На рисунку 2 показано один із можливих покращених макетів інтерфейсу традиційним методом аналізу посилянь. В основному, близькість усіх пов'язаних елементів має бути покращена шляхом скорочення посилянь.

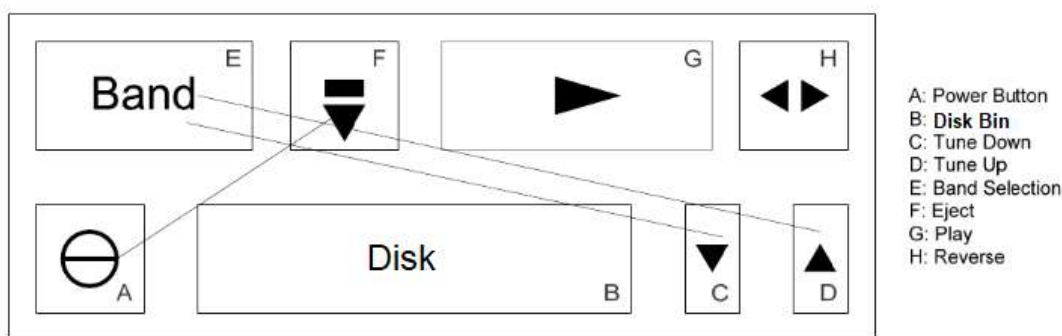


Рис. 1. Схема підключення автомобільної аудіосистеми

	A	B	C	D	E	F	G	H
A	█					1		
B	█	█						
C	█	█	█		1			
D	█	█	█	█	1			
E	█	█	█	█	█			
F	█	█	█	█	█	█		
G	█	█	█	█	█	█	█	
H	█	█	█	█	█	█	█	█

Рис. 2. Таблиця посилань автомобільної аудіосистеми



Рис. 3. Покращений автомобільний аудіоінтерфейс за допомогою традиційного аналізу каналів

Очевидно, що традиційний метод аналізу посилань має два потенційні обмеження. По-перше, насправді, поки існує певна фізична відстань між користувачем та інтерфейсом користувача, робота інтерфейсу складається з двох типів рухів — рухів між користувачем та інтерфейсом (рухи U-I) і рухів всередині інтерфейсу (рухи W-I) на рисунку 4. У попередньому прикладі автомобільного радіоприймача водій може спочатку просунути руку до панелі керування радіоприймачем, а потім натиснути послідовність кнопок,

щоб отримати бажану функцію, наприклад пошук своєї улюбленої станції. Рух його або її руки до панелі є рухом U-I, а рухи між функціональними кнопками на панелі є рухами W-I. Таблиця посилань, на яку посилається традиційний метод аналізу посилань, враховує лише рух W-I, а рух U-I не враховує. Рух U-I являє собою рух руки оператора вперед-назад між початковою позицією (положення руки в положенні спокою) і цільовим елементом, тоді як рух W-I являє собою рух від одного елемента до іншого. Таблиця зв'язків містить лише інформацію про переміщення W-I шляхом таблиці всіх зв'язків між елементами цільового інтерфейсу, щоб розробник міг мінімізувати відстань між зв'язаними елементами; однак, поки між користувачем і інтерфейсом користувача існує певна фізична відстань, користувач повинен виконувати рухи U-I для доступу до інтерфейсу користувача.

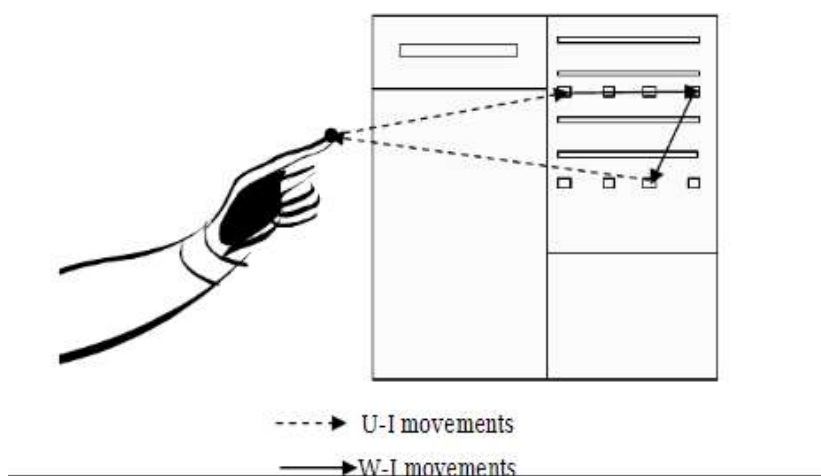


Рис. 4. Взаємодія між користувачем та інтерфейсом (U-I) і всередині інтерфейсу (W-I)

По-друге, кожен фізичний рух руки має свій напрямок (вперед і назад), але таблиця зв'язків традиційного методу аналізу вважає рух вперед і назад однаковими. Інформація про напрямок важлива, особливо коли дизайнер бере до уваги індекс складності. Складність є визначальним показником часу, а індекс складності, такий як  $\log_2(2A/W)$ , запропонований Фіттсом [2] та інший модифікований індекс для двовимірного або тривимірного завдання наведення, може бути функцією відстані, ефективної ширини цілі та дирекційний кут. Ні цільовий, ні дирекційний кут неможливо визначити без інформації про напрямок руху. Отже, 2 типи рухів та їхні напрямки повинні бути включені в таблицю посилань, щоб загальна вартість експлуатації інтерфейсу не була упередженою або недооціненою під час процесу оптимізації.

Крім того, концепція «посилання» також не може належним чином відображати вартість експлуатації цільового інтерфейсу з точки зору валідності конструкції. В ідеалі краще розглядати значення посилання як зведений індекс частоти та важливості. [1] Однак, на основі звичайного визначення значення посилання, воно підраховує лише кількість переміщень між елементами, і однакові ваги призначаються кожному посиланню. Насправді зв'язки повинні бути кількісно визначені або фізичною, або часовою відстанню між 2 з'єднаними елементами, і кожне посилання має мати різну вагу відповідно до його важливості та частоти. Важливість має бути функцією серйозності помилкового використання, а частота повинна враховувати, як часто операція буде виконуватися протягом тривалого періоду, а не під час одноразового виконання всіх функцій. Очевидно,

що підрахунок кількості посилань не є правильним способом врахування перехідної вартості посилань та їх відносної ваги.

**Розробка вдосконаленого методу аналізу посилань.** Щоб оптимізувати макет інтерфейсу та кількісно оцінити його зручність, спочатку слід сформулювати вартість експлуатації інтерфейсу з точки зору тимчасових, фізичних або когнітивних витрат. Загальна перехідна вартість, яка представляє ступінь фізичного попиту під час U-I та W-I рухів, використовувалася в алгоритмі як вартість, яку потрібно мінімізувати. Передбачається, що вартість кожного руху (переходу) буде залежати від його складності, а складність кожного переходу слід зважувати за його важливістю та частотою. Виходячи з припущення щодо процедурних операцій, операційна вартість кожного переходу має бути адитивною, а загальна вартість має бути сумою зваженого індексу складності всіх існуючих переходів, включаючи рухи U-I та W-I. Тоді простий алгоритм розгалуження та межування з деякими модифікаціями, включаючи пріоритет входу в дерево пошуку, принцип пошуку оптимального макета та стратегію відсікання для розгалуження, буде прийнято для створення оптимального макета інтерфейсу. Формулювання цільової функції (мінімізація загальних перехідних витрат) і алгоритм генерації макета на основі оптимізації будуть пояснені нижче [3].

Метою аналізу посилань є мінімізація загальної перехідної вартості, поки користувач працює з інтерфейсом. Це поняття можна сформулювати у вигляді наступного виразу: Загальна перехідна вартість =  $\sum$  (вагомність переходу  $\times$  вартість переходу).

Вагомність кожного переходу можна вважати зведеним індексом важливості та частоти, а вартість кожного переходу пов'язана з його вимогливістю. У цьому дослідженні ми припустили, що вимогливість кожного переходу (руху) позитивно пропорційно його рівню складності, а індекс складності має бути функцією ефективної ширини цілі, відстані переміщення та напрямку руху (якщо це тривимірний рух). Перехідна вартість тісно пов'язана з оцінкою зручності використання. ступінь, до якого продукт може бути використаний певними користувачами для досягнення визначених цілей з ефективністю, результативністю та задоволенням». «Ефективність» включає точність, а «ефективність» — це ресурси, витрачені по відношенню до точності. Вартість переходу враховує як ефективну ширину цілі, так і відстань переміщення, і вони пов'язані з точністю та витратами енергії відповідно. Таким чином, перехідна вартість може пояснити ефективність і ефективність зручності використання у фізичному аспекті. Крім того, «задоволення» визначається як «вільність від дискомфорту та позитивне ставлення до користувача продукту». Очевидно, перехідні витрати представляють фізичний попит, і мінімізація загальних перехідних витрат може зменшити ризик виникнення фізичного дискомфорту та негативного досвіду користувача. Насправді фізичний і фізіологічний показники зазвичай використовуються для оцінки зручності використання. Нарешті, продуктивність на основі часу широко використовується в дослідженнях оцінки юзабіліті. Оскільки складність переходів значною мірою визначає час руху та фізичний попит, було б доцільно використовувати загальну перехідну вартість як важливий показник зручності використання [7].

Щоб удосконалити традиційний метод аналізу посилань, необхідно вирішити дві проблеми: недбалість рухів U-I та складність рухів. Інформацію про походження кожної операції та напрямок кожного руху слід включити до зміненої таблиці посилань. Традиційна таблиця посилань містила лише елементи, які слід розглядати в інтерфейсі, і використовувалася лише половина таблиці (див. рисунок 5).

	<b>E<sub>1</sub></b>	<b>E<sub>2</sub></b>		.....		<b>E<sub>n</sub></b>
<b>E<sub>1</sub></b>		L <sub>11</sub>				L <sub>1n</sub>
<b>E<sub>2</sub></b>						L <sub>2n</sub>
.						
.						
.						
.						
<b>E<sub>n</sub></b>						

Рис. 5. Традиційна таблиця посилань

У цьому дослідженні початок операції вважався додатковим елементом у таблиці зв'язків і була використана зворотна сторона таблиці зв'язків. Змінена таблиця зв'язків показана на рисунку 6. Усі початкові точки визначено в рядках, а всі цілі – у стовпцях відповідно. 1-й стовпчик і 1-й рядок представляють усі рухи U-I, тому що O означає початок руки. Як наслідок, значення зв'язку L<sub>0i</sub> представляють сукупну вагу руху від початку до елемента і за частотою та важливістю. Подібним чином, значення посилання L<sub>i0</sub> представляють вагу руху від елемента і до початку. L<sub>ij</sub> для будь-якого i≠j≠0 означає вагу руху від елемента і до елемента j. У цій модифікованій таблиці можлива ідентифікація рухів U-I та напрямків усіх рухів. Це полегшило б розрахунок індексів складності на основі різних типів і напрямків рухів.

		Targets				
	<b>O</b>	<b>E<sub>1</sub></b>	<b>E<sub>2</sub></b>		.....	<b>E<sub>n</sub></b>
<b>O</b>		L <sub>01</sub>	L <sub>02</sub>			L <sub>0n</sub>
<b>E<sub>1</sub></b>	L <sub>10</sub>		L <sub>11</sub>			L <sub>1n</sub>
<b>E<sub>2</sub></b>	L <sub>20</sub>	L <sub>21</sub>				L <sub>2n</sub>
.						
.						
.						
.						
<b>E<sub>n</sub></b>	L <sub>n0</sub>	L <sub>n1</sub>	L <sub>n2</sub>			

Рис. 6. Змінена таблиця посилань

Значення посилань у таблиці в ідеалі, мають бути сукупною вагою важливості та частоти кожного переходу. Однак традиційний аналіз посилань не дає чіткого визначення частоти та важливості в контексті завдань. [4] Відносну важливість і цілісну частоту використання не слід визначати на операційному рівні, оскільки зв'язок, який є рухом між двома елементами на інтерфейсі, визначається на функціональному рівні. Без попередньо визначених функцій і заданих послідовностей посилання неможливо визначити, оскільки користувач не може довільно використовувати певні кнопки в певній послідовності, не знаючи, що ця процедура буде робити. Оскільки частота та важливість були властивими характеристиками посилання, а не елемента (мета полягає у визначенні частоти та важливості посилань, а не елементів), частоту та важливість слід вирішувати на функціональному рівні [5].

Що стосується частоти, загальне використання функції за певний період часу можна отримати шляхом спостереження або опитування. Коли неможливо провести спостереження, опитування або ціль яку потрібно змінити, ще навіть не існує, можна застосувати евристичну процедуру. Група дизайнерів і експертів з зручності використання може визначити частоту для кожної функції на основі очікуваного тривалого використання. Тоді індекс відносної частоти функції  $k$  можна обчислити наступним чином де  $m$  – загальна кількість функцій, а  $f_k$  – відносна частота використання функції  $k$ .

$$F_k = \frac{f_k}{\sum_{k=1}^m f_k} \text{ (Індекс частоти функції } k \text{ )}; 0 < F_k < 1; \sum_{k=1}^m F_k = 1.$$

Отже, два важливі компоненти, переміщення між користувачем та інтерфейсом (переміщення U-I) і переміщення всередині інтерфейсу (переміщення W-I рухів), можна об'єднати в одну цільову функцію, і є як частота, так і важливість враховується у значенні посилення. Коли інтерфейс керування є відносно великим і фізичні рухи є все ще необхідними для роботи, доступність елементів керування щодо позиції користувача або початкова позиція може відігравати важливішу роль, ніж близькість між ними. Насправді такі широкомасштабні інтерфейси управління, які потребують доступності, все ще широко використовуються в багатьох системах, наприклад як реальні атомні електростанції, виробничі підприємства та військові бази. Система може також керувати меншою комп'ютеризованою програмою з графічним інтерфейсом користувача Generation of User Interface (GUI), але необхідність роботи з інтерфейсом, що призводить до труднощів як досягнення, так і повторюваних операцій вимагає більше фізичних рухів.

**Висновки.** У статті проведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукового завдання, яке полягало в розробці моделей і методу оптимізації інтерактивних інтерфейсів. А саме покращений метод аналізу посилення, безумовно, зменшує фізіологічні витрати, оскільки більш короткі рухи в довгостроковій перспективі призводять до меншої втоми і у свою чергу за менший проміжок часу роботи, що вже підтверджено моїм дослідженням.

Хоча покращений метод аналізу посилення не обов'язково покращує всі аспекти зручності використання у певному сенсі аналіз зв'язку враховує функціональну близькість, одночасно оптимізуючи фізичну відстань і компоновання, щоб досягти мінімальних тимчасових і фізіологічних витрат на частоті використання інтерфейсу.

Інші фактори, такі як концептуальна сумісність, доступність тощо, наразі знаходяться за межами розгляду аналізу посилення. Незважаючи на це, покращений метод аналізу посилення все одно може допомогти у наданні кількісної оцінки до вищезазначених міркувань зручності використання.

Експерти з юзабіліті також можуть проводити аналіз, хоча сам метод все ще забезпечує основу для порівняння альтернативи.

Покращений метод проектування інтелектуальних інтерфейсів можна застосувати до репрезентативно фіксованих і когнітивно простих (тобто тих які не вимагають багато когнітивної роботи) інтерфейсів, за допомогою яких користувачі виконують процедурні операції певних завдань. Тобто застосування поточного модифікованого методу проектування інтерфейсів більш ефективно, коли є багато фізичних рухів між рукою та інтерфейсом користувача. Також для повторюваної та безперервної роботи інтерфейсів покращений метод може значно зменшити фізичні рухи і зменшити ступінь втоми, а також відповідний ризик, наприклад травм і високий рівень помилок. Іншим застосуванням цього методу може бути проектування схильного до помилок керування інтелектуальний інтерфейс із високою вартістю відновлення системи, оскільки важливість також враховується у зручності та можливості використання інтерфейсу запропонованим методом і може бути відображений в дизайні макета.



**Список використаних джерел**

1. Kuang, C. User Friendly: How the Hidden Rules of Design Are Changing the Way We Live, Work, and Play [MCD] / C. Kuang, R. Fabricant. – 2020. – 416 p.
2. Wathan, A. Refactoring UI [ebook] / A. Wathan, S. Schoger – 2018. – 218 p.
3. Унгер, Р. UX-дизайн проектирование опыта взаимодействия. Практическое руководство / Р. Унгер, К. Чендлер. – Санкт-Петербург, Москва : Символ, 2011. – 336 с.
4. Уолтер, А. Эмоциональный веб-дизайн / А. Уолтер. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2012. – 144 с.
5. Wroblewski, L. Mobile First / L. Wroblewski. – New York, 2011. – 130 с.
6. Cooper, A. Psychiatric hospital in the hands of patients / A. Cooper. – 2009. – 336 с.
7. Krug, S. Don't Make Me Think / S. Krug. – New Riders, 2017. – 216 с.

**References**

1. Kuang, C. (2020). User Friendly: How the Hidden Rules of Design Are Changing the Way We Live, Work, and Play. New York: MCD.
2. Wathan, A., Schoger, S. (2018). Refactoring UI.
3. Unger, R., Chandler, C. (2011). A Project Guide to UX Design: For User Experience Designers in the Field or in the Making. New Riders Pub.
4. Walter, A. (2012). Emotional web design. New York: A Book Apart.
5. Wroblewski, L. (2011). Mobile First. New York: A Book Apart.
6. Cooper, A. (2009). The mental hospital is in the hands of the patients.
7. Krug, S. (2017). Don't Make Me Think. New Riders.

Отримано 15.08.2023

UDC 004.451.84

**Anton Kostyuk**

1st graduate student, Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: 1999kostyukanton@gmail.com

**METHODS AND ALGORITHMS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF DESIGNING INTERACTIVE INTERFACES**

*This article is devoted to research and analysis of methods and algorithms aimed at increasing the efficiency of designing interactive interfaces. Interactive interfaces have become an integral part of modern programs and systems that interact with the user. The optimal design of interfaces plays a key role in ensuring the convenience of user interaction with the program or system. The article explores different approaches to designing interactive interfaces, including methodologies that focus on aspects of user experience (UX) and ergonomics. Methods of collecting user requirements, creating prototypes, testing and iterative improvement of interface design are considered in detail. Particular attention is paid to algorithms that automate certain aspects of designing interfaces, such as automatic adaptation to different screen sizes, improving accessibility for people with disabilities, optimizing response speed, etc. The application of innovative technologies, such as artificial intelligence and machine learning, is also explored to determine their potential to improve interactive interface design processes.*

*In conclusion, the article aims to systematize and analyze approaches, methods and algorithms that can be used to improve the design efficiency of interactive interfaces, providing better user experience and interaction in the context of the rapid growth of technology and the involvement of users in various digital platforms that change the way of interaction with information, it is important to consider approaches that allow you to effectively create interfaces that provide convenience, functionality and enjoyment of use. That is, different approaches to the design of interactive interfaces were considered, including user-centered design methods, psychological aspects of the perception of interfaces, the use of gamification elements to increase user engagement, and optimization of work flows. In addition, the article considers modern algorithms for automated analysis of feedback from users, in particular, methods of collecting and analyzing feedback and data on interaction with interfaces. This allows for rapid changes and improvements based on the real needs and wishes of users.*

*The conclusions of the article emphasize the importance of combining technical knowledge, psychological understanding of user needs, and modern algorithms to achieve optimal results in the design of interactive interfaces. This work contributes to an in-depth understanding of the issues and provides practical guidance for software design and development professionals seeking to create products with high user value.*

**Keywords:** interfaces, design, traditional method of connection analysis, improved method of connection analysis.

Fig.: 5. Library: 7. References: 7.

**Олександра Дифучина**

аспірант кафедри інформаційних систем та технологій  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [dyfuchyna@gmail.com](mailto:dyfuchyna@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5477-4533> SCOPUS Author: 57202215305

**МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ**

На швидкодію паралельних алгоритмів сильно впливають параметри, що визначають характеристики підзадач та механізми їх взаємодії, а також обчислювальні ресурси, які використовуються для виконання програми. Тестування паралельних алгоритмів в реальних умовах є ресурсовитратним, з огляду на це у роботі пропонується метод оптимізації параметрів паралельних обчислень на основі Петрі-об'єктного моделювання та еволюційного алгоритму. У якості прикладу застосування методу побудована та досліджена модель паралельного алгоритму імітації дискретно-подійної системи.

**Ключові слова:** паралельні обчислення, імітаційне моделювання, мережа Петрі, еволюційний алгоритм.

Табл.: 1. Рис.: 3. Бібл.: 14.

**Актуальність теми дослідження.** Сучасні інформаційні технології потребують швидкої роботи алгоритмів, яку можна досягти за допомогою паралельних обчислень. Проте, в залежності від параметрів, що визначають характеристики підзадач та механізми їх взаємодії, використання паралельних обчислень може призвести як до прискорення, так і до сповільнення обчислень. На практиці проблему налаштування параметрів паралельних обчислень вирішують шляхом багатократного тестування програми на різних комп'ютерних платформах при різних наборах параметрів, щоб гарантувати коректність та ефективність обчислень. Очевидно, що даний метод налаштування є ресурсозатратним та не гарантує точний результат. На жаль, існуючі засоби проектування та розробки програм ефективні для налагодження та оптимізації часу виконання лише однопотокових програм. З огляду на це, створення методу, спрямованого на вдосконалення процесу налагодження багатопотокових програм та підвищення ефективності використання паралельних обчислень в інформаційній технології, є актуальним науковим завданням.

**Постановка проблеми.** Математичні методи оцінювання ефективності паралельних обчислень спроможні вказати лише на існування обмеження на максимально досяжне прискорення за ідеальних умов вільного доступу до обчислювального ресурсу та відсутності синхронізації обчислень (тобто фактично відсутності взаємодії між частинами програми).

Існуючі засоби проектування програм, такі як UML, дають змогу (досить узагальнено) представити графічно взаємодію окремих частин програми, проте не надають можливості будь-якого чисельного аналізу обчислень. Засоби моделювання, такі як високорівневі мережі Петрі, рекомендовані міжнародним стандартом ISO/IEC 15909-1:2019 [1] як техніка для специфікації паралельних і розподілених систем. Не зважаючи на те, що існує досвід розробки симуляторів обчислень на основі мереж Петрі, жоден з них не став на сьогоднішній день широко використовуваним у розробці паралельних обчислень.

Таким чином, наразі не існує уніфікованого методу створення моделі паралельних обчислень і, відповідно, не існує іншого, окрім реальної програми, засобу, який можна використовувати для оптимізації параметрів паралельної програми. Відсутність засобів моделювання стримує розробку високоєфективних паралельних обчислень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні засобів моделювання паралельних обчислень відомо небагато, проте рух досліджень у цьому напрямку є. Так, у роботі [2] для моделювання пулу потоків використовуються синхронізовані автомати.

Модель показує значне скорочення тривалості виконання завдань у випадку паралельних потоків.

Використання класичних мереж Петрі для моделювання багатопотокових застосунків викладено в [3]. Розробка інструменту візуалізації багатопотокової java-програми з використанням класичних мереж Петрі представлена в [4]. У роботі [5] описано можливі сценарії виникнення зависання багатопотокової програми та розглянуто моделювання цих сценаріїв класичною мережею Петрі та операційним графом, який запропонований авторами публікації, на прикладі простого застосунку.

У статті [6] розглянута концепція розробки коду програмного забезпечення за його моделлю, описаною мережею Петрі. За цією концепцією модель будується за вимогами, які висуваються до програмного забезпечення. На наступному етапі програмне забезпечення розробляється у відповідності до побудованої моделі та використовує модель для верифікації. Автоматизована генерація коду за моделлю програми у такій концепції гарантує її відповідність вимогам, а мережі Петрі мають бути складовою частиною розробки програмного забезпечення. Проте втілення цієї концепції у подальших роботах не знайдено.

Серед існуючих засобів тестування або налагодження багатопотокових програм майже всі орієнтовані лише на пошук помилок пов'язаних із взаємоблокуванням потоків (deadlock) або помилками неузгодженості даних. Метод статичного виявлення взаємоблокувань запропоновано в [7]. Розроблено спеціальний інструмент для виявлення взаємоблокувань [8]. У роботі [9] для дослідження ситуацій взаємоблокування у багатопотокових програмах автори пропонують спеціальний клас звичайної мережі Петрі під назвою мережа Гадара. У [10] запропоновано розгорнутий метод виявлення помилок неузгодженості даних у багатопотокових програмах з використанням специфічних мереж Петрі з даними (PD-net). У роботі [11] запропоновано фреймворк під назвою PVcon для динамічного виявлення помилок паралелізму. Експериментальні результати показують, що PVcon може ефективно виявляти вдвічі більше помилок у багатопотокових програмах, ніж інші методи. Однак, автори вказують, що у даній роботі вони зосередились на помилках багатопотоковості за виключенням проблем взаємоблокувань.

Тож, засоби тестування програм спрямовані, насамперед, на аналіз коректності виконання обчислень, але не на аналіз ефективності паралельних обчислень.

**Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій стосовно засобів моделювання паралельних обчислень та їх здатності оцінювати ефективність показав, що достатньо багато з них, використовують мережі Петрі. Проте звичайні мережі Петрі при детальному описі програми призводять до надто складних моделей. Тому моделюванню, як правило, підлягають найпростіші елементи паралельної програми: розділення на підзадачі, очікування завершення виконання підзадачі, блокування. Більш складні інструменти взаємодії між потоками, як wait/notify, розглядаються лише в окремих публікаціях. Майже усі засоби моделювання не враховують обмеженість використовуваного паралельною програмою ресурсу, що, звісно, зменшує точність таких моделей. До того ж, існуючі засоби моделювання недостатньо точно відтворюють механізми захоплення обчислювального ресурсу та механізми взаємодії підзадач паралельної програми, тому існує необхідність розвитку методів та засобів для оцінювання ефективності паралельних обчислень на основі моделей.

**Метою дослідження** є підвищення ефективності використання паралельних обчислень в інформаційних технологіях за рахунок оптимізації параметрів паралельних обчислень на основі моделей, що можуть бути використані для оцінювання часу виконання паралельного алгоритму.

**Виклад основного матеріалу.**

**Метод оптимізації параметрів паралельних обчислень.** Суть методу оптимізації параметрів полягає у визначенні набору параметрів, які впливають на ефективність алгоритму, та варіюванні цих параметрів у моделі для визначення оптимальних значень, що гарантують найвищу ефективність алгоритму. Критерієм оптимізації є мінімізація часу виконання алгоритму:

$$T(X) \rightarrow \min,$$

де  $X$  – множина досліджуваних параметрів паралельного алгоритму,

$T$  – час виконання алгоритму при заданій  $X$ .

Метод складається з низки етапів.

На *першому* етапі для побудови моделі використовуються шаблони моделювання механізмів багатопотокової програми. Розроблені фрагменти мереж Петрі використовуються для створення Петрі-об'єктів. Далі Петрі-об'єкти доповнюються у відповідності до об'єктів програми. Створюється список Петрі-об'єктів та встановлюються зв'язки між парами Петрі-об'єктів. Конструюється Петрі-об'єктна модель на основі списку Петрі-об'єктів. Результатом даного етапу є розроблений метод `getModel()`, який повертає Петрі-об'єктну модель багатопотокової програми.

На *другому* етапі залучається метод збору даних для моделі. Проводиться експериментальне дослідження часу витраченого на виконання інструкцій та визначаються їх статистичні характеристики. Результатом даного етапу є параметри часових затримок, які вносяться до моделі: середнє значення, середнє квадратичне відхилення та закон розподілу. Якщо відхилення невелике, то може бути прийняте рішення про детерміновану затримку.

На *третьому* етапі проводяться попередні експерименти з моделлю для визначення набору параметрів, що впливають на ефективність. Такими параметрами можуть бути: кількість потоків, кількість підзадач, розмір підзадачі, обсяг обчислювальних ресурсів тощо. Варіювання цих параметрів треба забезпечити при проведенні експериментів з моделлю. Це реалізується шляхом розміщення параметрів у методі `getModel()` і є результатом даного етапу. Якщо кількість параметрів менше або дорівнює 2, для пошуку оптимальних параметрів застосовується покроковий алгоритм оптимізації. В іншому випадку, коли кількість параметрів більше 2, застосовується евристичний еволюційний алгоритм пошуку оптимальних параметрів.

У випадку, коли кількість параметрів менше або дорівнює 2, на *четвертому* етапі відбувається підготовка до проведення експериментів. Клас `Experiment`, що підтримує `JavaFx Application` налаштовується під конкретну серію експериментів, щоб отримати графік результатів після імітації моделі. У даному класі мають бути налаштовані методи `getResult()` (одна точка на графіку при конкретних значеннях), `getSeries()` (отримання множини точок за якими буде побудовано графік), `startExperiment()` (проведення декількох серій експериментів з параметрами).

На *п'ятому* етапі запускається проведення експериментів, в результаті чого будуються графіки залежності спостережуваної величини від змінюваного параметра. В результаті даного експерименту можна аналізувати вплив двох параметрів на спостережувану величину.

На *шостому* етапі проводиться аналіз результатів експериментів. Якщо мінімальне значення спостережуваної величини не відстежується, варто змінити значення параметру і продовжити експерименти.

На *сьомому* етапі внаслідок проведення експериментів на попередніх етапах відбувається аналіз отриманих графіків та визначається оптимальне значення параметру, що відповідає мінімальному значенню спостережуваної величини. За потреби проводиться деталізоване дослідження в околі оптимуму.

У випадку, коли кількість параметрів більше 2, на *четвертому* етапі відбувається підготовка до застосування еволюційного алгоритму. Встановлюється кількість параметрів та їх область варіювання, кількість особин в популяції.

На *n'ятому* етапі запускається еволюційний алгоритм та отримуються результати його виконання. Результатом даного етапу є такий набір параметрів з області варіювання, що гарантує мінімальний час виконання алгоритму.

Еволюційний алгоритм, що застосовується для пошуку оптимальних значень, є узагальненою версією генетичного алгоритму [12]. Елементом популяції (особиною) являється набір значень параметрів паралельних обчислень по два або більше параметри. Початкова популяція (генерування 0) формується з випадкових значень, розкиданих в області допустимих значень параметрів. Кожний елемент популяції запускається у «життя», тобто в імітаційну модель паралельних обчислень. Результатом такої життєдіяльності елемента популяції є відгук моделі (час виконання алгоритму). Набори параметрів, які отримали в процесі імітації великі значення відгуку моделі, знищуються. Таким чином відбір особин популяції здійснюється за значенням відгуку моделі. Особини популяції, що пройшли відбір, допускаються до схрещування. Схрещування здійснюється для випадково обраних пар особин популяції шляхом змішування частин наборів параметрів. При цьому доцільно не розривати параметри, що відносяться до одного варіанту. Мутація здійснюється додаванням випадкового відхилення до результату, який отриманий в результаті схрещування, додаванням з рівною ймовірністю -1, 0 або 1. Кожна наступна популяція (генерування  $j$ ) формується з елементів, що пройшли відбір на попередньому генеруванні (генерування  $j-1$ ), та з елементів, що створені в результаті схрещування та мутації. У правилі зупинення еволюційного пошуку користувач задає кількість генерувань. Після виконання всіх генерувань повертається набір значень параметрів з найменшим часом виконання алгоритму.

Адаптивний покроковий алгоритм оптимізації зі змінним кроком застосовується у випадку, коли кількість параметрів, що досліджуються, є невеликою (один або два). Він є точним, оскільки множина значень кожного параметра є дискретною та обмеженою. Алгоритм полягає в тому, що при фіксованому значенні одного параметра експериментально будується залежність часу виконання паралельного алгоритму по всім можливим значенням другого параметра. Кількість таких експериментальних одновимірних залежностей дорівнює кількості можливих значень другого параметра. Оптимальне значення задається тією одновимірною експериментальною кривою, на якій досягається мінімальне значення часу виконання паралельного алгоритму. Значення першого параметра відповідає оптимуму відповідної одновимірної експериментальної кривої, значення другого параметра – це значення, для якого ця крива побудована. Тож, при кількості досліджуваних параметрів не більше 2 слід застосовувати описаний метод, оскільки він є точним.

**Застосування методу.** Застосування методу оптимізації параметрів паралельних обчислень здійснювалося на прикладі паралельного алгоритму імітації дискретно-подійної системи. Результати розробки моделі паралельного алгоритму та її дослідження опубліковані в роботі [13]. Послідовний алгоритм імітації відтворює впорядковану в часі послідовність подій. Тому його паралельна реалізація є нетривіальним завданням.

У загальному вигляді алгоритм імітації складається з кроків, кожен з яких включає пошук моменту найближчої події та реалізацію події. Реалізація події – це зміна стану моделі. Реалізація в Java паралельного алгоритму імітації включає потоки, що відтворюють частини системи, що моделюються, переміщуючи локальний час  $tLoc$  до найближчої події. Взаємодія між потоками реалізується двома парами умов *wait/notify*: перша контролює порожній стан буфера зовнішніх подій, а друга – досягнення максимального значення стану буфера.

Основний потік створює потоки *sim*, імітуючи частини системи, поки не буде досягнуто час моделювання  $tMod$ . Кожен потік *sim* чекає, поки його буфер зовнішніх подій не буде порожнім, а потім запускає імітацію, доки не буде досягнуто найближчого моменту його зовнішньої події  $tLim$ . Коли зовнішня подія виконується, потік може продовжувати імітацію, переміщуючи час до наступної найближчої зовнішньої події таким же чином. Щоб уникнути ситуації, коли один потік *sim* займає ресурс комп'ютера, потік призупиняє моделювання, коли достатньо зовнішніх подій надано для іншого потоку.

Для дослідження прискорення алгоритму створено модель, що складається з груп послідовних подій. Оскільки послідовні події набагато важче розпаралелювати, оцінене прискорення буде найменшим з усіх, що можна отримати в загальному випадку. Модель можна розділити на групи залежно від того, скільки потоків буде використано для обчислення імітації. Таким чином, кількість потоків і складність обчислень, що виконуються кожним потоком, можуть змінюватися простим способом.

Тож, паралельний алгоритм імітації реалізується такими методами:

1) Метод *main*, який встановлює значення часу моделювання  $tMod$ , створює потоки, об'єднує потоки та друкує результати.

2) Метод *run*, який очікує на зовнішню подію, поки  $tLoc < tMod$ , потім встановлює  $tLim$  і запускає метод *goUntil*, якщо  $tLim < tMod$ .

3) Метод *goUntil*, який поки  $tLoc < tLim$  чекає, якщо буфер зовнішніх подій досяг максимального розміру або цей буфер порожній, потім переміщує  $tLoc$  до найближчої події та виконує подію; після цього досягається момент  $tLim$  і повинна бути виконана зовнішня подія.

4) Метод *output*, який змінює стан моделі відповідно до події та за потреби додає дані про зовнішні події до буферів інших частин моделі.

Метод *main* викликає метод *run* для кожного потоку та чекає його завершення. Метод *run* викликає метод *goUntil*, який, у свою чергу, викликає метод *output*.

Структура моделі відтворює структуру програми. Класами, з яких побудована модель алгоритму, є *Main* і *ThreadModel*. Клас *ThreadModel* агрегує класи *RunSim*, *GoUntilSim*, *OutputSim*, *WaitSim*, які імітують методи "run", "goUntil", "output" і блок синхронізації дій (guarded block) відповідно, та клас *Control*, який зберігає значення моментів часу  $tLoc$ ,  $tLim$ ,  $tMin$ . Класи *Main*, *RunSim*, *GoUntilSim*, *OutputSim*, *WaitSim* є підкласами класу *PetriSim* і мають в своєму описі мережу Петрі. Клас *WaitSim* визначається мережею Петрі блоку синхронізації дій. Детальний опис мереж та процесу побудови моделі наведено в [13]. На рисунку 1 [13] представлено зв'язки Петрі-об'єктів моделі. Побудова мереж Петрі-об'єктів та конструювання моделі здійснювалось у програмному забезпеченні Parallel Program Simulation [14].

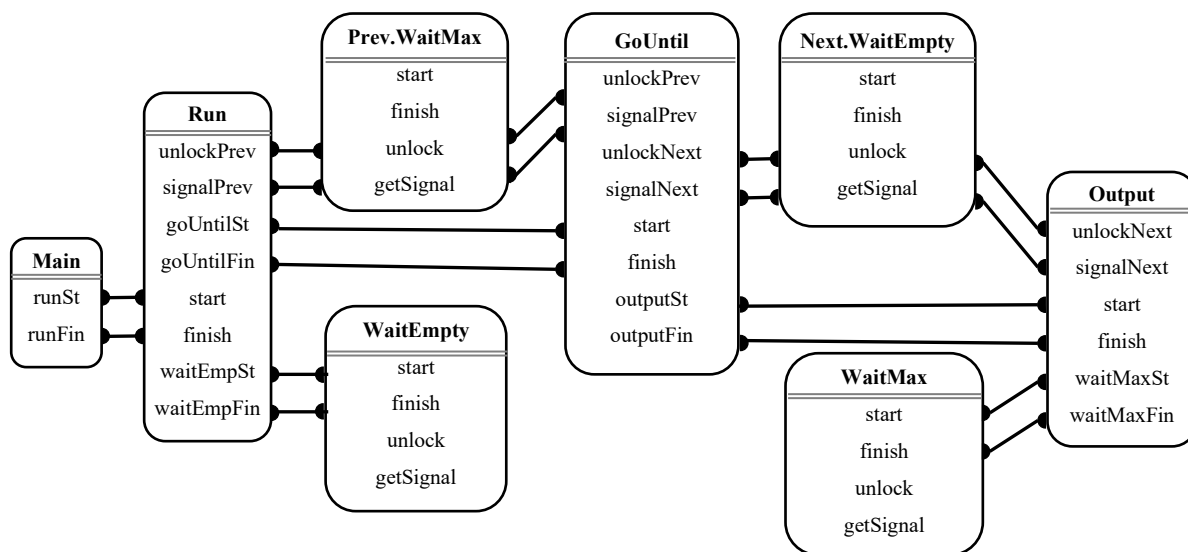


Рис.1. Ототожнення позицій Петрі-об'єктів Main, Run, GoUntil та Output.

Після побудови моделі були заміряні та встановлені параметри моделі, близькі до спостережуваних у експерименті з реальним комп'ютерним ресурсом. Були витримані співвідношення часових затримок основних інструкцій, які впливають на алгоритм.

Набір параметрів, що впливає на ефективність алгоритму складається зі складності підзадач в одному потоці та ліміту буфера зовнішніх подій.

Для дослідження впливу складності підзадач у потоці та ліміту буфера зовнішніх подій на час виконання було проведено експеримент із зазначеними параметрами моделі. Для пошуку оптимальних значень спершу застосовувався покроковий алгоритм оптимізації. Спершу визначалось оптимальне значення ліміту буфера зовнішніх подій. Результати моделювання, отримані у випадку використання 2 ядер та при складності моделі у 400 подій, представлені на рисунку 2. Як видно з рисунку, збільшення значення ліміту від 100 не спричиняє значного зменшення часу, адже криві для 100 і 1000 подій накладаються. Тож обмеження ліміту згори складає 1000 подій. Однак, з точки зору завантаженості комп'ютерного ресурсу великий обсяг ліміту потребує великих затрат пам'яті, що може призвести до сповільнення виконання алгоритму. З рисунку видно, що при збільшенні значення ліміту від 100 до 1000 подій вииграш у часі невеликий, але затрати в пам'яті зі збільшенням ліміту значно збільшуються. Тож проаналізувавши результати, можна зробити висновок, що оптимальним значенням ліміту буфера зовнішніх подій є 100 подій.

Аналізуючи результати моделювання далі, здійснювався пошук оптимального значення складності підзадачі у потоці. З рисунку 2(а) видно, що мінімальний час виконання досягається при кількості подій, оброблених одним потоком, рівній 10. Була проведена деталізація дослідження в околі оптимуму, яка показала, що насправді найменший час виконання досягається при 8 подіях у потоці (рис. 2(б)).

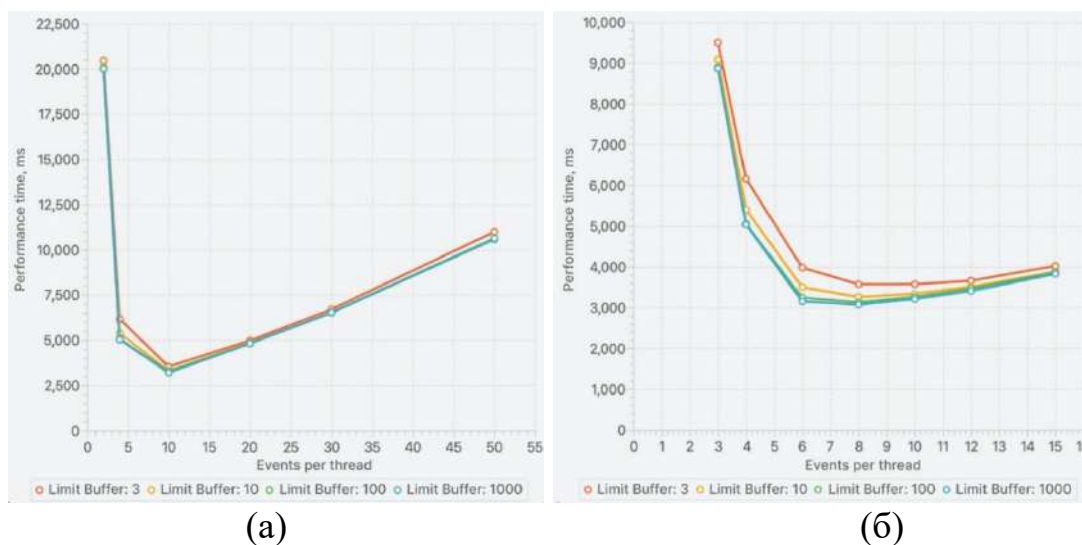


Рис.2. Вплив складності підзадачі у потоці та ліміту буфера зовнішніх подій на час виконання алгоритму в моделі: (а)загальний графік, (б) деталізований графік.  
Джерело: розроблено автором.

З метою оцінки точності алгоритму покрокової оптимізації було проведено аналогічні експерименти з реальною програмою. Результати дослідження впливу двох параметрів багатопотокового алгоритму на час виконання реальної програми представлені на рисунку 3. Для проведення експерименту використовувався комп'ютер MacOS, оснащений двоядерним процесором Intel Core i5 з частотою 1,8 ГГц. Паралельний алгоритм реалізований мовою Java. Виявлено, що найменший час роботи алгоритму забезпечується, якщо складність завдання, що виконується одним потоком, наближається до 4 подій, а ліміт буфера зовнішніх подій дорівнює 100. Варто додати, що час виконання алгоритму сильно залежить від низки факторів таких, як вплив сторонніх запущених застосунків, підключення до інтернету тощо. Також, загально відомо, що Java має властивість прискорювати обчислення при збільшенні навантаження на обчислювальний ресурс (так званий розгін). У зв'язку з цим дуже важливо додавати розігрів обчислювального ресурсу (warm up) [15].

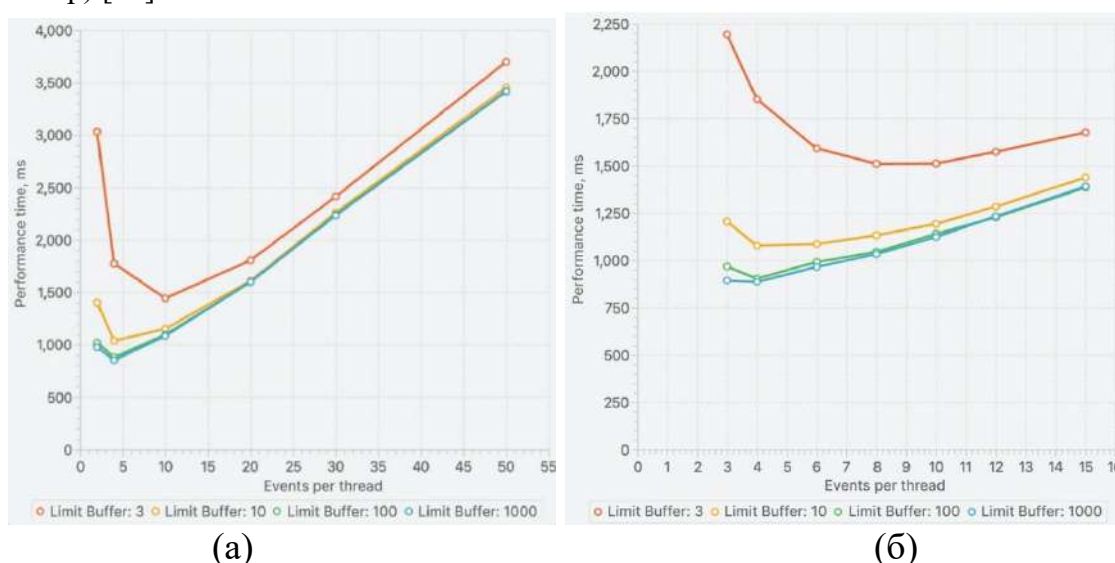


Рис.3. Вплив складності підзадачі у потоці та ліміту буфера зовнішніх подій на час виконання алгоритму в реальній програмі: (а)загальний графік, (б) деталізований графік.  
Джерело: розроблено автором.



Як бачимо, оптимальні значення складності підзадачі у потоці та ліміту буфера зовнішніх подій, знайдені за допомогою методу, достатньо близькі до значень, отриманих в результаті експериментів з реальною програмою.

Для того, щоб оцінити вплив похибки у визначенні оптимального значення шляхом моделювання на час виконання алгоритму, було проведено додаткові експерименти з реальною програмою із встановленим значенням параметрів – складність підзадачі та ліміт буфера зовнішніх подій. У першому експерименті складність підзадачі складала 4 події (результат пошуку оптимальних параметрів для реальної програми), у той час, як у другому експерименті даний параметр склав 8 подій (результат моделювання). Ліміту було встановлено значення 100 подій. У таблиці 1 наведені результати обох експериментів. Бачимо, що різниця у часі виконання незначна. Вплив похибки у визначенні оптимального значення на швидкодію алгоритму складає 6%. Тобто, різниця у пошуку оптимального параметру з моделлю і з реальною програмою не значно вплинула на значення швидкодії алгоритму. При необхідності, для отримання точного значення варто провести уточнюючий експеримент на реальній програмі, оскільки модель є все таки спрощеним представленням програми і оцінка часових затримок була достатньо грубою. Проте, враховуючи, що модель дає можливість проводити безліч експериментів і тим самим звужити область пошуку оптимальних значень, можна стверджувати про пришвидшення та спрощення процесу налагодження параметрів паралельних обчислень. Таким чином, модель може бути використана для пошуку найкращих параметрів для запуску паралельного алгоритму.

*Таблиця 1 – Швидкодія алгоритму при оптимальних параметрах, знайдених експериментально та за допомогою методу.*

Складність підзадачі	Ліміт буфера	Час виконання, мс
4	100	1025,625
8	100	1086,5

Джерело: розроблено автором.

Слід додати, що у попередньому дослідженні стосовно налаштування параметрів пулу потоків за допомогою Петрі-об'єктного моделювання [16] була розрахована похибка моделювання, яка не перевищувала 8%. Це свідчить про достатню точність моделювання при використанні Петрі-об'єктного підходу.

У випадку застосування еволюційного алгоритму для пошуку оптимальних значень складності підзадачі та ліміту буфера зовнішніх подій було отримано результати близькі до попередніх. Оптимальне значення складності підзадачі в експериментах з моделлю та реальною програмою склало 8 і 4, відповідно. У рамках застосованого генетичного алгоритму, особиною є набір параметрів, що досліджується, у нашому випадку це складність підзадачі та ліміт буфера зовнішніх подій. Область варіювання встановлена відповідно від 2 до 50 подій для складності підзадачі та від 3 до 1000 подій для ліміту.

Варто зазначити, що еволюційний алгоритм не слід застосовувати для малої кількості параметрів (один або два) У випадку такої кількості параметрів більш точним та швидким буде покроковий алгоритм. Однак, провівши дослідження навіть на двох параметрах, еволюційний алгоритм показав схожі результати з покроковим алгоритмом: найменший час виконання паралельного алгоритму імітації спостерігається при невеликій складності підзадачі та, відповідно, великій кількості потоків. Такий результат підтверджує, що таке дослідження має сенс і користь, оскільки традиційно кількість потоків обирається відповідно до кількості ядер процесора. Тобто, якщо керуватися загальноприйнятою логікою, в даному прикладі для обчислення системи з 400 подій оптимальним було б використання 4 потоків та відповідно, по 100 подій в підзадачі. Однак по

результатам експериментів видно, що дані параметри не гарантують ефективне виконання алгоритму. Тож, дане дослідження показує, що загальноприйняте правило визначення кількості потоків є не універсальним рішенням і різні задачі потребують різних параметрів.

**Висновки відповідно до статті.** Запропоновано метод оптимізації параметрів паралельних обчислень на основі Петрі-об'єктного моделювання. Оптимізація відбувається за рахунок застосування еволюційного алгоритму або покрокового алгоритму оптимізації на Петрі-об'єктній моделі паралельних обчислень. Продемонстровано приклад застосування методу на паралельному алгоритмі імітації дискретно-подійної системи. Знайдені оптимальні значення достатньо точно відповідають таким, що були виявлені при експериментуванні з паралельним алгоритмом в реальних умовах. Отримані результати свідчать про коректність пошуку оптимальних параметрів на моделі. Подальший розвиток методу полягає у підвищенні точності вимірювання часових затримок базових інструкцій задля підвищення точності моделювання.

### Список використаних джерел

1. Systems and software engineering. High-level Petri nets. Part 1: Concepts, definitions and graphical notation (ISO/IEC 15909-1:2004) [Electronic resource] / International Organization for Standardization – Access mode : <https://www.iso.org/standard/38225.html>
2. Modeling and analysis of thread pools in an industrial communication platform [Electronic resource] / F. S. de Boer, I. Grabe, M. M. Jaghoori, A. Stam, W. Yi // International Conference on Formal Engineering Methods ICFEM 2009: Formal Methods and Software Engineering : Lecture Notes in Computer Science / eds. K. Breitman A. Cavalcanti. – 2009. – № 5885. – P. 367-386. – Access mode : [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-10373-5\\_19](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-10373-5_19)
3. Kavi, K. Modeling Multithreaded Applications Using Petri Nets [Electronic resource] / K. Kavi, A. Moshtaghi, Dj. Chen // International Journal of Parallel Programming. – 2002. – № 30(5). – P. 353-371. – Access mode : [https://www.researchgate.net/publication/220091454\\_Modeling\\_Multithreaded\\_Applications\\_Using\\_Petri\\_Nets](https://www.researchgate.net/publication/220091454_Modeling_Multithreaded_Applications_Using_Petri_Nets)
4. Katayama, T. Proposal of a Supporting Method for Debugging to Reproduce Java Multi-threaded Programs by Petri-net [Electronic resource] / T. Katayama, H. Nakamura, Y. Kita // Journal of Robotics, Networking and Artificial Life. – 2014. – № 1 (3). – P. 207-211. – Access mode : <https://alife-robotics.org/article/vol1issue3/14955.pdf>
5. Giebas, D. Deadlocks Detection in Multithreaded Applications Based on Source Code Analysis [Electronic resource] / D. Giebas, R. Wojszczyk // Applied Sciences. – 2020. – № 10 (2). – P. 532. – Access mode : <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/2/532>
6. Gold, R. Petri Nets in Software Engineering [Electronic resource] / R. Gold // Arbeitsberichte – Working Papers. – Fachhochschule Ingolstadt – University of Applied Sciences, Ingolstadt, 2004. – № 5. – Access mode : <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:573-203>.
7. Owe, O. Deadlock detection of active objects with synchronous and asynchronous method calls [Electronic resource] / O. Owe, I. C. Yu // Norsk Informatikkonferanse (NIK). – Halden, Norway, 2014. – Access mode : <http://ojs.bibsys.no/index.php/NIK/article/view/19>.
8. Software Verify LTD. Deadlock Detection and Thread Monitoring [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.softwareverify.com/products/#threads>
9. Liao, H. Concurrency Bugs in Multithreaded Software: Modeling and Analyzing Using Petri Nets / H. Liao // Discrete Event Dynamic Systems. – 2013. – № 23(2). – P. 157-195.
10. Xiang, D. Detecting Data Inconsistency Based on the Un-folding Technique of Petri Nets / D. Xiang // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2017. – № 13(6). – P. 2995-3005.
11. Xu, Z. PVcon: Localizing Hidden Concurrency Errors With Prediction and Verification // IEEE Access. – 2020. – № 8. – P. 165373-165386.
12. Стеценко, І. В. Моделювання систем : навч. посіб. / І. В. Стеценко. – Черкаси : ЧДТУ, 2010.
13. Stetsenko, I. V. Parallel algorithm development and testing using Petri-object simulation / I. V. Stetsenko, O. A. Pavlov, O. Dyfuchyna // International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems. – 2021. – № 36(6). – P. 549-564.

14. Dyfuchyna, O. Parallel Program Simulation (PPS) [Electronic resource] / O. Dyfuchyna. – Access mode : <https://github.com/sashadif/PPS>
15. JMH - Java Microbenchmark Harness. [Electronic resource] – Access mode : <https://jenkov.com/tutorials/java-performance/jmh.html>
16. Stetsenko, I. V. Thread Pool parameters tuning using simulation / I. V. Stetsenko, O. A. Pavlov, O. Dyfuchyna // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2020. – № 938. – P. 78-89.

### References

1. International Organization for Standardization. (2004). *Systems and software engineering — High-level Petri nets — Part 1: Concepts, definitions and graphical notation*. (ISO/IEC 15909-1:2004). Retrieved from <https://www.iso.org/standard/38225.html>.
2. de Boer, F.S., Grabe, I., Jaghoori, M.M., Stam, A., Yi, W. (2009). Modeling and analysis of thread pools in an industrial communication platform. *International Conference on Formal Engineering Methods ICFEM 2009: Formal Methods and Software Engineering. Lecture Notes in Computer Science, (5885)*, 367-386. DOI: 10.1007/978-3-642-10373-5\_19.
3. Kavi, K., Moshtaghi, A., Chen, Dj. (2002). Modeling Multithreaded Applications Using Petri Nets. *International Journal of Parallel Programming, 30(5)*, 353–371. DOI: 10.1023/A:1019917329895.
4. Katayama, T., Nakamura, H., Kita, Y. (2014). Proposal of a Supporting Method for Debugging to Reproduce Java Multi-threaded Programs by Petri-net. *Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, 1(3)*, 207-211. DOI: 10.2991/jrnal.2014.1.2.3.
5. Giebas, D., Wojszczyk, R. (2020). Deadlocks Detection in Multithreaded Applications Based on Source Code Analysis. *Applied Sciences, 10(2)*, 532. DOI: 10.3390/app10020532.
6. Gold, R. (2004). Petri Nets in Software Engineering. *Arbeitsberichte – Working Papers, (5)*, Fachhochschule Ingolstadt – University of Applied Sciences, Ingolstadt. URL: <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:573-203>.
7. Owe O., Yu I.C. (2014). Deadlock detection of active objects with synchronous and asynchronous method calls. *Norsk Informatikkonferanse (NIK)*. Halden, Norway. URL: <http://ojs.bibsys.no/index.php/NIK/article/view/19>.
8. Software Verify LTD. (2023). *Deadlock Detection and Thread Monitoring*. Retrieved from <https://www.softwareverify.com/products/#threads>.
9. Liao, H. (2013). Concurrency Bugs in Multithreaded Software: Modeling and Analyzing Using Petri Nets. *Discrete Event Dynamic Systems, 23(2)*, 157–195. DOI: 10.1007/s10626-012-0139-x.
10. Xiang, D., (2017). Detecting Data Inconsistency Based on the Un-folding Technique of Petri Nets. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 13(6)*, 2995-3005. DOI: 10.1109/TII.2017.2698640.
11. Xu, Z. (2020). PVcon: Localizing Hidden Concurrency Errors With Prediction and Verification, *IEEE Access, 8*, 165373-165386. 0.1109/ACCESS.2020.3022992.
12. Stetsenko, I.V. (2010). *System Modeling*. Cherkasy: ChDTU.
13. Stetsenko, I.V., Pavlov, O.A., Dyfuchyna, O. (2021) Parallel algorithm development and testing using Petri-object simulation. *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems, 36(6)*, 549-564. DOI: 10.1080/17445760.2021.1955113.
14. Dyfuchyna, O. (2023). *Parallel Program Simulation (PPS)*. Retrieved from <https://github.com/sashadif/PPS>
15. Jenkov J. (2015). *JMH - Java Microbenchmark Harness*. Retrieved from <https://jenkov.com/tutorials/java-performance/jmh.html>
16. Stetsenko, I.V., Pavlov, O.A., Dyfuchyna, O. (2020). Thread Pool parameters tuning using simulation. *Advances in Intelligent Systems and Computing, 938*, 78-89. DOI: 10.1007/978-3-030-16621-2\_8.

Отримано 20.09.2023

**Oleksandra Dyfuchyna**

Ph.D. student of Department of Information Systems and Technologies

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: dyfuchyna@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5477-4533> SCOPUS Author: 57202215305**THE METHOD FOR PARALLEL COMPUTING PARAMETERS OPTIMIZATION**

Modern information technologies require fast performance of algorithms, which can be achieved with the help of parallel computing. However, depending on the parameters that determine the characteristics of the subtasks and the mechanisms of their interaction, the use of parallel computing can lead to both speeding up and slowing down the computations. Testing parallel algorithms in real conditions is resource-consuming, in view of this, the paper proposes a method for optimizing the parameters of parallel computing based on Petri-object modeling and the evolutionary method.

Nowadays, there is no unified method for creating a model of parallel computing and, accordingly, there is no tool other than a real program that can be used to optimize the parameters of a parallel program. The lack of simulation tools hinders the development of highly efficient parallel computing. Despite the fact that there are not many tools for simulating parallel computing, there is a movement of research in this direction. The analysis of the existing tools of testing multithreaded programs showed that they are aimed, first of all, at the analysis of the correctness of the execution of computations, but not at the analysis of the efficiency of parallel computing.

The research objective is to improve the efficiency of using parallel computing in information technologies by optimizing the parameters of parallel computing based on Petri-object models, which can be used to estimate the execution time of a parallel algorithm.

The proposed method is based on the simulation of parallel computing by a stochastic Petri net and the application of models in an evolutionary method or a step-by-step optimization algorithm to find parameters that will ensure the efficient performance of parallel computing. As an example of the application of the method, a model of a parallel algorithm for discrete-event system simulation was built and investigated. The optimal values of the parameters found using the method quite accurately correspond to those found during experimentation with the parallel algorithm in real conditions.

**Keywords:** cyber-attack simulation, penetration test, vulnerabilities, Petri net.

Tables: 1. Fig.: 3. References: 14.

**Вадим Щур<sup>1</sup>, Юрій Кулаков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>аспірант, асистент кафедри обчислювальної техніки  
Національного технічного університету України  
«Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [vadimmshchur@gmail.com](mailto:vadimmshchur@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8925-4813>

<sup>2</sup>професор, доктор технічних наук  
Національного технічного університету України  
«Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [ya.kulakov@gmail.com](mailto:ya.kulakov@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8981-5649>

## ОПТИМІЗОВАНИЙ АДАПТИВНИЙ МЕТОД БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В МЕРЕЖАХ SDN НА ОСНОВІ ANT COLONY OPTIMIZATION

У сучасних програмно-визначених мережах (SDN) забезпечення ефективного балансування навантаження є ключовим завданням для оптимального використання ресурсів та забезпечення стабільної якості обслуговування. Для досягнення цих цілей у цій статті ми пропонуємо покращений метод балансування навантаження для мереж SDN, заснований на мурашиному алгоритмі з динамічним налаштуванням параметрів.

Запропонований метод демонструє високу ефективність в умовах змінної динаміки мережі та різноманітного навантаження на вузли. Його основною перевагою є здатність адаптуватися до мінливих умов навантаження і трафіку в режимі реального часу. Алгоритм безперервно аналізує навантаження на вузли і динамічно коригує вагові коефіцієнти для забезпечення оптимального розподілу трафіку.

Запропонований метод виділяється своєю здатністю ефективно підтримувати баланс навантаження при різноманітних викликах і навантаженнях, що робить його потужним інструментом забезпечення надійності і продуктивності в мережах SDN.

**Ключові слова:** програмно-визначені мережі; балансування навантаження; мережі SDN; адаптивний мурашиний метод; динамічне налаштування параметрів.

Табл.: 1. Рис.: 1. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** Зростання обсягів даних і підвищення вимог до продуктивності мереж у сучасному світі ставлять перед інженерами та дослідниками завдання підвищити продуктивність комп'ютерних мереж. Від реагування на пікові навантаження до забезпечення швидкості передачі даних і мінімізації затримок, ефективне управління мережевими ресурсами стає критично важливим.

Програмно-визначені мережі представляють новий підхід до побудови мереж, де контроль і управління мережею відокремлені від фізичної інфраструктури. Така архітектура дозволяє швидше розгортати нові послуги, зменшити витрати на обслуговування, а також покращити масштабованість і гнучкість.

Однак впровадження мереж SDN створює нові виклики, зокрема, пов'язані з балансуванням навантаження. Забезпечення рівномірного розподілу трафіку між вузлами мережі стає ключовим завданням для підтримки стабільної швидкості передачі даних і запобігання перевантаженню окремих компонентів мережі.

Для вирішення цього завдання існує безліч методів і підходів, серед яких балансування навантаження, використання резервних маршрутів, адаптивні алгоритми та інші. Однак більшість з існуючих підходів мають свої обмеження, особливо коли мова йде про адаптацію до змін в мережі та навантаженні.

**Постановка проблеми.** Інтеграція мереж SDN призводить до нових викликів, зокрема, пов'язаних з балансуванням навантаження. Забезпечення рівномірного розподілу трафіку між вузлами мережі стає ключовим завданням для підтримки стабільної швидкості передачі даних і запобігання перевантаженню окремих компонентів мережі. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано багато методів та підходів, таких як балансування навантаження, використання резервних маршрутів, адаптивні алгоритми тощо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Незважаючи на значні досягнення в області балансування навантаження в програмно-визначених мережах, більшість існуючих методів мають певні обмеження та недоліки. Огляд найбільш поширених недоліків, що наведений в таблиці, допоможе зрозуміти необхідність вдосконалення та розробки нових підходів.

*Таблиця 1 – Найпоширеніші недоліки методів балансування*

Недоліки	Огляд робіт авторів з зазначеним методом та пояснення щодо його використання
Статичні параметри	Багато сучасних методів балансування навантаження, таких як Round Robin, описаний авторами в [4], використовують статичні параметри. Це призводить до недостатньої адаптації до змін в мережі, оскільки такі параметри залишаються незмінними протягом тривалого часу. В результаті гнучкість балансування навантаження обмежена, що може призвести до неоптимальних результатів.
Неврахування навантаження	В роботі [5] автори розглядають алгоритм "Least Connections" , але не враховують різницю в навантаженні між вузлами, тому можуть розподіляти трафік без урахування поточного навантаження на вузли. Це призводить до перевантаження одних вузлів і недовикористання інших, що може погіршити продуктивність системи.
Брак гнучкості	Алгоритм "Weighted Round Robin", запропонований авторами [6], має обмежену гнучкість у виборі маршрутів, і може не забезпечити достатньої оптимізації балансування навантаження та уникнення заторів. Обмежена можливість маневрування маршрутами обмежує потенціал оптимізації.
Обчислювальні витрати	Деякі складні методи, такі як "Adaptive Load Balancing" описане в [7], можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів для виконання розрахунків і прийняття рішень. Висока обчислювальна складність може вплинути на продуктивність мережі і зробити її менш ефективною.
Вразливість до атак	«Random Load Balancing» запропонований авторами в [8], може бути вразливим до атак. Основною причиною такої вразливості є те, що метод випадковим чином розподіляє трафік між вузлами без урахування їх поточного навантаження. Також через випадковість розподілу трафіку метод Random Load Balancing може призвести до нерівномірного розподілу навантаження між вузлами. Певні вузли можуть бути перевантажені, в той час як інші можуть бути недостатньо завантажені. Це може створити можливість для атак, таких як DDoS, спрямованих на конкретні вузли.

Джерело: розроблено авторами

Тому для подолання цих обмежень і недоліків важливо розробляти нові методи балансування навантаження, які є гнучкими, адаптивними і відповідають вимогам сучасних мереж SDN.

**Метою статті** є розробка та представлення нового методу балансування навантаження для програмно-визначених мереж на основі мурашиного алгоритму з динамічним налаштуванням параметрів. Ключовою метою цього методу є досягнення оптимального розподілу трафіку та підвищення продуктивності мережі в умовах змінного навантаження та мережевої динаміки.

Дана робота спрямована на вирішення актуальної проблеми балансування навантаження в мережах SDN та внесення значного внеску в підвищення продуктивності, надійності та ефективності сучасних мереж.

**Виклад основного матеріалу.** Метод «Adaptive Ant Colony» - один з методів балансування навантаження в програмно-конфігурованих мережах (SDN), в основі якого лежить мурашиний алгоритм з елементами адаптації. У цьому методі мурашині агенти

моделюють поведінку мурах в природі, які взаємодіють один з одним і навколишнім середовищем за допомогою феромонів. Феромони використовуються для визначення вибору оптимальних маршрутів для передачі трафіку в мережі.

Однією з головних переваг методу Adaptive Ant Colony є його здатність пристосовуватися до змін у мережі та навантаження. Для досягнення цієї адаптивності вводяться додаткові параметри, які регулюють вагу феромонів і швидкість їх випаровування. Ці параметри автоматично підлаштовуються в залежності від стану мережі та обсягу трафіку.

У статті [10] описано детальний алгоритм роботи методу адаптивної мурашиної колонії, а саме розрахунок оновлених ваг феромонів та швидкості випаровування, що забезпечує збалансованість маршрутів для трафіку

Формула для оновлення маси феромонів:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t)$$

Формула для оновлення швидкості випаровування:

$$\rho_{ij}(t+1) = (1 - \alpha) \cdot \rho_{ij}(t) + \alpha \cdot \frac{f_{ij}(t)}{f_{ij}(t)}$$

де:

$\tau_{ij}(t)$  вага феромону на ребрі  $(i,j)$  у момент часу  $t$ .

$\rho$  – швидкість випаровування феромону.

$\Delta\tau_{ij}(t)$  приріст феромону на ребрі  $(i,j)$  у момент часу  $t$ .

$\alpha$  – коефіцієнт впливу інтенсивності трафіку на зміну швидкості випаровування  $f_{ij}(t)$  інтенсивність трафіку на ребрі  $(i,j)$  у момент часу  $t$ .

Алгоритм Adaptive Ant Colony має свої обмеження і недоліки, які можуть вплинути на його ефективність в певних умовах. Серед них - чутливість до початкових значень параметрів, що може призвести до неадекватної поведінки та обмеженої збіжності алгоритму. Висока обчислювальна складність алгоритму також може створювати перешкоди, особливо у великих мережах або при обмежених ресурсах [9]. У цьому випадку алгоритм може стати вразливим до застрявання на певних ребрах або вузлах, що призводить до неоптимальних рішень.

Крім того, залежність від інтенсивності трафіку може обмежити адаптивність алгоритму, а також обмежити його здатність балансувати феромонну регуляцію. Алгоритм також не завжди може ефективно адаптуватися до раптових динамічних змін у мережі або навантаженні, що може призвести до затримок у реагуванні. В умовах обмеженого обсягу даних алгоритм також може давати неточні рішення, оскільки його рішення ґрунтуються на статистичних даних.

Метод «Enhanced Adaptive Ant Colony» є однією з найсучасніших стратегій балансування навантаження в програмно-визначених мережах (SDN). В роботі [9] автори запропонували цей метод як спосіб підвищення адаптивності та ефективності алгоритму Adaptive Ant Colony.

Головною особливістю Enhanced Adaptive Ant Colony є її здатність динамічно адаптуватися до змін у мережі та навантаженні. Для досягнення такої адаптивності автори вводять додаткові параметри, які регулюють вагу феромонів та швидкість їх випаровування. Ці параметри можуть автоматично коригуватися залежно від стану мережі та обсягу трафіку [9]. Це дозволяє алгоритму ефективно реагувати на зміни та оптимально розподіляти навантаження між вузлами мережі.

Для цього вводяться додаткові параметри, які регулюють вагу феромонів та швидкість їх випаровування. Ці параметри автоматично коригуються в залежності від стану

мережі та обсягу трафіку. Формули для розрахунку оновлених ваг феромонів і швидкості випаровування виглядають наступним чином:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t)$$

$$\tau_{ij}(t) = (1/L_k(t)) * Q$$

де  $L_k(t)$  довжина маршруту  $k$  в момент часу  $t$ ,  $Q$  константа, яка визначає кількість феромону, що виділяється мурахою.

Покращення, запроваджене Enhanced Adaptive Ant Colony, полягає в більш точному адаптивному управлінні параметрами. Це дозволяє алгоритму ефективніше адаптуватися до змін, забезпечуючи краще балансування навантаження, менші обчислювальні витрати та вищу надійність, ніж попередні методи.

Метод Enhanced Adaptive Ant Colony дійсно покращує алгоритм Adaptive Ant Colony [10], але він також має свої обмеження та недоліки. Одним з найважливіших недоліків є висока обчислювальна складність методу. Це може призвести до значного збільшення обчислювальних ресурсів та часу виконання алгоритму, особливо у розгалужених мережах з великою кількістю вузлів та різноманітних маршрутів.

Додатковим недоліком може бути недостатня реакція на раптові зміни в мережі. Оскільки адаптація базується на історичних даних і статистиці, алгоритм може неефективно реагувати на ситуації, які не були передбачені попередніми даними.

Крім того, Enhanced Adaptive Ant Colony може бути вразливим до атак, подібних до методу Adaptive Ant Colony [9]. Наприклад, атаки, які надсилають штучний трафік, можуть спотворити статистику і призвести до неправильного розподілу навантаження.

Загалом, Enhanced Adaptive Ant Colony є першим кроком на шляху до підвищення адаптивності та ефективності балансування навантаження в програмно-визначених мережах, але його обмеження та недоліки слід враховувати при подальшій розробці та вдосконаленні алгоритмів балансування навантаження.

Концепція програмно-визначених мереж (SDN) являє собою новий підхід до побудови мереж, де управління та контроль мережі відокремлені від фізичної інфраструктури. Така архітектура дозволяє швидше розгортати нові послуги, знизити витрати на обслуговування, а також підвищити масштабованість і гнучкість.

Відмінною рисою SDN є те, що мережа організовується і управляється на програмному рівні за допомогою віртуальних комутаторів і центрального SDN-контролера [1,2] (рис. 1).

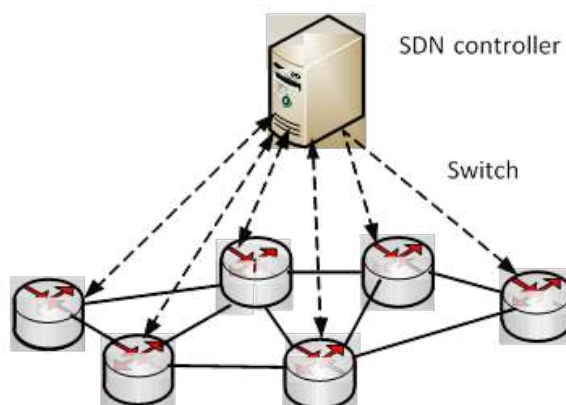


Рис. 1. Структура мережі SDN

Джерело: розроблено авторами



Існують різні рішення для балансування навантаження в програмно-визначених мережах (SDN), але деякі обмеження все ще залишаються актуальними, що вимагає розробки більш ефективних підходів. Серед таких рішень ми зосередимо увагу на алгоритмі Enhanced Adaptive Ant Colony, який слугуватиме основою для запропонованих нами вдосконалень.

Алгоритм Enhanced Adaptive Ant Colony базується на концепції мурашиного алгоритму [3]. У цьому методі колонія віртуальних мурах рухається мережею, відкладаючи та випромінюючи феромони для комунікації. Це орієнтує наступних мурах на вибір маршрутів з більшою концентрацією феромонів, що певною мірою сприяє балансуванню навантаження. Однак базовий алгоритм має свої недоліки, такі як статичні значення параметрів, обмежена гнучкість у виборі маршруту та чутливість до змін у мережі.

Нашою метою є вдосконалення алгоритму Enhanced Adaptive Ant Colony шляхом внесення динамічних змін до його ключових параметрів, що дозволить йому адаптуватися до реальних умов мережі. Ця вдосконала версія має на меті підвищити точність балансування навантаження, ефективно реагувати на зміни в навантаженні мережі та забезпечити більш гнучке рішення для сучасних SDN-середовищ.

Запропонований метод балансування навантаження в програмно-визначених мережах базується на мурашиному алгоритмі та враховує динамічне налаштування параметрів. Основні принципи та етапи методу, а також формули для кожного етапу покроково описані нижче.

Мурашиний алгоритм базується на взаємодії агентів, які імітують поведінку мурах при пошуку шляхів до джерел їжі. Ключовою ідеєю є здатність агентів обмінюватися інформацією про якість поточних шляхів і використовувати цю інформацію для вибору оптимального маршруту [5].

Для подолання обмежень базового алгоритму ми розробили кроки оптимізації, які дозволяють алгоритму адаптуватися до мінливих умов мережі. Розглянемо детальніше кожен з цих кроків, починаючи з його ініціалізації.

### Крок 1: Ініціалізація

На цьому кроці ми налаштовуємо алгоритм і готуємо його до виконання.

1. Визначимо  $N$  як кількість вузлів мережі
2. Ініціалізуємо рівні феромонів на всіх можливих маршрутах:

$$\tau_{ij} = \tau_0,$$

де  $i$  та  $j$  - вузли мережі,  $\tau_{ij}$  - рівень феромону між вузлами  $i$  та  $j$ ,  $\tau_0$  початковий рівень феромону

3. Визначення агентів на вихідних вузлах мережі, звідки йде вихідне навантаження. Кожен агент ідентифікує свій поточний вузол і призначений вузол.

### Крок 2: Динамічне налаштування параметрів

Для того, щоб адаптуватися до змін і досягти найбільш ефективного балансування навантаження, ми використовуємо динамічні налаштування параметрів.

1. Розраховуємо поточне навантаження на мережу,  $load\_factor$ .
2. Визначаємо коефіцієнти для ваг параметрів  $\alpha$  та  $\beta$ :

$$\alpha = \alpha_{base} \times \frac{load\_factor}{max\_load},$$

$$\beta = \beta_{base} \times \frac{max\_load}{load\_factor}$$

де  $\alpha_{base}$  та  $\beta_{base}$  - початкові значення параметрів,  $max\_load$  - максимально можливий ступінь навантаження.

**Крок 3: Покращений вибір маршруту**

Для покращення збіжності та точності балансування ми використовуємо покращений вибір маршруту з "елітними маршрутами".

1. Коли агент вибирає маршрут, ми використовуємо ймовірність вибору маршруту:

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \cdot \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_k (\tau_{ik}^{\alpha} \cdot \eta_{ik}^{\beta})}$$

2. Після вибору маршруту оновить рівень феромонів на ньому додатковим збільшенням:

$$\Delta\tau_{ij} = \frac{load\_factor}{max\_load} \times \tau_{ij}$$

**Крок 4: Адаптивне оновлення феромонів**

Замість статичного коефіцієнта випаровування ми використовуємо адаптивний коефіцієнт, який залежить від ступеня навантаження:

$$\rho = \rho_{base} + (load\_factor - 1) \times \rho_{base}$$

Це дозволяє ефективніше реагувати на зміни навантаження і підтримувати баланс навантаження на оптимальному рівні.

**Крок 5: Динамічне налаштування параметрів**

Щоб забезпечити адаптацію до змін у мережі та максимально ефективно балансування навантаження, ми використовуємо динамічне регулювання налаштувань (Крок 2).

1. Розраховуємо поточне навантаження на мережу,  $load\_factor$ .
2. Визначаємо коефіцієнти для ваг параметрів  $\alpha$  та  $\beta$ :

$$\alpha = \alpha_{base} \times \frac{load\_factor}{max\_load}$$

$$\beta = \beta_{base} \times \frac{max\_load}{load\_factor}$$

де  $\alpha_{base}$  та  $\beta_{base}$  - початкові значення параметрів,  $max\_load$  - максимально можливий ступінь навантаження..

**Крок 6: Динамічне регулювання налаштувань**

Ми використовуємо динамічне налаштування параметрів, щоб забезпечити адаптивність алгоритму до змін у мережі.

1. Визначаємо коефіцієнт адаптивності для феромонів:

$$\phi = \frac{load\_factor}{max\_load}$$

2. Адаптивно змінюємо параметр випаровування:

$$\rho = \rho_{base} + (\phi - 1) \times \rho_{base}$$

3. Змінювання значення параметрів  $\alpha$  та  $\beta$ :

$$\alpha = \alpha_{base} \times \phi,$$

$$\beta = \beta_{base} \times (1 - \phi).$$

**Крок 7: Пошук найкращого рішення**

Після кількох ітерацій алгоритму кожен агент матиме кілька можливих маршрутів. З них ми виберемо найкращий, враховуючи як феромони, так і вагу вузлів.

1. Визначаємо оцінку для кожного маршруту агента:

$$evaluation = \frac{pheromone\_level \times node\_weight}{path\_length}$$

2. Обираємо маршрут з найбільшою кількістю балів як найкращий.

Використання динамічних налаштувань параметрів дозволить адаптувати параметри алгоритму в режимі реального часу. Замість статичних значень параметри алгоритму тепер автоматично змінюються в залежності від змін в мережі та навантаження. Це дозволяє алгоритму ефективно реагувати на зміни, підтримуючи оптимальний розподіл навантаження навіть у мінливих умовах.

Друге важливе поліпшення стосується вдосконалення процесу вибору маршруту для віртуальних мурах. Шляхи тепер враховують більше факторів, включаючи поточне навантаження на вузли та шляхи. Це дозволяє мурахам обирати найкращі маршрути, виходячи з поточних обставин, забезпечуючи рівномірний розподіл трафіку та уникаючи заторів.

Підвищена адаптивність - третій ключовий аспект оптимізованого алгоритму. Впровадження динамічного налаштування параметрів у поєднанні з удосконаленим процесом вибору маршруту зробило алгоритм більш адаптивним до динамічних змін у мережі. Він здатний ефективно адаптуватися до коливань навантаження та змін у структурі мережі.

Ці вдосконалення разом сприяють кращому балансуванню навантаження в мережах SDN. Забезпечуючи точний розподіл трафіку, запобігаючи перевантаженню окремих вузлів і забезпечуючи високу продуктивність мережі, оптимізований алгоритм Enhanced Adaptive Ant Colony стає потужним інструментом для підтримки стабільної та ефективної мережі з програмованою структурою.

Запропонований алгоритм порівнювався з Round Robin [4], Least Connections [5] і Adaptive Load Balancing [7], де всі алгоритми були перероблені на основі опублікованих псевдокодів, формулювань і блок-схем. Кожен алгоритм виконується 10 раз для кожного діапазону несправностей, і середнє значення береться для більш точного вимірювання.

Список показників продуктивності включає час виконання, середній час виконання і затримку на завдання, балансування навантаження і коефіцієнт успішності виконання.

В даному дослідженні зосередимось на часу виконання та середньому часу виконання.

Час виконання для всіх алгоритмів майже однаковий, коли немає помилок. Однак у міру збільшення частоти відмов час виконання для запропонованого алгоритму є найнижчим серед всіх (380 000мс на 50%). В той же час показник Round Robin склав 1 200 000мс, Least Connections - 800 000мс, Adaptive Load Balancing - 450 000мс.

Ситуація з середнім часом виконання очікувано така ж - запропонований алгоритм закінчує свою роботу швидше на 15-20% в порівнянні з іншими алгоритмами за рахунок динамічного розподілу параметрів.

В наступних дослідженнях оцінимо алгоритм по іншим критеріях продуктивності.

**Висновки.** У цій статті ми представляємо оптимізований метод балансування навантаження в мережах SDN, заснований на вдосконаленому алгоритмі адаптивних мурашиних колоній. Сучасні мережі стикаються зі зростаючим обсягом даних та різноманітними вимогами, що загрожує їх ефективності та стабільності. Для подолання цих викликів балансування навантаження в мережах стає критично важливим завданням.

Заснований на мурашиному алгоритмі, запропонований метод використовує ідеї адаптивності та динамічного налаштування параметрів для досягнення оптимального балансування навантаження. Цей метод дозволяє мережі адаптуватися до змін навантаження та забезпечити рівномірний розподіл даних між вузлами. Адаптивність алгоритму дозволяє підтримувати стабільний рівень продуктивності навіть в умовах динамічних змін навантаження.

Процес балансування навантаження включає кілька етапів, таких як ініціалізація, динамічне налаштування параметрів, покращений вибір маршруту, адаптивне оновлення

феромонів та пошук найкращого рішення. Кожен з цих етапів виконує важливу функцію в забезпеченні ефективного балансування навантаження.

Метод Enhanced Adaptive Ant Colony є важливим кроком на шляху до забезпечення відмовостійкості та оптимальної продуктивності мереж SDN. Враховуючи динаміку розвитку сучасних мереж та зростаючі вимоги до їх продуктивності, він дає можливість ефективно вирішувати проблему навантаження та забезпечувати надійну і швидку передачу даних.

Отже, оптимізований метод Enhanced Adaptive Ant Colony відкриває перспективи для подальших досліджень в області балансування навантаження в мережах SDN та розширення можливостей алгоритму для вирішення різноманітних задач в мережевих середовищах.

### Список використаних джерел

- [1] Machine learning for network automation: Overview, architecture, and applications / A. Garcia-Saavedra, P. Serrano, A. Banchs, X. Costa-Perez // *IEEE Communications Magazine*. – 2018. – Vol. 56, № 3. – P. 11-17.
- [2] Resilient SDN traffic engineering: A survey / L. Tang, S. Han, H. Zhang, M. Gerla // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2016. – Vol. 18, № 4. – P. 2682-2706.
- [3] Dorigo, M. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents / M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colomi // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. – 1996. – Vol. 26, № 1. – P. 29-41.
- [4] Jamal, M. A comparative study of software defined networking load balancer algorithms / M. Jamal, A. S. Siddiqui // *IEEE Access*. – 2020. – № 8. – P. 155905-155919.
- [5] Ghorbani, S. An efficient load balancing algorithm for software-defined networking / S. Ghorbani, M. R. Sama, B. Abolhasani // *In Proceedings of the 2015 IEEE/ACM 8th International Conference on Utility and Cloud Computing*. – 2015. – P. 80-85.
- [6] Chen, C. C. A weighted round robin algorithm for software defined networkin / C. C. Chen, M. Chen // *In Proceedings of the 2015 IEEE/ACM 8th International Conference on Utility and Cloud Computing*. – 2015. – P. 138-143.
- [7] Data center network virtualization: A survey. / M. F. Bari, R. Boutaba, R. Esteves, L. Z. Granville, M. Podlesny, G. Rabbani, Q. Zhang // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2013. № 15(3). – P. 1614-1634.
- [8] Load balancing strategy for SDN based on improved ant colony algorithm / Y. Ren, H. Luo, D. Xiang, L. Zeng, Y. Pan // *IEEE Access*. – 2019. – № 7. – P. 151536-151543.
- [9] Mehmood, R. Enhanced dynamic ant colony load balancing algorithm for SDN / R. Mehmood, F. Ahmed // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. – 2020. – Vol. 11. – P. 5907-5921.
- [10] Білий, В. С. Адаптивний метод балансування навантаження в програмно-керованих мережах / В. С. Білий, І. І. Пупський // *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. – 2019. – № 4 (44).

### References

- [1] Garcia-Saavedra, A., Serrano, P., Banchs, A., Costa-Perez, X. (2018). Machine learning for network automation: Overview, architecture, and applications. *IEEE Communications Magazine*, 56(3), 11-17. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700980.
- [2] Tang, L., Han, S., Zhang, H., Gerla, M. (2016). Resilient SDN traffic engineering: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4), 2682-2706. DOI: 10.1109/COMST.2016.2581599.
- [3] Dorigo, M., Maniezzo, V., Colomi, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1), 29-41. DOI: 10.1109/3477.484436.
- [4] Jamal, M., Siddiqui, A. S. (2020). A comparative study of software defined networking load balancer algorithms. *IEEE Access*, 8, 155905-155919.

[5] Ghorbani, S., Sama, M. R. B., Abolhasani, M. (2015). An efficient load balancing algorithm for software-defined networking. *Proceedings of the 2015 IEEE/ACM 8th International Conference on Utility and Cloud Computing* (pp. 80-85).

[6] Chen, C. C., & Chen, M. (2015). A weighted round robin algorithm for software defined networking. *Proceedings of the 2015 IEEE/ACM 8th International Conference on Utility and Cloud Computing* (pp. 138-143).

[7] Bari, M. F., Boutaba, R., Esteves, R., Granville, L. Z., Podlesny, M., Rabbani, G., & Zhang, Q. (2013). Data center network virtualization: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(3), 1614-1634.

[8] Ren, Y., Luo, H., Xiang, D., Zeng, L., & Pan, Y. (2019). Load balancing strategy for SDN based on improved ant colony algorithm. *IEEE Access*, 7, 151536-151543.

[9] Mehmood, R., Ahmed, F. (2020). Enhanced dynamic ant colony load balancing algorithm for SDN. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11, 5907-5921. DOI: 10.1007/s12652-020-01906-4.

[10] Bilyi, V. S., Pupszyn, I. I. (2019). Adaptive method of load balancing in software-controlled networks. *Information technologies and computer engineering*, 4(44).

Отримано 15.09.2023

UDC 681.3

**Vadym Shchur<sup>1</sup>, Yuriy Kulakov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD Student of the Department of Computer Engineering  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [vadimshchur@gmail.com](mailto:vadimshchur@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8925-4813>

<sup>2</sup> Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Computer Engineering  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [ya.kulakov@gmail.com](mailto:ya.kulakov@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8981-5649>

## OPTIMISED ADAPTIVE LOAD BALANCING METHOD IN SDN NETWORKS BASED ON ANT COLONY OPTIMISATION

*This paper presents an important contribution to the field of software-defined networking (SDN) through the development and improvement of a load balancing method that uses adaptive ant colonies. Modern networks face significant challenges, such as the growth of data and the diversity of user requirements, which can significantly affect their efficiency and reliability. In this context, load balancing becomes an extremely important task.*

*The proposed method is based on the ideas of the ant algorithm and uses adaptability and dynamic parameter tuning to achieve optimal load balancing. This allows the network to adapt to changes in load and ensures an even distribution of data between nodes. An important advantage of this method is its ability to maintain stable performance even in situations where the load changes dynamically.*

*The load balancing process involves several key steps, such as initialisation, dynamic parameter tuning, improved route selection, adaptive pheromone updating, and finding the best solution. Each of these stages is aimed at providing efficient and reliable load balancing.*

*The proposed Enhanced Adaptive Ant Colony method is an important step towards improving fault tolerance and optimal performance in SDN networks. Given the rapid development of modern networks and the growth of their performance requirements, this method opens up opportunities for efficient load balancing and ensuring reliable and fast data exchange.*

*In general, the optimised Enhanced Adaptive Ant Colony method opens up prospects for further research in the field of load balancing in SDN networks and extending the capabilities of the algorithm to solve various problems in network environments. It introduces a new approach to ensuring the reliability and performance of SDN networks and can become an important tool for network engineers and researchers in this area.*

**Keywords:** software-defined networks; load balancing; SDN networks; adaptive ant colony method; dynamic parameter adjustment.

Table: 1. Fig.: 1. References: 10.

**Юлія Ткач<sup>1</sup>, Михайло Шелест<sup>2</sup>, Марина Синенко<sup>3</sup>, Тарас Петренко<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> доктор педагогічних наук, завідувач кафедри кібербезпеки та математичного моделювання національного університету «Чернігівська політехніка»

E-mail: [tkachym79@gmail.com](mailto:tkachym79@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8565-0525>

Scopus Author ID: 57193026076

<sup>2</sup> доктор технічних наук, професор кафедри кібербезпеки та математичного моделювання національного університету «Чернігівська політехніка»

E-mail: [mishel3141@gmail.com](mailto:mishel3141@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1090-0371>

Scopus Author ID: 57211429755

<sup>3</sup> кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри кібербезпеки та математичного моделювання національного університету «Чернігівська політехніка»

E-mail: [mara.a.snnk@gmail.com](mailto:mara.a.snnk@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8961-533X> Scopus Author ID: 55884350800

<sup>4</sup> кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та математичного моделювання національного університету «Чернігівська політехніка»

E-mail: [4650364@gmail.com](mailto:4650364@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5571-3815>

Scopus Author ID: 57193026484

## ІСТОРІЯ ВИНИКНЕННЯ КЛЕПТОГРАФІЇ ТА ЇЇ МІСЦЕ В БЕЗПЕЦІ ІНФОРМАЦІЇ

**Актуальність теми дослідження.** Інформатизація суспільства породжує нові загрози: користувачами сучасних ІТ технологій стають не лише законослухняні громадяни, а й злочинці, шахраї чи терористи, які використовують їх для скоєння злочинів. Тому будь-яка держава намагається контролювати свій сегмент кіберпростору. Для вирішення такої задачі можуть знадобитися методи нової наукової дисципліни – клептографії.

**Постановка проблеми.** Для боротьби з тероризмом необхідно прийняти рішення на офіційному державному рівні про впровадження відповідного контролю інформаційних систем та мереж. А чи існують надійні способи забезпечення ексклюзивного доступу спецслужб до інформації користувача при збереженні достатнього рівня стійкості до сторонніх зловмисників? Ці питання вирішує клептографія.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідження з клептографії, окрім класичних робіт, де впроваджено базові поняття та терміни, в основному присвячені виключно синтезу криптосистем із закладкам. Проте методи захисту від клептоатак наразі зводяться до традиційного криптоаналізу потенційно вразливих систем та видачі певних інтуїтивних рекомендацій щодо процесу розробки програмно-апаратних комплексів.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Межі інтересів клептографії мають бути значно ширші ніж дослідження закладок у криптосистемах та охоплювати теорію і практику створення та виявлення таємних каналів витоку конфіденційних даних принаймні в системах захисту інформаційних систем.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз причин виникнення клептографії як науки та напрямки її розвитку в системі знань з інформаційної безпеки, зокрема її зв'язок з криптографією та стеганографією.

**Виклад основного матеріалу.** Досліджено причини виникнення клептографії як науки та її місце в системі знань з інформаційної безпеки. Надані загальні рекомендації щодо захисту систем від клептографічних атак.

**Висновки.** Автори вважають, що до сфери клептографії слід віднести не тільки закладки у криптографічних системах, але й усі питання щодо методів і технологій створення та виявлення клептографічних каналів (штучно створених таємних каналів витоку конфіденційних даних) і виявлення клептоатак (обходу антивірусів, міжмережєвих екранів та інших засобів інформаційної безпеки тощо) в інформаційних системах.

**Ключові слова:** клептографія, стеганографія, криптографія, клептографічний канал, реінжиніринг, інформаційна безпека.

Рис.:2. Табл.1. Бібл.13.

**Актуальність теми дослідження.** Тайнопис, яким займаються криптографія чи стеганографія, з давніх часів був переважно прерогативою держави та військових (у середні віки – ще й церкви). Усі розробки технологій захисту інформації та відповідні наукові дослідження проводились у надрах спецслужб за завісою таємничості. Однак розвиток технологій та потреби суспільства у захисті зростаючих об'ємів інформації, що передаються або зберігаються, спонукало повільне перетікання накоплених спецслужбами знань і технологій у відкрите середовище із розгортанням подальших досліджень в різних наукових центрах.

Так, початком становлення *криптографії* як науки можна рахувати 1949 рік, коли була опублікована розсекречена робота Клода Шеннона «Теорія зв'язку в таємних системах» [1]. Під час Другої світової війни Шеннон займався зломом ворожих шифрів і саме він почав першим вивчати криптографію, використовуючи системний підхід. Наприклад, він дав визначення «цілком стійкого шифру» (шифру, який не можна зламати, маючи лише зашифроване повідомлення) та довів, що такі шифри можуть існувати (шифр Вернама).

На сьогоднішній день, з розвитком сучасних технологій, переважна більшість людей у повсякденному житті так чи інакше користується так званою «*цивільною криптографією*» – тобто криптографією, яка, на відміну від державної чи військової криптографії, покликана задовольняти потреби приватних осіб та організацій. Цивільна криптографія присутня у мобільному зв'язку, у банківських картах, в інтернет-браузерах при передачі інформації протоколом SSL/TLS тощо. З'явилися навіть побутові прилади, які підключені до Інтернету (технологія IoT, Internet-of-Things), – і звичайно ж, комунікації таких пристроїв між собою та їх власником мають бути захищені. Навіть автомобілі стали частиною IoT (концепція Connected Car) – а це питання безпеки не тільки особистої інформації водія, але і його життя.

За такою ж схемою у 90-х роках минулого сторіччя у відкритому просторі почала формуватися наука *стеганографія*. Незважаючи на те, що стеганографія як спосіб приховування секретних даних відома вже протягом тисячоліть, роком становлення сучасної стеганографії як науки можна вважати 1996 рік, коли на міжнародному семінарі InfoHiding-96 була введена єдина термінологія [2]. Методи «*цивільної стеганографії*» також зайняли своє місце у повсякденному житті суспільства, наприклад у таких технологіях, як цифрові водяні знаки (digital watermark) – для захисту авторських прав на цифровий об'єкт або цифрові відбитки пальців (digital fingerprinting) – для захисту виключного права на цифровий об'єкт.

Водночас користувачами цивільної криптографії або стеганографії стають не лише законослухняні громадяни, а й злочинці, шахраї чи терористи, які використовують сучасні технології для підготовки, скоєння та приховування злочинів. З погляду правоохоронних органів, криптографія (стеганографія) в їхніх руках безумовно дуже зручна та небезпечна зброя.

У зв'язку зі зростанням терористичних загроз суспільство вимагає вжити заходів, у тому числі найжорсткіших. Держава, як правило, із задоволенням йде назустріч таким побажанням і антитерористичні заходи, які проводять з боку держави, стали стосуватися також криптографії та стеганографії. Тому посилення вторгнення держави у цивільну криптографію – цілком очікувана та неминуча реакція державних інституцій і, насамперед, законодавців та спецслужб.

**Постановка проблеми.** З широким впровадженням сучасних інформаційних технологій у повсякденне життя все більше офіційних осіб стали заявляти, що для боротьби з тероризмом необхідно прийняти рішення на офіційному державному рівні про впровадження відповідних лазівок в інформаційні системи, мережі та засоби захисту, у тому числі у криптоалгоритми, які є державними стандартами. Не впадаючи в пафос слів про свободи та права людини, варто усвідомити, що ми стоїмо перед непростим вибором – гарантоване обмеження свобод чи можлива загроза десяткам, сотням, а то й тисячам життів. На жаль, однозначного рішення немає. Лазівки, призначені для захисту від тероризму, можуть стати зброєю для терористів у разі витоку конфіденційних даних про них (наприклад, лазівка в Connected Car дозволяє дистанційно керувати автомобілем). А чи

існують надійні способи забезпечення ексклюзивного доступу спецслужб до інформації користувача при збереженні достатнього рівня стійкості до сторонніх зловмисників? Цим питанням опікується наука *клептографія*.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідження з клептографії, окрім класичних робіт [3-4], де впроваджено базові поняття та терміни, в основному присвячено виключно синтезу криптосистем із закладкам (огляд таких методів є в [5-6]). Проте методи захисту від клептоатак наразі зводяться до традиційного криптоаналізу потенційно вразливих систем та видачі певних інтуїтивних рекомендацій щодо процесу розробки програмно-апаратних комплексів. Більш того, на наш погляд, предмет досліджень клептографії має бути значно ширшим та охоплювати усі методи і технології створення та виявлення штучних каналів витоків чутливих даних з інформаційних систем та їх систем захисту.

**Мета статті.** Метою є аналіз причин виникнення клептографії як науки та напрямки її розвитку в системі знань з інформаційної безпеки, зокрема її зв'язок з криптографією та стеганографією.

**Виклад основного матеріалу.** Будь-яка держава намагається контролювати принаймні свій сегмент кіберпростору. Це можливо різними способами. Наприклад, за рахунок колаборації державних структур (насамперед спецслужб США, Китаю та Росії) з великими фірмами-виробниками мікроелектроніки, обчислювальної та телекомунікаційної техніки з метою створення можливості збирання інформації про користувачів та доступу до їх інформації. До публікацій Едварда Сноудена і оприлюднення конкретних прикладів ніхто не був упевнений, що це відбувається насправді.

На даний час у ЗМІ неодноразово з'являлися дані про співпрацю зі спецслужбами відомих виробників засобів телекомунікацій (Cisco, Huawei), шифраторів (Crypto AG, Omnisec, Mils Electronic), програмного забезпечення (Microsoft), соціальних мереж (Facebook, Вконтакте, Однокласники), антивірусних систем (Касперський, Radware, McAfee), постачальників послуг електронної пошти та мережевих Інтернет-гігантів (Google, Yahoo, AT&T, CenturyLink, Verizon). Така співпраця включає розробку та вбудовування необхідних «бекдорів» з подальшою передачею спецслужбам таємних відомостей про вразливості в апаратному та програмному забезпеченні, в тому числі і про ключі шифрування, що діють.

Але така співпраця зі спецслужбами інколи може зіграти згубну роль для виробника. Яркою ілюстрацією цієї тези може служити 70-річна історія відомої швейцарської компанії Crypto AG, яка була заснована Б. Хагеліном у 1952 році та спеціалізувалася на комунікаційній та інформаційній безпеці.

Шифрувальну машину M-209 розміром із мильницю Борис Хагелін розробив ще перед Другою світовою війною. Через свої габарити вона була цілком придатна для використання у польових умовах, тому США закупили ліцензією та виробили більше 140 000 таких шифраторів. Першу шифрувальну машинку, яку Б. Хагелін виробив після закінчення війни у Швейцарії, просто шокувала американців - вона була занадто надійна. Тому за їх наполегливою вимогою компанія Crypto AG стала випускати шифратори з керованою стійкістю. Фактично це стало початком операції «Рубікон», однією з найбільших розвідувальних операцій з часів Другої світової війни [7].

У 1970 році компанія Crypto AG була викуплена через посередників у спільну власність ЦРУ США та БНД (федеральної служби розвідки) Німеччини. З того часу спецслужби (США, Німеччини та Великобританії) могли давати розробникам прямі вказівки



та читати секретні телеграми як можливих супротивників, так і дружніх країн. Шифратори Crypto AG купувалась багатьма країнами світу для організації зв'язку у військових відомствах та зі своїми дипломатичними представництвами. При цьому випускалися два типи машин: з якісними криптографічними алгоритмами (їх отримували Швейцарія, Швеція та деякі країни НАТО) та варіанти машин з вбудованим «бекдором», які дуже легко зламувалися тими, хто знав, як це можна зробити. Таку техніку отримували інші держави. Усього дешифрувалися секретні шифртелеграми понад ста країн, включаючи Іспанію, Італію, Ватикан, Пакистан, Аргентину, Іран, Лівію та інші арабські країни. Тому ЦРУ і БНД мали у своєму розпорядженні, наприклад, всю повноту інформації про Фолклендську війну 1982 року, про теракт у берлінській дискотеці «Ла Бель» у 1986 році або про захоплення заручників в Ірані в 1979 році — і все завдяки невеликій швейцарській компанії в кантоні Цуг.

В останніх лінійках шифраторів Grypto AG (Cryptomatic, Cryptofax, Cryptovox тощо) були реалізовані складні криптоалгоритми та нові криптографічні конструкції, які враховували зростання обчислювальних потужностей у світі. Усі вони були електронними пристроями, реалізованими на сучасній елементній базі, багат шарових друкованих платах із захищеними спеціалізованими процесорами для виконання криптографічних перетворень й захищеною пам'яттю, де зберігалися специфічні криптографічні параметри. У цих засобах була реалізована багатоступенева система ключів:

- структурні ключі, які були згенеровані виробником для кожного конкретного клієнта (відомства, країни);
- змінні довгострокові ключі, що змінювалися з певною періодичністю;
- сеансові ключі для кожного конкретного повідомлення.

При чому, структурні ключі були відомі виробнику, довгострокові ключі генерувалися по відомому виробнику алгоритму і мали деякі особливості. Крім того, структура самого шифрованого повідомлення включала також низку синхронізуючих елементів, що були отримані шляхом певних математичних перетворень над елементами ключів, криптографічними параметрами, мітками часу тощо. У разі потокового шифрування, синхропакети для початкової і автоматичної повторної синхронізації також формувалися специфічним чином. Кожен такий елемент ніс в собі певні відомості, які дозволяли будувати додаткові рівняння відносно елементів ключів і параметрів криптоперетворення, що загалом суттєво полегшувало задачу криптоаналітики.

У 2018 році після ряду скандалів Crypto AG була ліквідована, а Федеральна прокуратура Швейцарії, яка проводила розслідування діяльності компанії, зробила висновок, що операція «Рубікон», що проводилася у рамках співпраці «дружніх спецслужб», була цілком легальною і не суперечила як тодішнім, так і нинішнім правовим засадам та положенням.

Цей приклад показує, що спецслужби завжди приділяли увагу забезпеченню контролю чутливих технологій, що з'являлися на ринку. В їх надрах накоплено відповідний науково обґрунтований досвід для вирішення таких проблем. І це стосується не тільки криптографії, а й телекомунікаційних технологій та програмного забезпечення (у першу чергу операційних та антивірусних систем).

З широким впровадження сучасних інформаційних технологій в повсякдення життя все більше і більше офіційних осіб стали заявляти про необхідність ухвалення на офіційному державному рівні рішення про впровадження вразливостей в інформаційні системи, мережі

та пристрої, а також про обов'язкове впровадження лазівок у криптоалгоритми, які є державними стандартами. На даний час відомо як мінімум про два алгоритми, які були затверджені в США як федеральні стандарти і мають відповідні «бекдори».

Перший випадок - це стандарт криптографії з депонуванням ключів (проект Skipjack), де бекдор передбачався на апаратному рівні [8]. На початку дев'яностих минулого століття уряд США ініціював масовий випуск мікросхеми Clipper chip (VLSO MYK-78). Передбачалося, що вона встановлюватиметься у всі телефони і шифруватиме голосовий зв'язок, залишаючи АНБ можливість простого розшифрування за рахунок вбудованого бекдору. У центрі концепції Clipper була система депонування ключів (key escrow). На кожному пристрої з шифрувальним чіпом встановлювався криптоключ, який передавався уряду для депонування. Депонований ключ складався з двох частин, що окремо зберігалися в уповноважених урядових відомствах. Мікросхема генерувала сеансовий ключ, за допомогою якого шифрувала відкрите текстове повідомлення. Отриманий ключ шифрувався за допомогою ключа, що депонується. Після цього в зашифрованому вигляді, разом з ідентифікаційним номером мікросхеми, він приєднувався до шифрованого тексту. Якщо потрібно було побачити вміст повідомлення, зашифрованого з Clipper Chip, правоохоронці запитували депонований ключ у відповідних відомств. І вже використовуючи його, розшифровували сеансовий ключ і читали відкритий текст повідомлення. Тільки виняткова дорожняча проекту Skipjack не дозволила перетворити його на життя.

Другий випадок – це криптографічний генератор псевдовипадкових чисел NIST SP 800-90A, який використовує криптографію з еліптичною кривою (Dual\_EC\_DRBG, Dual Elliptic Curve Deterministic Random Bit Generator) [9]. Вважається, що АНБ США зберігає закритий ключ, який разом з помилками зміщення Dual\_EC\_DRBG дозволяє розшифровувати трафік SSL між комп'ютерами. Більш того, цей стандарт був успішно просунутий у міжнародні стандарти [10].

На даний час розгортається скандал щодо створення стандартів постквантової криптографії (PQC). Деніел Бернштейн, експерт з університету Чикаго, вважає [11], що NIST при участі АНБ припустився навмисних або випадкових помилок у розрахунках безпеки нових стандартів типу Kyber512. Цілком ймовірно, що бекдори закладено при розробці інших стандартів шифрування і не тільки у США.

Фахівці з криптоаналізу жартують, що на ринку завжди присутні лише два типи криптографічних продуктів: з відомими лазівками та ще не виявленими. Причому непомітними ці бекдори можуть залишатися роками. Постає питання: а чи взагалі існують надійні методи забезпечення ексклюзивного доступу спецслужб до інформації користувача при збереженні достатнього рівня стійкості від стороннього порушника?

І тут на вирішення цього питання з надр спецслужб у повсякденне життя вириває та формується ще одна наука - *клептографія* (англ. kryptography), яка вивчає теорію і практику побудови інформаційних систем, що містять безпечні та приховані штучні канали витоку секретної інформації шляхом впровадження вразливостей у систему захисту інформації.

Термін клептографія з'явився у 1998 році завдяки роботі відомих фахівців з криптографії А. Янга та М. Юнга [3-4]. Спочатку вони називали клептографією впровадження бекдора, що важко виявляється, виключно в схемах асиметричної криптографії. Такий бекдор давав можливість обчислити секретний ключ користувача за його відкритим ключем, але тільки тим, хто знав секрет. Згодом, вони розширили межі клептографії на інші види криптоалгоритмів, включаючи криптографічні протоколи.

Клептографія, як напрямок інформаційної безпеки, тісно пов'язана з криптографією та стеганографією (рис.1).

Зв'язок клептографії з криптографією обумовлено тим, що об'єктом її досліджень є клептографічна закладка, яка є частиною криптосистеми. Методи криптоаналізу часто використовуються для виявлення клептозакладок, тобто одночасно є інструментами клептоаналізу.

Клептографія близька також до стеганографії: їх базовим елементом є прихований канал (анг. subliminal channel, підсвідомий канал), який вперше запропонував Симмонс [12]. Будь-яка клептографічна атака ґрунтується на прихованому каналі передачі інформації. Саме вони у поєднанні з додатковими криптографічними методами забезпечують не виявлення цих атак.



Рис.1. Зв'язок клептографії з криптографією та стеганографією

Клептографічні методи дозволяють довести до досконалості приховування факту передачі додаткової інформації. У цьому сенсі простежується подібність до стеганографії, але є і відмінності (табл.1). Приховані клептографічні канали є частиною криптоалгоритму і дозволяють непомітно передавати інформацію з криптографічної системи або, навпаки, до криптографічної системи. Наприклад, додаткова інформація може міститись у цифровому підписі або у відкритому ключі шифрування.

Терміни клептографії лише формуються, наведемо деякі з них:

- клептографічний механізм (закладка, клептографічна лазівка) - особливість дизайну системи захисту, що дозволяє розробнику, який впровадив даний механізм, створювати канал витоку секретних даних;
- клептографічна атака – можливі зловмисні сценарії, що можуть виконуватися розробником закладки: клептографічна модифікація системи захисту, побудова системи захисту з закладкою, використання можливостей закладок тощо;

- стійкість до клептографічних атак – властивість системи, що полягає у неможливості побудови непомітної закладки або каналу витоку.

- клептографічний канал витоку – канал непомітного витоку секрету (прихований канал, subliminal channel), який практично може отримати розробник закладки і не можуть отримати інші учасники системи.

Таблиця 1. Відмінність методів клептографії та стеганографії

Критерій порівняння	Клептографія	Стеганографія
Мета	Корекція роботи системи в інтересах розробника чи спецслужби	Приховування факту передачі інформації між користувачами
Рівень абстракції	На рівні крипто протоколу	На рівні передачі даних (залежить від типу даних та параметрів мережі)
Спосіб застосування	Таємна модифікація системи або впровадження лазівки на етапі розробки	Попереднє узгодження між користувачами стегосистеми
Спосіб впровадження	Інтегрується реалізацію системи	Сторонній модуль, програма, плагін
Щільність передачі	Відносно висока	Відносно низька
Вектор протидії	Збереження захисних властивостей системи користувача	Унеможливлення обміну прихованою інформацією
Протидія передачі	Стойкий клептомеханізм не може бути виявленим чи отфільтрований без порушення роботи системи	Псування контейнеру без порушення загальної роботи системи

Надійний клептографічний канал передачі даних повинен володіти наступними властивостями:

- *невиявленість* - що означає неможливість виявлення клептографічної атаки виключно за зовнішніми ознаками, якщо система захисту (криптосистема в узькому сексі) є «чорною скринькою»;
- *стійкості до злону без проведення реінжинірингу* – неможливість перехоплення інформації без знання внутрішнього устрою системи захисту, тобто у рамках моделі «чорної скриньки»;
- *стійкості до злону групи пристроїв у результаті успішного реінжинірингу одного з них* - якщо група пристроїв працює за однаковим алгоритмом і з тими самими даними, то визначення в результаті реінжинірингу внутрішньої структури і стану одного з пристроїв не дозволяє визначити стан інших пристроїв групи, отже, і їх вихідні значення;
- *непередбачуваності вліво* - говорять, що послідовність непередбачувана вліво, якщо за довільною кількістю елементів послідовності неможливо визначити її попередні елементи. Тобто йдеться про непередбачуваність вліво для внутрішнього стану криптосистеми. Це актуально, наприклад, для неструктивного зворотного проектування. Атака називається стійкою до цього виду аналізу, якщо навіть при повному знанні внутрішньої схеми пристрою та її поточного стану неможливо дізнатися про її попередній стан;
- *повної непередбачуваності* - мається на увазі непередбачуваність вліво, а також неможливість визначення наступних станів системи захисту (непередбачуваність вправо). Очевидно, що якщо нападнику вдається визначити внутрішній стан системи і значення усіх змінних, то для повної непередбачуваності системи потрібна наявність у ній джерела ентропії.

Зауважимо, деякі властивості є залежними, наприклад: друга властивість може виконуватися лише у тому випадку, якщо виконується перша. Третя властивість має сенс,

лише якщо виконується друга, а п'ята – лише якщо виконується четверта. Інші властивості незалежні.

Для відповіді на питання чи існує клептографічний канал та аналізу його властивостей необхідно, як правило, провести реінжиніринг (англ. reverse engineering) - процес дослідження деякого готового пристрою, програми, системи, а також документації з метою визначення внутрішнього устрою апарата чи програми для відтворення принципу роботи. Існують дві моделі реінжинірингу:

- *недеструктивний реінжиніринг*, який дозволяє використовувати пристрій після проведення процедури реінжинірингу. Така модель найчастіше застосовується до програмних систем та, інколи, до апаратних систем, якщо атакуюча сторона володіє відповідними неруйнівними технологіями;
- *деструктивний реінжиніринг*, який дозволяє визначити внутрішню схему системи, але проте подальше функціонування даного екземпляру системи стає неможливим. Реінжиніринг може виявити встановлену закладку і навіть інколи використовувати її.

При аналізі роботи клептографічних систем зазвичай виділяють наступних трьох учасників:

- *розробник* – володіє інформацією про лазівку  $I_l$ , володіє секретним ключем до лазівки  $K_l$ , але не володіє секретним ключем користувача  $K_k$ ;
- *користувач* – володіє секретним ключем користувача  $K_k$ , у разі успішного реверс інжинірингу має інформацію про лазівку, але не володіє її секретним ключем  $K_l$ ;
- *зловмисник* – у разі успішного реверс-інжинірингу володіє інформацією про лазівку  $I_l$ , але не володіє її секретним ключем  $K_l$ , а також секретним ключем користувача  $K_k$ .

Передбачається, що зловмисник успішно провів реверс-інжиніринг до одного або кількох подібних пристроїв та отримав інформацію про лазівку  $I_l$ : код і вміст енергонезалежної пам'яті. Передбачається також, що зловмисник має доступ до всієї публічної інформації, включаючи загальнодоступні алгоритми, відкриті ключі, зашифровані тексти, підписи тощо. При цьому можна виділити два типи зловмисника:

- *зловмисник-відрізняльник* – мета якого полягає в тому, щоб відрізнити чесну реалізацію від нечесної;
- *зловмисник-криптоаналітик* – його мета полягає в тому, щоб зламати безпеку даного пристрою, який ніколи не піддавався реверс-інженірингу (це може включати знаходження закритого ключа користувача, дешифрування інформації, зашифрованих з відкритим ключем, підробку підпису тощо).

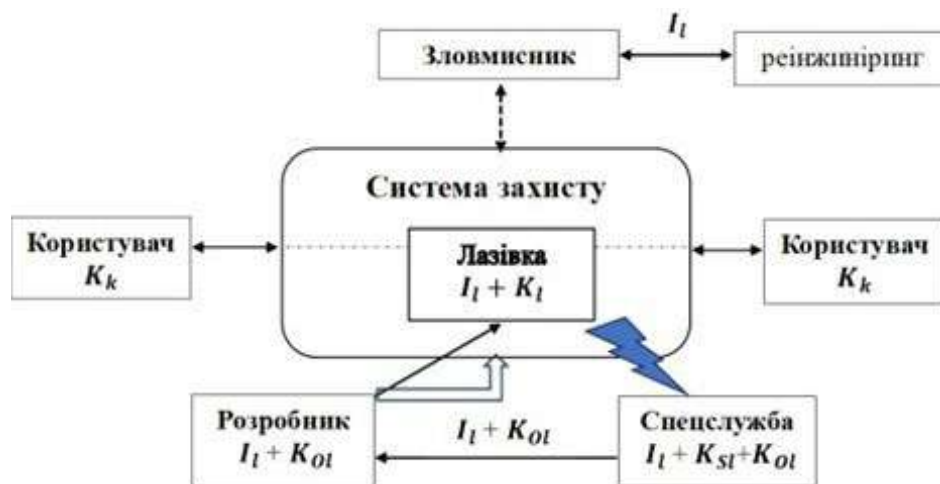


Рис.2. Механізм взаємодії учасників клептографічної системи

Зважаючи на тенденції останніх років, рольову модель можна видозмінити, додавши ще одного учасника – *спецслужбу* – та обмежити рівень знання розробника (рис.2). У цій новій моделі разом із «користувачем» та «зловмисником» діють:

- *спецслужба* - має інформацію про лазівку  $I_L$ , володіє секретним ключем до лазівки  $K_{Sl}$ , не володіє секретним ключем користувача  $K_k$ ;
- *розробник* - має інформацію про лазівку  $I_L$ , володіє відкритим ключем лазівки  $K_{Ol}$ , не володіє секретним ключем до лазівки  $K_{Sl}$ , не володіє секретним ключем користувача  $K_k$ .

Спецслужба видає розробнику інструкції з реалізації лазівки та відкритий ключ  $K_{Ol}$ , за допомогою якого шифруватимуться дані, що видаються через лазівку. Розробник знає весь механізм роботи  $I_L$ , але не знає секретного ключа  $K_{Sl}$ , тому при використанні не зможе отримати доступ до даних користувача (тобто користувач захищений не тільки від стороннього порушника, але і від розробника).

Зловмисник до проведення реверс-інжинірингу має менші можливості, ніж розробник, а після його проведення він може отримати механізм роботи лазівки  $I_L$ . Крім того, у зловмисника, якщо у нього є відповідні спроможності, є можливість вивчити архітектуру побудови системи захисту, розробити та впровадити свою закладку для створення клептографічного каналу.

На даний час існує тільки загальні рекомендації щодо захисту від клептографічних атак в криптосистемах, такі як проведення комплексного аналізу структури криптосистеми із залученням фахівців у галузі криптографії або композиція (каскадування) криптоперетворень, що мають походження з різних джерел:

1. Перед використанням криптографічного примітиву, його структура має бути ретельно вивчена та оцінена. Не можна беззастережно довіряти апаратним компонентам із заданою специфікацією (необхідна перевірка реалізації на відповідність специфікації, а також вивчення самої специфікації). Навіть програмні реалізації можуть бути небезпечні, особливо якщо вихідний код і документація розробника недоступні для перевірки.
2. Проходження тестів за формальними критеріями не гарантує відсутності прихованих лазівок. Зокрема, не можна приймати рішення про довіру лише виходячи з великого статистичного дослідження. Очевидно, для будь-якого фіксованого набору критеріїв можна побудувати криптосистему з лазівкою, яка задовольнятиме цим критеріям.
3. Непоганий захист від наявності прихованих лазівок у криптоалгоритмах дає композиція (каскадування) криптоперетворень, що мають походження з різних джерел.
4. Важливим є контроль за випадковістю. Цілком необхідно, щоб алгоритми генерації випадкових величин, що використовуються в криптографічних примітивах, були відкриті для користувача. Якщо є програмне забезпечення для вироблення ключів – воно має бути абсолютно надійним та довіреним. Добре щоб була можливість використовувати стороннє джерело випадкових чисел.
5. Краще якщо джерело випадковості, генератор ключів та алгоритм, що їх використовує – були три роздільні компоненти. При цьому має бути виключена можливість їхнього обходу, самі вони – з надійного джерела, а канали, що їх пов'язують, не допускають витоку інформації.

Поки що можна констатувати, що ліцензування систем захисту є єдиним способом боротьби з клептографією (якщо не враховувати інтереси спецслужб).

Загалом, можна виділити подальші напрямки клептографічних досліджень:

- побудова клептографічного каналу витоку шляхом модифікації стандартної системи захисту;
- створення нових систем захисту з вбудованим клептографічним каналом;

- виявлення клептографічних закладок як у загальній схемі системи захисту, так і у її конкретній реалізації;
- побудова системи захисту з гарантованою відсутністю клептографічного каналу витоку;
- побудова системи захисту із мінімізацією можливостей вбудовування клептозакладки.  
У ході дослідження за даними напрямками виникає ще ряд пов'язаних проблем:
- відсутність достатньої формалізації клептографії (не зважаючи на те, що наразі вже відомі чисельні практичні та теоретичні клептографічні системи, досі не сформована більш-менш загальна теорія);
- неадекватність наявних моделей надійності систем захисту у контексті клептографічних задач;
- відсутність методів оцінки ризиків, пов'язаних з клептографічними атаками;
- відсутність методів побудови елементів захисту з доведеною відсутністю клептозакладок;
- відсутність критеріїв оцінки потенційних клептографічних можливостей систем захисту та інші.

**Висновки.** В інформаційній безпеці все винаходять щонайменше двічі: один раз спецслужбами “у закриті”, а вдруге - науковцями “у відкриті” (в деяких випадках навіть більше, ніж двічі - і це нормально). Криптографія цей шлях вже пройшла, стеганографія ще проходить, а для клептографії усе тільки починається.

Усталений підхід до клептографії, що вивчає тільки методи потайного ослаблення елементів систем шифрування (генерації ключів, цифрового підпису, обміну ключами, генераторів псевдовипадкових чисел, криптоалгоритмів) для їх використання з нелегальною метою, є підходом *в узькому сенсі*, який відносить клептографію до розділу криптографії.

Але створення та виявлення клептографічних каналів актуально і для інших систем захисту інформації. Тому автори роботи стверджують, що межі клептографії повинні бути значно ширшими і не обмежуються тільки криптосистемами. Нашим даним загрожують не тільки шпигуни та хакери, а й виробники широкого діапазону пристроїв захисту, каналів зв'язку та інформаційних систем, а, подекуди, до них додаються ще “неконтрольовані” спецслужби.

У зв'язку з цим, наука клептографія *в широкому сенсі* має досліджувати усі механізми непомітного викрадення інформації користувача з інформаційних систем. Наприклад, близько до класичних задач клептографії примикають програмні та апаратні закладки (у тому числі систем захисту інформації), які часто встановлюються самими розробниками або їх контрагентами. Тому вважаємо, що до сфери інтересів клептографії слід віднести усі питання щодо методів і технологій створення та виявлення клептографічних каналів (штучно створених таємних каналів витоку конфіденційних даних), а також виявлення клептографічних атак (обходу антивірусів, міжмережевих екранів та інших засобів інформаційної безпеки тощо).

#### Список використаних джерел

1. Shannon, C. E. Communication Theory of Secrecy Systems / C. E. Shannon // Bell System Technical Journal. – 1949. – Vol. 28. Is. 4, oct. – P. 656-715.
2. Phitzmann, B. Information hiding terminology / B. Phitzmann // Information Hiding: First International Workshop "InfoHiding'96", Springer as Lecture Notes in Computing Science. – 1996. – Vol. 1174. – P. 374-350.

3. Young A. Kleptography: using Cryptography against Cryptography / A. Young, M. Yung // EURO-CRYPT'97. Series: Lecture Notes in Computer Science. – Springer, 1998. – Vol. 1233. – P. 62-74.
4. Young, A. Malicious Cryptography. Exposing Cryptovirology / A. Young, M. Yung. – Wiley Publishing, Inc. 2004. – 419 p.
5. Коваленко, Б. А. Методи та моделі побудови криптосистем стійких до клептографічних модифікацій : дис. ктн за спеціальністю 05.13.21. / Б. А. Коваленко; НАУ. – Київ, 2019.
6. Kovalenko B. Kleptography trapdoor free cryptographic protocols [Electronic resource] / B. Kovalenko, A. Kudin // Cryptology ePrint Archive, Report. – 2018. – 989. – Access mode <https://eprint.iacr.org/2018/989>.
7. Operation Rubikon ZDFmediathek. [Electronic resource]. – Access mode <https://www.zdf.de/politik/frontal/operation-rubikon-100.html>
8. National Institute of Standards and Technology. Escrowed Encryption Standard. NIST FIPS PUB 185. – U.S. Department of Commerce, 1994.
9. National Institute of Standards and Technology. Recommendation for Random Number Generation Using Deterministic Random Bit Generators. NIST Special Publication 800-90A, Rev. 1, 2012 [Electronic resource] First version June 2006, second version March 2007. – Access mode : <http://csrc.nist.gov/publications/PubsSPs.html#800-90A>.
10. ISO/IEC 18031:2005. Information technology – Security techniques – Random bit generation.
11. Matthew Sparkes Mathematician warns US spies may be weakening next-gen encryption [Electronic resource] // NewScientist. – 2023. – 10 October. – Access mode : <https://www.newscientist.com/article/2396510-mathematician-warns-us-spies-may-be-weakening-next-gen-encryption>
12. Simmons, G. The Prisoners' Problem and the Subliminal Channel / G. Simmons // Plenum Press. In Proceedings of Crypto '83. – 1984. – P. 51-67.

### References

1. Shannon, C. E. (1949). Communication Theory of Secrecy Systems. *Bell System Technical Journal*, 28, 4, 656-715.
2. Phitzmann, B. (1996). Information hiding terminology. *Information Hiding: First International Workshop "InfoHiding'96", Springer as Lecture Notes in Computing Science, vol.1174*, 374-350.
3. Young, A., Yung, M. (1998). Kleptography: using Cryptography against Cryptography. *In book: EURO-CRYPT'97 (series: Lecture Notes in Computer Science), 1233*, 62–74.
4. Young, A., Yung, M. (2004). Malicious Cryptography. Exposing Cryptovirology. Wiley Publishing, Inc.
5. Kovalenko, B. (2019). Methods and models for developing cryptosystems resistant to kleptographic modifications : *Candidate's thesis*. Kyiv, National Aviation University.
6. Kovalenko, B., Kudin, A. (2018). Kleptography trapdoor free cryptographic protocols. *Cryptology ePrint Archive, Report 2018/989*. <https://eprint.iacr.org/2018/989>.
7. Operation Rubikon. ZDFmediathek. (February 11, 2020). <https://www.zdf.de/politik/frontal/operation-rubikon-100.html>
8. National Institute of Standards and Technology. (1994). Escrowed Encryption Standard. NIST FIPS PUB 185, U.S. Department of Commerce.
9. National Institute of Standards and Technology. (2007). Recommendation for Random Number Generation Using Deterministic Random Bit Generators. – NIST Special Publication 800-90A, Rev. 1, 2012. First version June 2006, second ver-sion March 2007. <http://csrc.nist.gov/publications/PubsSPs.html#800-90A>.
10. ISO/IEC 18031:2005. Information technology – Security techniques – Random bit generation.
11. Sparkes, M. (October 10, 2023). Mathematician warns US spies may be weakening next-gen encryption. *NewScientist*. <https://www.newscientist.com/article/2396510-mathematician-warns-us-spies-may-be-weakening-next-gen-encryption>
12. Simmons, G. (1984). The Prisoners' Problem and the Subliminal Channel. Plenum Press. *In Proceedings of Crypto '83*, 51-67.



UDC 004.056

**Yuliia Tkach<sup>1</sup>, Mykhailo Shelest<sup>2</sup>, Maryna Synenko<sup>3</sup>, Taras Petrenko<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Doctor of Pedagogical Sciences, Head of the Department of Cybersecurity and Mathematical Simulation,  
Chernihiv Polytechnic National University

E-mail: [tkachym79@gmail.com](mailto:tkachym79@gmail.com) ORCHID: <https://orcid.org/0000-0002-8565-0525> Scopus Author ID: [57193026076](https://orcid.org/57193026076)

<sup>2</sup> Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Cybersecurity and Mathematical Simulation,  
Chernihiv Polytechnic National University

E-mail: [mishel3141@gmail.com](mailto:mishel3141@gmail.com) ORCHID: <https://orcid.org/0000-0003-1090-0371> Scopus Author ID: [57211429755](https://orcid.org/57211429755)

<sup>3</sup> PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Cybersecurity and Mathematical Simulation,  
Chernihiv Polytechnic National University

E-mail: [mara.a.snnk@gmail.com](mailto:mara.a.snnk@gmail.com) ORCHID: <https://orcid.org/0000-0002-8961-533X> Scopus Author ID: [55884350800](https://orcid.org/55884350800)

<sup>4</sup> PhD in Technical Science, Associate Professor of the Department of Cybersecurity and Mathematical Simulation,  
Chernihiv Polytechnic National University

E-mail: [4650364@gmail.com](mailto:4650364@gmail.com) ORCHID: <https://orcid.org/0000-0001-5571-3815> Scopus Author ID: [57193026484](https://orcid.org/57193026484)

## THE HISTORY OF KLEPTOGRAPHY AND ITS PLACE IN INFORMATION SECURITY

**Urgency of the research.** Intensive informatization of society creates new threats: users of modern IT technologies become not only law-abiding citizens, but also criminals, fraudsters or terrorists who use them to commit crimes. Therefore, any state tries to control, at least, its segment of cyberspace. Solving such a problem may require methods studied by a new scientific discipline - kleptography.

**Target setting.** In order to fight terrorism, it is necessary to make a decision at the official state level to implement appropriate control of information systems and networks. And are there reliable ways to ensure exclusive access of special services to user information while maintaining a sufficient level of resistance to third-party attackers? These questions are solved by kleptography.

**Actual scientific researches and issues analysis.** Modern research on kleptography, apart from the classic works of A. Young and M. Jung, where the basic concepts and terms are introduced, is mainly devoted exclusively to the synthesis of cryptosystems with backdoors. However, methods of protection against kleptoattacks are currently limited to traditional cryptanalysis of potentially vulnerable systems and issuing certain intuitive recommendations regarding the process of developing software and hardware complexes.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** The scope of interests of kleptography should be much wider than the research of backdoors in cryptosystems and include the theory and practice of creating and detecting secret channels of leakage of confidential data in information systems.

**The research objective.** The purpose of the article is to analyze the reasons for the emergence of kleptography as a science and the direction of its development in the information security knowledge system, in particular its connection with cryptography and steganography.

**The statement of basic materials.** The reasons for the emergence of kleptography as a science and its place in the system of information security knowledge have been studied. General recommendations for protecting systems against kleptographic attacks are provided.

**Conclusions.** The authors believe that the field of kleptography should include not only backdoors in cryptographic systems, but also all issues related to the methods and technologies of creating and detecting kleptographic channels (artificially created secret channels for leaking confidential data) and detecting kleptoattacks (bypassing antiviruses, internet screens and other means information security, etc.).

**Keywords:** kleptography, steganography, cryptography, kleptographic channel, reverse engineering, information security.  
Fig.:2. Table:1. References:15.

## РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI DOI 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-162-169

УДК 664.664.4

**Наталія Ющенко<sup>1</sup>, Наталія Буяльська<sup>2</sup>, Вікторія Челябієва<sup>3</sup>, Наталія Березкина<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>здобувач вищої освіти, гр. МХТ-221

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [yuschenko.natasha@gmail.com](mailto:yuschenko.natasha@gmail.com)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та екології

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [buialaska@gmail.com](mailto:buialaska@gmail.com) ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6800-5604> ResearcherID: G-2935-2014

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та екології

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [vika.chl@ukr.net](mailto:vika.chl@ukr.net) ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5364-4633> ResearcherID: AAA-3194-2020

<sup>4</sup>старший викладач кафедри харчових технологій та екології

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [galenko94@gmail.com](mailto:galenko94@gmail.com)

### ТЕХНОЛОГІЯ КЕКСІВ З ДОДАВАННЯМ КАЛИНИ ЗВИЧАЙНОЇ (*VIBURNUM OPULUS L.*) ТА ГАРБУЗА ЗВИЧАЙНОГО (*CUCURBITA PEPO L.*)

Розроблено технологію кексів з додаванням пюре з плодів калини звичайної (*Viburnum opulus L.*) та подрібненого насіння гарбуза звичайного (*Cucurbita pepo L.*). За основу взято рецептуру кексу «Столичний». Проведено аналіз органолептичних показників, вмісту мінеральних речовин (Ca, Cu, Fe, Mg, P) та енергетичної цінності кексів з додаванням 5 %, 10 % та 15 % зазначених інгредієнтів із нетрадиційної рослинної сировини. Встановлено, що внесення в рецептурну суміш пюре калини звичайної та насіння гарбуза звичайного в кількості 10 % призводить до найкращих органолептичних характеристик кексів, знижує їх загальну калорійність, покращує мінеральний склад.

**Ключові слова:** борошняні кондитерські вироби; збагачені кекси; рослинні добавки; калинове пюре; гарбузове насіння; органолептичні показники якості.

Рис.: 3. Табл.: 5. Бібл.: 8.

**Актуальність теми дослідження.** Повноцінне харчування є одним із найважливіших складових забезпечення життєдіяльності населення. З ним безпосередньо пов'язані рівень захворюваності людей, демографічні та економічні показники країни. В Україні проблема функціонального харчування набуває особливої гостроти у зв'язку з несприятливими екологічними умовами, зниженням життєвого рівня населення і загалом фізичної активності. Сучасний розвиток суспільства, спрямований на підвищення якості та збільшення тривалості життя, зростання народжуваності, призводить до підвищеного попиту на якісні продукти харчування та розширення їхнього асортименту.

Для задоволення зазначеного попиту актуальною областю досліджень є створення нових чи вдосконалення існуючих технологій виготовлення харчових продуктів. Як один із напрямків, який має значний потенціал, можна розглядати збагачення продуктів харчування за рахунок додавання рослинної сировини з високими показниками біологічної цінності.

Серед продуктів харчування важливе місце у раціоні людей різного віку займають борошняні кондитерські вироби. На сьогоднішній день вони характеризуються різноманітним асортиментом та ціною доступністю для населення.

Традиційним видом кондитерських виробів є кекси. Однак, сировина, що використовується при виробництві кексів, містить небагато мінеральних речовин та вітамінів, які руйнуються в подальшому технологічному процесі, а тому знижується біологічна цінність продукту. Тим не менш, рецептуру кексів можна коригувати за рахунок збагачення їх рослинною сировиною. Це дає можливість створювати нові продукти функціонального призначення з підвищеною харчовою цінністю.

Серед рослин, сировина з яких може бути використана як інгредієнт для збагачення кексів, можна виділити калину звичайну (*Viburnum opulus* L.) і гарбуз звичайний (*Cucurbita pepo* L.). Плоди першого виду містять значну кількість органічних кислот, мінеральних речовин (кальцій, калій, магній, цинк, купрум, ферум, манган, селен, бор, йод та фосфор), вітаміни (А, С, Р, К, Е), пектини, дубильні речовини, флавоноїди та амінокислоти [1]. Плоди другого виду багаті на пектин, клітковину, білки, ферменти, вітаміни С, В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, РР, Е, каротин, мінеральні речовини: солі калію, кальцію, магнію, феруму, фосфору, кобальту. Його вживання збільшує жовчовиділення, поліпшує функцію кишок, посилює водно-сольовий обмін [2].

**Постановка проблеми.** Розробка технології кексів з більш високими показниками біологічної цінності за рахунок додавання в існуючу рецептуру нових компонентів, приготованих з калини звичайної і гарбуза звичайного, вимагає проведення досліджень для отримання продукту, що характеризується органолептичними показниками, звичними і, відповідно, привабливими для людей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для збагачення кексів використовують борошно нутове, гречане, кукурудзяне, рисове, ячмінне, зерна та насіння соняшника, кунжуту, плодово-ягідну та овочеву сировину, їх порошки, пасти, пюре, кріопасти та сиропи. Їх фізіологічно функціональними інгредієнтами є харчові волокна, вітаміни, мінеральні речовини, амінокислоти [3].

В якості нетрадиційної сировини для збагачення кексів також використовують гарбуз звичайний. Слід зазначити, що крім нього, у технології кексів застосовують і інший споріднений вид – гарбуз велетенський (*Cucurbita maxima* Duchesne ex Lam.), який служить джерелом натуральних антиоксидантів [4].

Досліджено можливість введення в рецептуру кексів гарбузового насіння в кількості 20–35 %. Відмічено, що покращення органолептичних властивостей кексів відбувалося при введенні до рецептури збагачувачів до 30 %. Випечені кекси мали незначні тріщини та розриви, стан м'якушки відзначався пористою структурою з рівномірним розподіленням добавки. При внесенні гарбузового насіння у кількості 35 % погіршився стан м'якушки, помітно відчувався присмак добавки, для поверхні виробу було характерне випресовування олії [5]. За результатами інших досліджень найкращі показники були отримані при введенні в рецептуру насіння гарбуза в кількості 50 % [6].

Крім гарбузового насіння використовувалися також шматочки свіжого гарбуза, що вказує на широкі можливості застосування даної рослини для приготування кексів з підвищеними показниками харчової цінності [7].

Калина звичайна також використовується як нетрадиційна рослинна сировина для виробництва борошняних кондитерських виробів [8]. Однак вона фактично не розглядалася як нетрадиційна рослинна сировина для виробництва кексів. Наявні дані мають фрагментарний характер.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** На відміну від збагачення продуктів харчування нетрадиційною рослинною сировиною, отриманою з одного виду рослин, технології, що враховує одночасне використання кількох рослинних видів, не приділялося належної уваги. Можливості використання калини звичайної у технології кексів вивчено недостатньо. Поєднання добавок, отриманих з гарбуза звичайного та калини звичайної для виготовлення кексів, раніше не застосовувалося.

**Метою роботи** є розроблення технології кексів, збагачених подрібненим насінням гарбуза звичайного та пюре калини звичайної.

**Виклад основного матеріалу.** При розробці нової рецептури кексів у якості контролю обрали рецептуру кексу «Столичний». Для експериментальних досліджень використовували насіння гарбуза та пюре з калини в однакових кількостях по 5 %, 10 %, 15 % кожної добавки відповідно. Використані під час досліджень сировина та матеріали відповідали вимогам діючих нормативно-технічних стандартів.

Замість тіста проводили за рецептурою, розрахованою на основі уніфікованої рецептури кексу «Столичного». При приготуванні виробів з добавками для них був зроблений перерахунок рецептур на основі контролю з врахуванням заміни вершкового масла та пшеничного борошна калиновим пюре та подрібненим насінням гарбуза звичайного відповідно у кількості по 5 %, 10 % і 15 %. Рецептури наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Рецептура для випікання кексів

Сировина	Витрати сировини на порцію, г			
	Контроль	5 % внесених добавок	10 % внесених добавок	15 % внесених добавок
Борошно пшеничне вищого сорту	80,0	76,0	72,0	68,0
Цукор-пісок	60,0	60,0	60,0	60,0
Цукор ванільний	2,0	2,0	2,0	2,0
Масло вершкове	60,0	57,0	54,0	51,0
Меланж	46,0	46,0	46,0	46,0
Розпушувач	2,0	2,0	2,0	2,0
Сіль	1,0	1,0	1,0	1,0
Родзинки	60,0	60,0	60,0	60,0
Калинове пюре	–	3,0	6,0	9,0
Насіння гарбуза	–	4,0	8,0	12,0
<b>Разом</b>	<b>311,0</b>	<b>311,0</b>	<b>311,0</b>	<b>311,0</b>

Для приготування кексів розм'якшене вершкове масло збивали 7–10 хв., потім додавали цукор, ванільний цукор та збивали ще 5–7 хв. Потім при перемішуванні вносили меланж з метою рівномірного розподілення жиру у тісті щоб забезпечити однорідну, дрібнопористу структуру кексів. До збитої маси додавали розпушувач, сіль, ретельно перемішували 10–15 хв., потім додавали борошно. Замішували 10–15 хв. Готове тісто розклали по формах, випікали при температурі 200–210°C 30–40 хв.

Розроблена технологія із внесенням калинового пюре та гарбузового насіння відрізняється від традиційної тим, що передбачає попередню підготовку добавок. Калинове пюре перетирається на ситі, а гарбузове насіння подрібнюється до пастоподібного стану. Добавки вносяться після додавання меланжу.

Маса тістової заготовки, яку вносили у форму – 78 г, маса готового виробу – 70 г. Втрати через упікання та усихання виробу становлять 10,12 %.

Після випікання поведена органолептична оцінка виробів. Органолептичні показники відповідно до ДСТУ 4683:2006 оцінювали профільним методом. Для опису якості продукту і визначення величини різниці між зразками кексів, застосовували просту п'ятибальну шкалу оцінки.

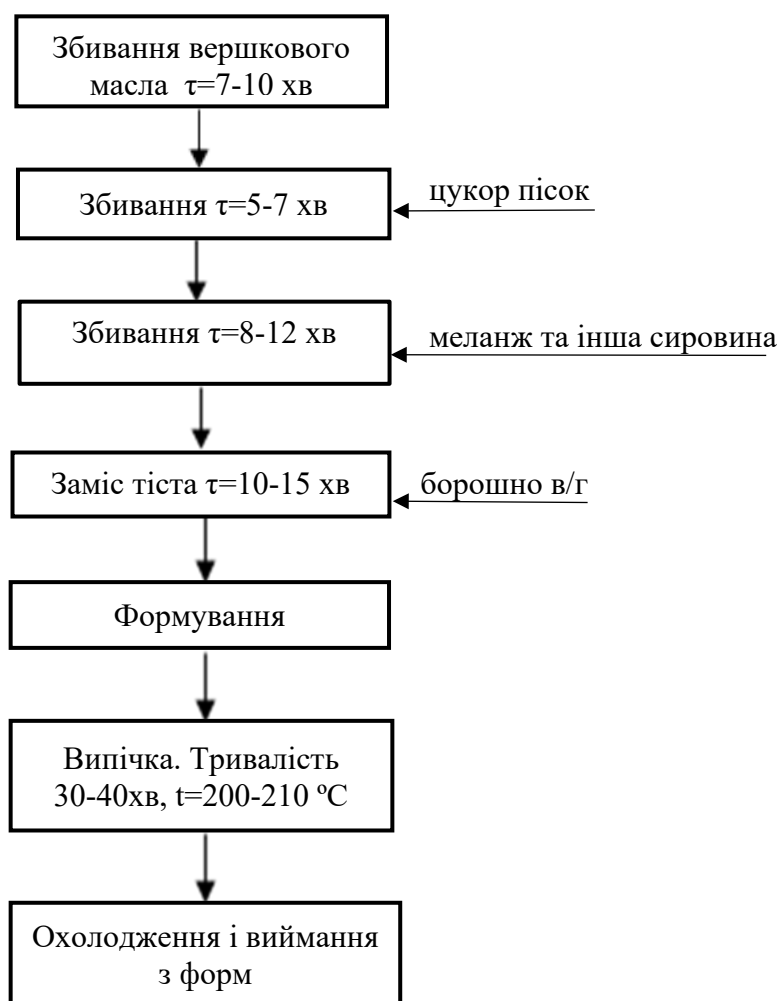


Рис. 1. Технологічна схема приготування кексів

Готові зразки виробів з добавками насіння гарбуза та калинового пюре представлені на рис. 2.

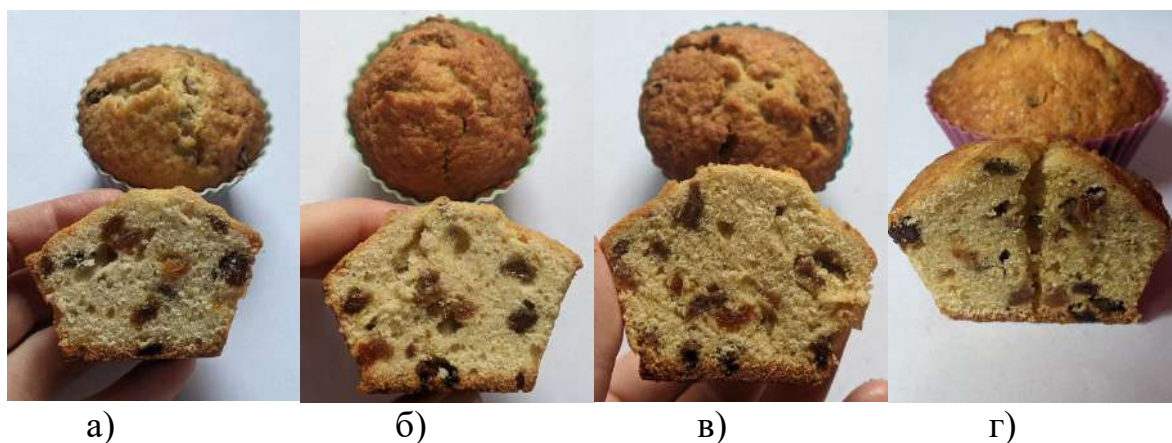


Рис. 2. Готові вироби  
 а) контроль; б) з додаванням 5 % калинового пюре та 5 % насіння гарбуза;  
 в) з додаванням 10 % калинового пюре та 10 % насіння гарбуза;  
 г) з додаванням 15 % калинового пюре та 15 % насіння гарбуза

Випечені кекси мали приємний смак та аромат, зразок №1 та №2 з добавками калини звичайної та гарбуза звичайного в кількості по 5 та 10 % кожної добавки мали ледь відчутний присмак гарбузового насіння та калини. При додаванні 15 % кожної добавки спостерігався більш виражений присмак рослинної сировини, дещо навіть гіркуватий присмак. Результати органолептичного дослідження наведені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Органолептична оцінка якості готових кексів

Показник	Контроль (без добавки)	Доза гарбузового насіння і така ж кількість пюре калини в рецептурі кексів за аналогією «Столичного»		
		5 %	10 %	15 %
Зовнішній вигляд	Форма правильна, з тріщинами та незначними підривами	Форма правильна, з тріщинами та незначними підривами		Форма правильна, з тріщинами та підривами
Колір	Скоринки – золотавий, м'якушки – світло-жовтий	Скоринки – золотавий, м'якушки – жовтий	Скоринки – золотавий, м'якушки – світло-оливковий	Скоринки – золотаво-оливковий, м'якушки – оливковий
Вид в розломі	Кекси добре пропечені, без слідів непромісу з рівномірними вкрапленнями родзинок	Кекси добре пропечені, без слідів непромісу, з рівномірними вкрапленнями родзинок, гарбузового насіння та пюре калини		Дещо глибкуваті, з порожнечою всередині в декількох аналогічних зразках, добавки рівномірно розподілені
Запах	Властивий даному виробу, без стороннього аромату	Властивий даному виробу, із легким ароматом насіння гарбуза та калини		Властивий даному виробу, з яскраво вираженим ароматом гарбузового насіння та калини
Смак	Приємний, солодкий без сторонніх присмаків	Приємний, солодкий, з легким присмаком гарбузового насіння		Злегка солодкий, дещо гіркуватий, з вираженим присмаком калини та гарбузового насіння

За даними таблиці 2 можна зробити висновок, що дозування калинового пюре та гарбузового насіння у кількостях 5 %, 10 % кожної добавки незначно впливає на органолептичні показники якості кексів. Зі збільшенням дозування до 15 % калини звичайної та 15 % гарбуза звичайного органолептичні показники кексів погіршуються, деякі вироби виходять з порожниною всередині, дещо незвичним присмаком, іноді гіркуватим, а також утворюються великі підриви на поверхні виробів.

У таблиці 3 наведена оцінка виробів профільним методом.

Таблиця 3 – Органолептична оцінка готових виробів бальним методом

Дослідні зразки	Оцінки за показниками якості					Загальна оцінка
	Зовнішній вигляд	Вид на розломі	Колір	Смак	Запах	
Контрольний зразок	5	5	5	4	5	4,8
Зразок № 1	5	4	4	5	5	4,6
Зразок № 2	5	5	4	5	5	4,8
Зразок № 3	4	3	4	3	4	3,6

За результатами органолептичної оцінки профільним методом найкращим з дослідних зразків був зразок №2, до рецептури якого входило по 10 % добавок. Він отримав таку ж оцінку як і контрольний виріб – 4,8. Таким чином, оптимальне дозування добавок калини звичайної та гарбуза звичайного в рецептурі кексів за аналогією кексу «Столичний» становить по 10 %.

Результати органолептичної оцінки представлені на рис. 2.



Рис. 2. Профілограма органолептичної оцінки кексів залежно від частки заміни в рецептурі пшеничного борошна та вершкового масла на гарбузове насіння і таку ж кількість калинового пюре

Порівняльна характеристика поживної (харчової) та енергетичної цінностей (з врахуванням коефіцієнтів засвоєння та втрат на теплову обробку) дослідних зразків кексів №1, №2 та №3 з контрольним зразком наведена в таблиці 4.

Таблиця 4 – Порівняльна характеристика харчової та енергетичної цінності дослідних зразків з контрольним зразком кексів

№ зразку кексів	Вміст			Енергетична цінність, ккал/100 г
	білків, г/100 г	жирів, г/100 г	вуглеводів, г/100 г	
Контроль	5,13	16,11	51,69	316,10
Зразок №1	5,31	15,99	51,03	313,54
Зразок №2	5,49	15,88	50,38	310,98
Зразок №3	5,67	15,77	49,71	308,42

Вміст білку в дослідних зразках не змінився або незначно (у 1,1 рази) підвищився порівняно з контрольним зразком, а вміст жирів і вуглеводів навпаки зменшився. Енергетична цінність (розрахована з врахуванням коефіцієнтів засвоєння та втрат на теплову обробку) знизилась.

Таблиця 5 – Характеристика ступеня задоволення добової потреби у мінеральних речовинах при вживанні 100 г кексів

Мінеральні речовини	Вміст у зразках				Норми добової фізіологічної потреби*		Рівень задоволення у %, від адекватного добового споживання							
	Контроль	Зразок № 1	Зразок № 2	Зразок № 3	Чоловіки до 60 років	Жінки до 60 років	чоловіки до 60 років				жінки до 60 років			
							Контроль	Зразок № 1	Зразок № 2	Зразок № 3	Контроль	Зразок № 1	Зразок № 2	Зразок № 3
Мінеральні речовини мг/100 г виробу														
Ca	23,18	24,85	26,51	28,17	1200	1100	1,93	2,1	2,21	2,35	2,11	2,26	2,41	2,56
Cu	0,11	0,13	0,15	0,17	1	1	11,0	13,0	15,0	17,0	11,0	13,0	15,0	17,0
Fe	1,24	1,39	1,54	1,69	15	17	8,27	9,3	10,3	11,3	7,3	8,2	9,1	9,9
Mg	11,99	18,75	25,51	32,27	400	500	3,0	4,7	6,4	8,1	2,4	3,8	5,1	6,5
P	70,01	84,39	98,78	113,16	1200	1200	5,83	7,03	8,23	9,43	5,83	7,03	8,23	9,43

\*згідно наказу №1073 МОН України від 03.09.2017

З наведених у таблиці 5 даних випливає, що внесення у рецептурну суміш пюре калини та насіння гарбуза покращує мінеральний склад готового виробу, помітно збільшується вміст елементів Кальцію, Магнію, Фосфору.

**Висновки.** Заміна 5 % інгредієнтів у рецептурі кексу «Столичний» шляхом внесення добавок калинового пюре або гарбузового насіння незначно вплинула на органолептичні показники якості виробів.

Заміна інгредієнтів (частини вершкового масла та борошна) у рецептурі кексу на калину звичайну та гарбуз звичайний покращує структуру та органолептичні характеристики кексів, знижує загальну калорійність виробів, за рахунок зменшення кількості жиру у рецептурі, покращує мінеральний склад.

При заміні 15 % інгредієнтів на калинове пюре або насіння гарбуза органолептичні показники кексів погіршились, деякі вироби мали порожнину всередині, нехарактерний присмак, іноді гіркуватий, а також із значними тріщинами та підривами на поверхні виробів.

Отже, оптимальним є заміна 10 % інгредієнтів у рецептурі кексу «Столичного» на калину звичайну або гарбуз звичайний у кількості 10 % до маси тіста кексів.

### Список використаних джерел

1. Удосконалення технології бісквітних напівфабрикатів, збагачених плодовими порошками / Ю. А. Мирошник, О. Б. Шидловська, С. П. Грузда, В. Ф. Доценко // Хлібопекарська і кондитерська промисловість України. – 2015. – № 7/8. – С. 11-14.
2. Пешук, Л. В. Сучасні підходи щодо використання селери, топінамбура, гарбуза та капусти кольрабі у технології посічених м'ясо-рослинних напівфабрикатів / Л. В. Пешук, О. І. Гащук, Е. Г. Аветян // Харчова промисловість. – 2013. – № 14. – С. 77-82.
3. Самохвалова О. В. Технологія маффінів оздоровчого призначення : монографія / О. В. Самохвалова, К. Р. Касабова, С. Г. Олійник. – Харків : Видавництво «Технологічний Центр», 2015. – 120 с.
4. Sello, A. Enhancing antioxidant activities of cupcakes by using pumpkin powder during storage / A. Sello, M. Mostafa // Journal of Food and Dairy Sciences. – 2017. – Iss. 8. – P. 103-110. DOI: <https://doi.org/10.21608/jfds.2017.37133>
5. Капліна, Т. В. Зміни якісних показників кексів залежно від частки внесеного до рецептури гарбузового насіння / Т. В. Капліна, В. М. Столярчук, С. О. Дудник // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. – 2018. – Т 20. № 85. – С. 114-118.
6. Batista, J. E. R. Partial replacement of wheat flour by pumpkin seed flour in the production of cupcakes filled with carob / J. E. R. Batista // Food Science and Technology. – 2018. – Vol. 38. Iss. 2. – P. 250-254. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-457X.36116>
7. Quality forming patterns in the cupcake enriched with pumpkin slices / V. Liubych [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – Vol. 2. № 11(116). – P. 43-51. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255646>
8. Şeker, İ. T. Physicochemical and bioactive properties of cakes incorporated with gilaburu fruit (*Viburnum opulus*) pomace / İ. T. Şeker, M. H. Ertop, M. Hayta // Quality Assurance and Safety of Crops & Foods. – 2016. – Vol. 8. Iss. 2. – P. 261-266. – DOI: <https://doi.org/10.3920/QAS2014.0542>

### References

1. Myroshnyk, Yu.A., Shydlovska, O.B., Hruzda, S.P., Dotsenko, V.F. (2015). Improving the technology of biscuit semi-finished products enriched with fruit powders. *Bakery and confectionery industry of Ukraine*, 7/8, 11–14.
2. Peshuk, L. V., Hashchuk, O. I., Avetyan, E.G. (2013). New approaches to use celery, artichoke, pumpkin and cabbage kohlrabi in technologies excised cereal semis. *Food industry*, 14, 77–82.
3. Samokhvalova, O.V., Kasabova, K.R., Oliinyk, S.H. (2015). *Health-improving technology of muffins*. Kharkiv: Vydavnytstvo «Tekhnolohichnyi Tsentru».
4. Sello, A., Mostafa, M. (2017). Enhancing antioxidant activities of cupcakes by using pumpkin powder during storage. *Journal of Food and Dairy Sciences*, 8, 103–110. <https://doi.org/10.21608/jfds.2017.37133>



5. Kaplina, T.V., Stoliarchuk, V.M., Dudnyk, S.O. (2018). Changes in qualitative indices of cakes depending on part of added pumpkin seeds. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies*, 20(85), 114–118.

6. Batista, J.E.R., Braga, L.P., Dloveora, R.C., Silva, E.P., Damiani, C. (2018). Partial replacement of wheat flour by pumpkin seed flour in the production of cupcakes filled with carob. *Food Science and Technology*, 38(2). <http://dx.doi.org/10.1590/1678-457X.36116>

7. Liubych, V., Novikov, V., Zheliezna, V., Makarchuk, M., Balabak, O., Kirian, V., Bardakov, V., Kyrpa, M., Moskalets, V., Moskalets, T. (2022). *Quality forming patterns in the cupcake enriched with pumpkin slices. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(11(116)), 43–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255646>

8. Şeker, İ.T., Ertop, M.H., Hayta, M. (2016). Physicochemical and bioactive properties of cakes incorporated with gilaburu fruit (*Viburnum opulus*) pomace. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 8(2), 261–266. <https://doi.org/10.3920/QAS2014.0542>

Отримано 19.09.2023

UDC 664.681.9

**Natalia Yushchenko<sup>1</sup>, Nataliia Buialska<sup>2</sup>, Viktoriia Cheliabiieva<sup>3</sup>, Natalia Berezkina<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Applicant for higher education, gr. MHT-221

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [yushchenko.natasha@gmail.com](mailto:yushchenko.natasha@gmail.com)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Food Technology and Ecology  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [buialska@gmail.com](mailto:buialska@gmail.com) ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6800-5604> ResearcherID: G-2935-2014

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Food Technology and Ecology  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [vika.chl@ukr.net](mailto:vika.chl@ukr.net) ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5364-4633> ResearcherID: AAA-3194-2020

<sup>4</sup>Senior Lecturer of the Department of Food Technology and Ecology  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [galenko94@gmail.com](mailto:galenko94@gmail.com)

## TECHNOLOGY FOR CUPCAKES WITH ADDITION OF GUELDER-ROSE (*VIBURNUM OPULUS* L.) AND PUMPKIN (*CUCURBITA PEPO* L.)

*The development of technology for enriched flour confectionery products makes it possible to obtain food products that are characterized by high nutritional value while maintaining properties and organoleptic characteristics. Including them in the daily diet helps improve public health.*

*The addition of ingredients from non-traditional plant raw materials, especially when they are combined, requires determining the amount of additives to obtain food products that are in consumer demand.*

*An analysis of studies and publications on the production of flour confectionery products, the recipes of which include ingredients from non-traditional plant raw materials, showed that today the issues of using guelder-rose (*Viburnum opulus* L.) and pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) in cupcake technology have been given insufficient attention in the scientific literature.*

*The purpose of the article is to develop the technology of cupcakes enriched with crushed pumpkin seeds and guelder-rose puree.*

*Experimental samples of cupcakes enriched with the addition of guelder-rose puree and crushed pumpkin seeds have been prepared. In order to obtain them 5 %, 10 % and 15 % of the indicated ingredients were added to the Stolichny cupcake recipe. The organoleptic characteristics of the obtained cupcakes were assessed. Comparative characteristics of the nutritional and energy value of experimental and control samples of cupcakes are given. Comparative characteristic of the nutritional and energy value of experimental and control samples of cupcakes is given. The degree of satisfaction of the daily requirement for minerals when consuming 100 g of the obtained cupcakes was analyzed.*

*It has been established that adding ingredients from guelder-rose and pumpkin to the cupcake recipe significantly increases the content of calcium, magnesium, and phosphorus. At the same time, the carbohydrate and fat content is reduced that leads to a decrease in the energy value of the cupcakes. It was revealed that cupcakes with the addition of 10 % guelder-rose puree and crushed pumpkin seeds are characterized by the best organoleptic characteristics.*

**Keywords:** flour confectionery products; enriched cupcakes; plant additives; guelder-rose puree; pumpkin seeds; organoleptic quality characteristics.

**Андрій Забалуєв<sup>1</sup>, Дмитро Ущановський<sup>2</sup>, Георгій Васильєв<sup>3</sup>, Ольга Лінючева<sup>4</sup>,  
Вікторія Воробйова<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: koala.zab@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9749-7599>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: soltdim@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2809-2774>

<sup>3</sup>доктор технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: g.vasyliiev@kpi.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4056-5551>

<sup>4</sup>доктор технічних наук, професор кафедри технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: o\_lin@xtf.kpi.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4181-5946>

<sup>5</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичної хімії  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: vorobyovavika1988@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7479-9140>

## **ВПЛИВ СКЛАДУ ЕЛЕКТРОЛІТУ ТА ПРИРОДИ РОЗЧИННИКА НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГАЛЬВАНІЧНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ**

*Стаття присвячена дослідженню впливу введення легуючого компонента - вольфраму, складу електроліту та природи розчинника на фізико-механічні властивості гальванічних покриттів на основі нікелю. SEM-дослідження морфології покриттів на основі нікелю показали, що з водних електролітів осаджуються більш дрібнокристалічні покриття ніж з неводних електролітів на основі низькотемпературних евтектичних розчинників (НЕР). Для покриттів зі сплаву нікель-вольфрам, з вмістом вольфраму 14,6 мас.%, електроосаджених з водного цитратного електроліту та нікелевих покриттів осаджених з електроліту на основі НЕР мікротвердість зростає у два рази, а модуль Юнга зростає на 10...20 ГПа у порівнянні з відповідними характеристиками для гальванічних нікелевих покриттів осаджених з електроліту Уотса. На основі методів повторного багаторазового дряпання та безперервного вдавлення та сканування індентором Берковича встановлено, що відповідні покриття також володіють підвищеною зносостійкістю з огляду на найменші осциляційні значення сили тертя та ширину канавок впровадження індентора.*

**Ключові слова:** електроосадження; нікелеві покриття; нікель-вольфрамовий сплав; низькотемпературний евтектичний розчинник; мікротвердість; модуль Юнга; супротив до тертя.

**Актуальність теми досліджень.** Важливим науково-технічним завданням є осадження гальванічних покриттів із полішеними фізико-механічними характеристиками та корозійною стійкістю. Це, зокрема, може бути досягнуто завдяки підбору та введенню у металеве покриття певних легуючих компонентів та зміною складу електроліту.

**Постановка проблеми.** Найбільшою твердістю і зносостійкістю серед функціональних гальванічних покриттів володіють хромові. Однак процес електроосадження відповідних покриттів є мало енерго-ефективним. У деяких випадках заміниками хромових покриттів можуть виступати тверді нікелеві покриття. З метою підвищення твердості та зносостійкості у нікелеві покриття можуть вводити легуючі елементи, зокрема, такі як вольфрам чи молібден. У роботах [1,2] показано, що покриття з масовою часткою вольфраму 30...35 мас.% володіють аналогічною мікроструктурою та подібними фізико-механічними властивостями, що і тверді гальванічні хромові покриття. Ще однією перевагою електроосадження нікель-вольфрамових покриттів є набагато вищий вихід за струмом у порівнянні з процесом електроосадження хрому. Це робить нанесення саме Ni-W покриттів більш енергоефективним.

**Аналіз останніх досліджень.** Електроосадження покриттів із електролітів на основі низькотемпературних евтектичних розчинників (НЕР) – розплавів органічних речовин є

новим напрямком [3-5] і може бути використаним для отримання покриттів із спеціальними властивостями. Зокрема для електроосадження покриттів зі сплаву Ni-Mo, які характеризуються підвищеними твердістю та корозійною стійкістю, застосовуються електроліти, приготовані на основі НЕР – суміші холін хлориду та карбаміду у молярному співвідношенні 1:2 М [6].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Малочисленими є данні щодо антифрикційних властивостей нікель-вольфрамових покриттів та фізико-механічних властивостей нікелевих покриттів, електроосаджених з неводних розчинників на основі НЕР.

**Мета дослідження.** Метою даної роботи є дослідження впливу співосадження вольфраму у гальванічне покриття, складу електроліту та природи розчинника на фізико-механічні властивості гальванічних покриттів на основі нікелю.

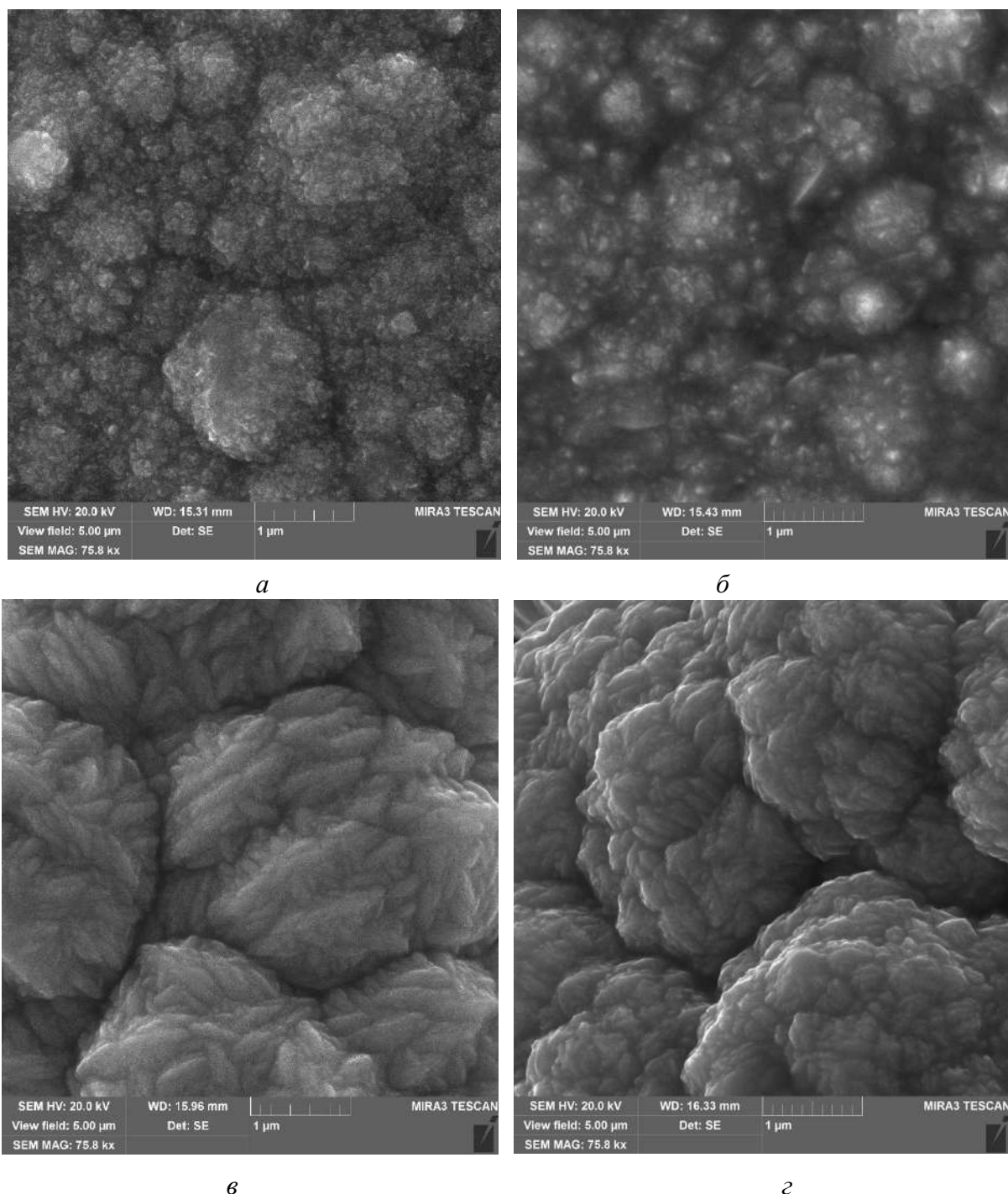
**Викладення основного матеріалу.** Електроосадження Ni та Ni-W покриттів проводили з цитратного електроліту, вміст основних компонентів якого був аналогічним до приведенного у [7]. Водневий показник електроліту до рівня рН 6,5...8,5 доводили гідроксидом амонію. Також електроосадження нікелевих покриттів проводили із електроліту на основі НЕР холінхлориду та карбаміду у молярному співвідношенні 1:2. Детально опис приготування електроліту та нанесення покриттів приведений у [8]. Дослідженням фізико механічних характеристик та оцінці зносостійкості підлягали гальванічні нікелеві покриття товщиною 40 мкм, які електроосаджували на прямокутні зразки із сталеві стрічки марки 08кп, товщина стрічки складала 0,5 мм. Склади електролітів та умови процесів електроосадження наведені у табл.1.

Таблиця 1 - Склад електролітів та умови електроосадження гальванічних покриттів

Електроліт Уотса	Цитратний <sup>1,2</sup> електроліт нікелювання	Цитратний електроліт для осадження Ni-W покриттів <sup>1,2</sup>	Електроліт нікелювання на основі НЕР <sup>1,2</sup>	Електроліт нікелювання на основі НЕР з додаванням вольфраму натрію <sup>1,2</sup>
<b>Основні компоненти</b>				
NiSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O; NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O; H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> ;	NiSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O; Na <sub>3</sub> Cit; NH <sub>4</sub> Cl; Na <sub>4</sub> B <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ;	NiSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O; Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> ; Na <sub>3</sub> Cit; NH <sub>4</sub> Cl; Na <sub>4</sub> B <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>	NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> ;
<b>Розчинник</b>				
дистильована вода	дистильована вода	дистильована вода	розтоп холінхлориду та карбаміду у молярному співвідношенні 1:2	розтоп холінхлориду та карбаміду у молярному співвідношенні 1:2
<b>Режим електролізу</b>				
pH 4...4,5; t = 50±3 °C; i = 1 А/дм <sup>2</sup>	pH 6,5...8,5; t = 50±3 °C; i = 1 А/дм <sup>2</sup>	pH 6,5...8,5; t = 50±3 °C; i = 1 А/дм <sup>2</sup>	pH≈7; t = 75±3 °C; i = 1 А/дм <sup>2</sup>	pH≈7; t = 75±3 °C; i = 1 А/дм <sup>2</sup>

<sup>1</sup> опис складу електролітів згідно [7,8]

<sup>2</sup> концентрації іонів нікелю та цитрат аніону, а також їх молярні співвідношення є близькими за значенням [8]



*Рис.1. SEM-знімки морфології покриттів на основі нікелю: а, б – нікелевих та зі сплаву нікель-вольфрам (14,6 мас.% W) відповідно, електроосаджених з водних електролітів; в, г – нікелевих, електроосаджених з електролітів на основі НЕР (г – з додаванням вольфраму натрію)*

Результати кількісного аналізу складу поверхні електроосаджених нікелевих покриттів, виконані на мікроскопі TESCAN VEGA3, оснащеному EDX аналізатором BRUKER QUANTAX EDS, показали наступне. При електроосадженні нікелевих покриттів з водних цитратних електролітів за густини струму  $1 \text{ A/дм}^2$  був досягнутий вміст вольфраму в сплаві 14,6 мас.% [8]. В електролітах на основі НЕР, із вмістом солей нікелю

та вольфраму як у відповідному водному цитратному електроліті, співосадження вольфраму у сплав не було досягнуто. SEM-дослідження морфології покриттів на основі нікелю (рис. 1) свідчать про те, що з водних електролітів осаджуються більш дрібнокристалічні покриття ніж з електролітів на основі НЕР. Це може бути зумовлено зміною характеру контролюючої стадії процесу електроосадження. У водних електролітах може бути контролюючою стадія розряд комплексного іона, а у електролітах на основі НЕР – стадія доставки іонів металу до поверхні катода через більшу в'язкість електроліту. В обох випадках введення вольфрамат іонів у електроліт призводить до утворення більш дрібнокристалічної структури покриття. Зокрема, для водних електролітів, осадження більш дрібнокристалічних покриттів сплавом Ni-W супроводжується меншою перенапругою електроосадження ніж для чисто нікелевих покриттів [8]. Це пояснюється меншою енергією активації утворення відповідної більш щільно упакованої та дрібнокристалічної структури сплаву, у порівнянні з чистим нікелем [1,2].



Рис.2. Фотозображення розміщених для випробувань зразків

Мікромеханічні випробування електроосаджених нікелевих покриттів проводилися на універсальному мікротвердомірі-скречтестері "Micron-gamma" [9] методами безперервного вдавлення і дряпання індентором. "Micron-gamma" складається з двокординатного моторизованого предметного столу, що переміщається зі швидкістю 20  $\mu\text{m/s}$ , електромагнітного навантажувача індентора з максимальним зусиллям, що розвивається, 450 гс і датчиків нормального і тангенціального переміщень індентора з нанометричним дозволом. Для прицільного позиціонування індентора та аналізу відбитків використовується вбудований цифровий мікроскоп з роздільною здатністю 5 Мр. При цьому зразки із покриттям розташовувались та фіксувались за допомогою двостороннього скотчу на пластині з нержавіючої сталі, як це показано на рис.2.

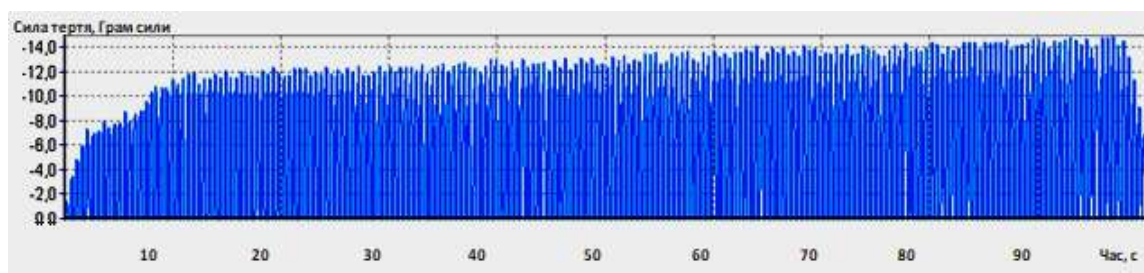
**Мікромеханічні характеристики**, такі як мікротвердість і модуль Юнга, вимірювалися методом вдавлювання індентора Берковича за постійної швидкості навантаження 5 гс/с з автоматичною реєстрацією навантаження на індентор та глибини його впровадження. При цьому максимальне навантаження складало 50 гс. Методичні основи визначення твердості та модуля пружності за діаграмами впровадження базуються на методі Олівера-Фара [10] прийнятого як міжнародний стандарт (ISO/FDIS 14577-1: 2002). Результати проведених вимірювань мікротвердості та модулю Юнга для гальванічних нікелевих покриттів представлені у табл.1.

Таблиця 1 – Мікромеханічні характеристики гальванічних покриттів на основі нікелю

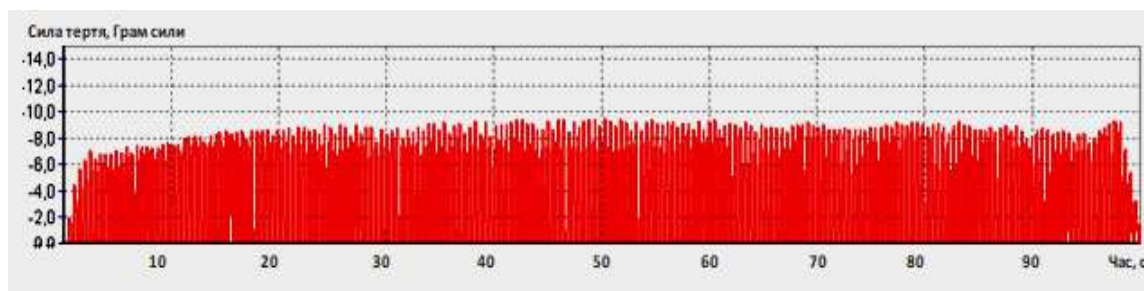
Нікелеве покриття отримане з електроліту Уотса		Нікелеве покриття, отримане з цитратного електроліту		Нікель-вольфрамове покриття, отримане з цитратного електроліту		Нікелеве покриття, отримане з електроліту на основі НЕР		Нікелеве покриття, отримане з електроліту на основі НЕР з додаванням вольфраму натрію	
НМ, ГПа	G, ГПа	НМ, ГПа	G, ГПа	НМ, ГПа	G, ГПа	НМ, ГПа	G, ГПа	НМ, ГПа	G, ГПа
3,6	170	6	180	8	180	7	150	встановити не вдалось	встановити не вдалось

Як видно з табл.1, у порівнянні з еталонними зразками гальванічних нікелевих покриттів електроосаджених з електроліту Уотса, мікротвердість нікелевого покриття, осадженого з водного цитратного електроліту, є у 1,7 разів вища, а модуль Юнга, відповідно, вищий на 10 ГПа. Для покриттів зі сплаву нікель-вольфрам електроосаджених з цитратного електроліту, з вмістом вольфраму 14,6 мас.%, мікротвердість зростає у 2,2 рази, а модуль Юнга зростає на 10 ГПа. Для нікелевих покриттів, осаджених з електроліту на основі НЕР, мікротвердість є більшою майже у 2 рази, модуль Юнга при цьому навпаки є меншим на 20 ГПа. Отримані зміни фізико-механічних властивостей можуть бути пов'язані із відмінністю кристалічної структури, а саме, з цитратних електролітів осаджуються покриття з більш дрібнокристалічною і щільно упакованою структурою металевих осаду ніж з електроліту Уотса. Додаткове ущільнення та формування ще більш дрібнокристалічної структури покриття досягається за рахунок введення вольфраму (рис.1) в структуру нікелевого покриття, що також сприяє додатковому підвищенню мікротвердості. В електроліті нікелювання на основі НЕР більша твердість покриття може бути пояснена включенням в структуру покриття молекул органічних речовин – компонентів розчинника і, за рахунок цього, видозміною кристалічної структури з утворенням дислокацій. Введення у електроліт нікелювання на основі НЕР хоча і сприяє деякому подрібненню кристалічних зерен (рис.1), проте, призводить до осадження крихких покриттів, мікротвердість та модуль Юнга для яких встановити не вдалось. Надалі їхні властивості не досліджували.

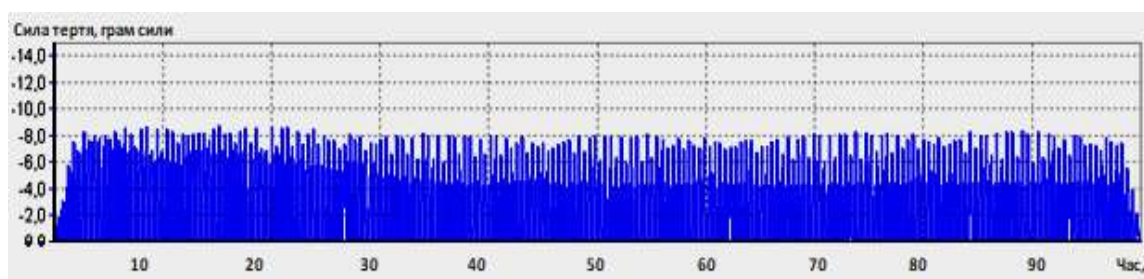
**Оцінка здатності гальванічних покриттів щодо спротиву до механічного тертя** здійснювалась методом повторного багаторазового дряпання індентором Берковича при постійному навантаженні 50 гс і швидкості переміщення 20 мкм/с. При отриманні циклічних залежностей зміни сили тертя у часі використовувався індентор із радіусом закруглення 30 мкм, яким здійснювалось 2 зворотно-поступальні коливання в секунду. Час випробування 100 с. Результати проведених досліджень представлені на рис.3.



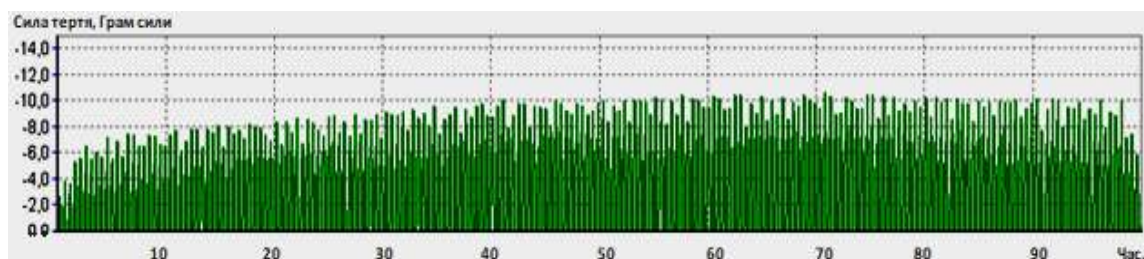
а



б



в



г

Рис. 3. Діаграма залежності зміни в часі сили тертя при циклічному навантаженні для сталевих зразків із гальванічними покриттями: а) нікелевого, електроосадженого з електроліту Уотса; б) нікелевого, електроосадженого з цитратного електроліту нікелювання; в) нікель-вольфрамового (15 мас.% Вольфраму), електроосадженого з цитратного електроліту нікелювання; г) нікелевого, електроосадженого з електроліту на основі НЕР

Аналізуючи дані наведені в табл. 1 та на рис.3. можна прийти до наступних висновків. Для досліджуваних зразків із покриттями чим більшим є значення мікротвердості, тим менших значень набуває сила тертя на діаграмах. Відповідно найменші значення сили тертя спостерігаються для нікель-вольфрамових покриттів (осаджених з водного цитратного електроліту) та покриттів нікелем отриманих з електроліту на основі НЕР (рис.3 в, г).

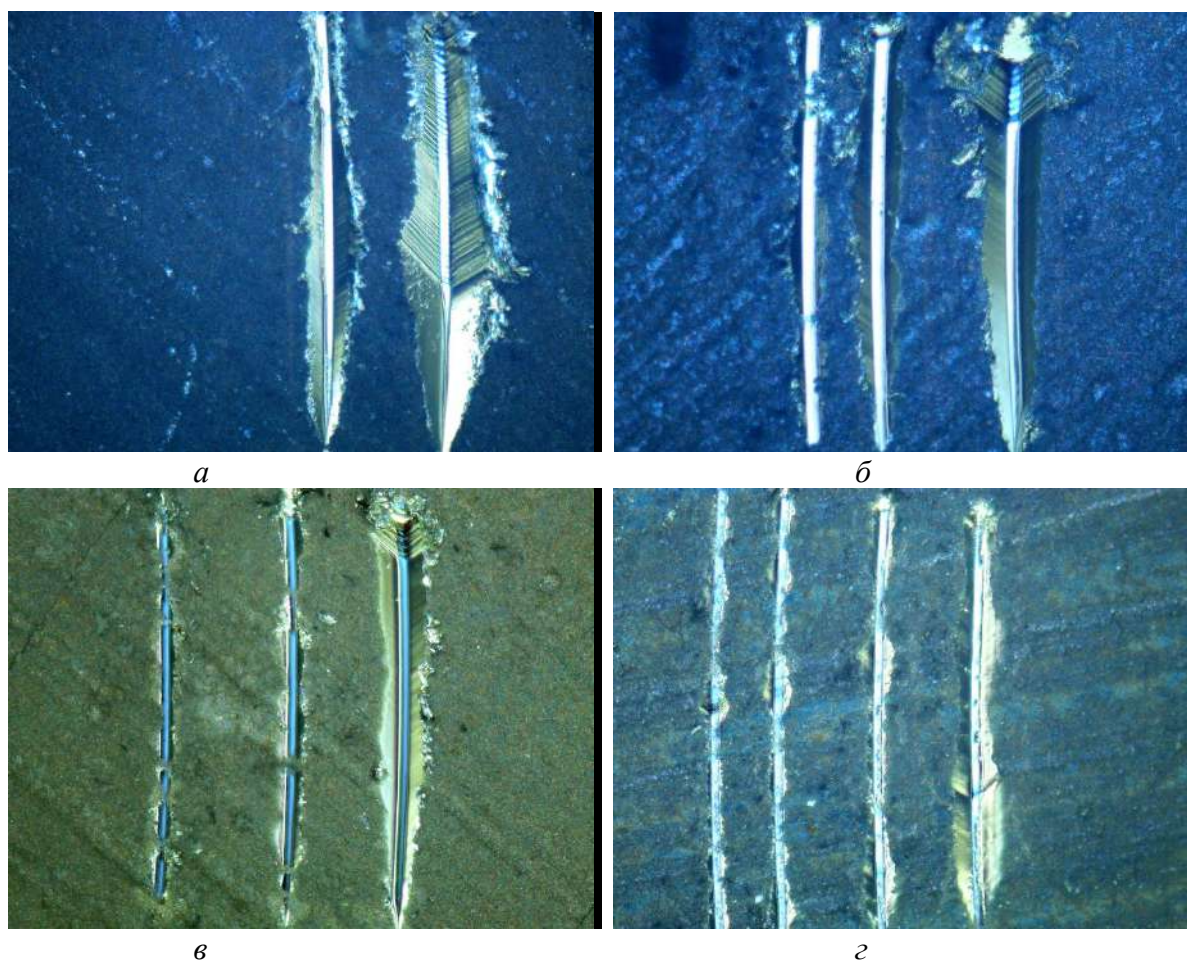


Рис.4. Фотозображення канавок безперервного вдавлювання і сканування індентора Берковича для сталевих зразків із гальванічними покриттями (зліва більш тонкі канавки - навантаження 20 гс, справа більш широка одна канавка - відповідно навантаження 50 гс): а) нікелевого, електроосадженого з електроліту Уотса; б) нікелевого, електроосадженого з цитратного електроліту нікелювання; в) нікель-вольфрамового (14,6 мас.% Вольфраму), електроосадженого з цитратного електроліту нікелювання; г) нікелевого, електроосадженого з електроліту на основі НЕР

Також у даній роботі проводили порівняльну оцінку спротиву до механічного зношування зразків з нікелевими покриттями методами безперервного вдавлювання та сканування індентором на приладі "Micron-gamma", за допомогою індентора Берковича. Режим сканування: величина навантаження на індентор – 20 та 50 гс; швидкість навантаження – 5 гс/с; швидкість сканування – 40 мкм/с. Довжина траси близько 1 мм. Фактично супротив до механічного зношення або зносостійкість можна опосередковано оцінити на основі порівняння ширини траси або канавки, яку залишає на поверхні металу після себе індентор. Чим вужчою є канавка, тим вищою є відповідно зносостійкість покриття. Відповідні мікрофотографії канавок після індентора Берковича приведені на рис.4, усереднені значення їх товщини у табл. 2.



Таблиця 2 – Дослідження покриттів методом безперервного вдавлювання та сканування індентором Берковича

Нікелеве покриття отримане з електроліту Уотса		Нікелеве покриття, отримане з цитратного електроліту		Нікель-вольфрамове покриття, отримане з цитратного електроліту		Нікелеве покриття, отримане з електроліту на основі НЕР	
Ширина канавки впровадженні індентора при відповідному навантаженні, мм							
20 гс	50 гс	20 гс	50 гс	20 гс	50 гс	20 гс	50 гс
0,12±0,02	0,18±0,03	0,08±0,02	0,13±0,03	0,05±0,01	0,1±0,02	0,06±0,01	0,1±0,02

Як видно з рис.4 та табл. 2. найменша ширина канавок яку залишає індентор, що особливо помітно при навантаженні 20 гс, спостерігається для нікель-вольфрамових покриттів (осаджених з водного цитратного електроліту) та покриттів нікелем отриманих з електроліту на основі НЕР. З огляду на вищенаведені результати мікромеханічних та трибологічних досліджень можна стверджувати, що відповідні зразки покриттів також володіють найбільшою мікротвердістю і зносостійкістю серед інших досліджуваних в даній роботі.

**Висновки.** Встановлено, що склад електроліту в значній мірі впливає на мікромеханічні та антифрикційні властивості гальванічних покриттів на основі нікелю. Впровадження в структуру покриття вольфраму (14,6 ма.%) та використання електроліту на основі низькотемпературних евтектичних розчинників сприяє майже двократному підвищенню мікротвердості гальванічного нікелевого покриття, що також супроводжується підвищенням зносостійкості. Це може бути пояснено видозміною морфології та кристалічної структури покриття через включення в структуру легуючого компонента (W) або органічних молекул у випадку неводного електроліту на основі низькотемпературного евтектичного розчинника.

#### Список використаних джерел

1. Zhong, Z. Nickel–tungsten alloy brush plating for engineering applications / Z. Zhong, S. J. Clouser // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 240. – P. 380-386.
2. The heat treatment effect on the structure and mechanical properties of electrodeposited nano grain size Ni–W alloy coatings / K. Hou, Y. Chang, S. Chang, C. Chang // *Thin Solid Films*. – 2010. – Vol. 518. No. 24. – P. 7535-7540.
3. Electrodeposition of polyfunctional Ni coatings from deep eutectic solvent based on choline chloride and lactic acid / D. Uschapovskiy, V. Vorobyova, G. Vasyliiev, O. Linucheva // *J. Electrochem. Sci. Eng.* – 2022. – Vol. 12. No. 5. – P. 1025-1039.
4. Abbott, A. P. Bright metal coatings from sustainable electrolytes: the effect of molecular additives on electrodeposition of nickel from a deep eutectic solvent / A. P. Abbott, et al. // *Phys. Chem.* – 2017. – Vol. 19. – P. 3219-3231.
5. Winiarski J. Ni/ cerium Molybdenum Oxide Hydrate Microflakes Composite Coatings Electrodeposited from Choline Chloride: Ethylene Glycol Deep Eutectic Solvent / J. Winiarski, et al. // *Materials*. – 2020. – Vol. 13. – P. 924-941.
6. Investigation of Ni-Mo and Co-Mo alloys electrodeposition involving choline chloride based ionic liquids / S. Costovici, A.-C. Manea, T. Visan, L. Anicai // *Electrochimica Acta*. – 2016. – Vol. 207. – P. 97-111.
7. Study on mechanical and anticorrosion performance of NiW alloy coatings prepared by induced codeposition / Y. Hu, Y. Yu, H. Ge, G. Wei, L. Jiang // *Int. J. Electrochem. Sci.* – 2019. – Vol. 14. – P.1649-1657.

8. Вплив природи розчинника на електроосадження Ni та Ni-W покриттів / Д. Ю. Ущаровський, А. С. Забалуйев, В. І. Воробйова, Г. С. Васильєв, О. В. Лінючева // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2023. – Т.34 (73) . – № 2. – С. 46-51.

9. Игнатович, С. Р. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклических нагружениях методами наноиндентирования и наносклерометрии / С. Р. Игнатович, И. М. Закиев, Д. И. Борисов // Проблемы прочности. – 2006. – № 4. – С. 132-139.

10. Oliver, W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Res. – 1992. – No. 7. – P. 1572.

### References

1. Zhong, Z., Clouser, S.J. (2014). Nickel–tungsten alloy brush plating for engineering applications. *Surface and Coatings Technology*, 240, 380–386. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.12.059>

2. Hou, K., Chang, Y., Chang, S., Chang, C. (2010). The heat treatment effect on the structure and mechanical properties of electrodeposited nano grain size Ni–W alloy coatings. *Thin Solid Films*, 518(24), 7535–7540. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.05.041>

3. Uschapovskiy, D., Vorobyova, V., Vasyliiev, G., Linucheva, O. (2022). Electrodeposition of polyfunctional Ni coatings from deep eutectic solvent based on choline chloride and lactic acid. *J. Electrochem. Sci. Eng.*, 12(5), 1025–1039. <https://doi.org/10.5599/jese.1451>

4. Abbott, A. P., et al.(2017). Bright metal coatings from sustainable electrolytes: the effect of molecular additives on electrodeposition of nickel from a deep eutectic solvent. *Phys. Chem*, 19, 3219–3231. <https://doi.org/10.1039/C6CP08720E>

5. Winiarski, J., et al. (2020). Ni/cerium Molybdenum Oxide Hydrate Microflakes Composite Coatings Electrodeposited from Choline Chloride: Ethylene Glycol Deep Eutectic Solvent. *Materials*, 13, 924–941. <https://doi.org/10.3390/ma13040924>

6. Costovici, S., Manea, A.-C., Visan, T. (2016). Anicai L. Investigation of Ni-Mo and Co-Mo alloys electrodeposition involving choline chloride based ionic liquids. *Electrochimica Acta*, 207, 97–111. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.04.173>

7. Hu, Y., Yu, Y., Ge, H., Wei, G., Jiang, L. (2019). Study on mechanical and anticorrosion performance of NiW alloy coatings prepared by induced codeposition. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 14, 1649–1657. <http://www.electrochemsci.org/papers/vol14/140201649.pdf>

8. Uschapovskyi, D.Yu., Zabaluyev, A.S., Vorobyova, V.I., Vasiliev, G.S., Linyucheva, O.V. (2023). Influence of the solvent nature on the electrodeposition of Ni and Ni-W coatings. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*, 34(73), 2, 46–51. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/09>

9. Ignatovich, S.R., Zakiyev, I.M., Borisov, D.I. (2006). Assessment of damage to the surface layer of materials under cyclic loading using nanoindentation and nanosclerometry methods. *Problems of strength*, 4, 132-139. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/47795>

10. Oliver, W.C., Pharr, G.M. (1992). An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *J. Mater. Res.*, 7, 1564–1583. <https://link.springer.com/article/10.1557/JMR.1992.1564>

Отримано 20.09.2023

**Andrii Zabaluyev<sup>1</sup>, Dmytro Uschapovskiy<sup>2</sup>, Georgy Vasiliev<sup>3</sup>, Olga Linyucheva<sup>4</sup>,  
Viktoriya Vorobyova<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> PhD Student, Department of Electrochemical Productions Technology, National technical University of Ukraine "Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic institute", Ukraine

E-mail: koala.zab@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9749-7599>

<sup>2</sup> PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Electrochemical Productions Technology, National technical University of Ukraine "Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic institute", Ukraine

E-mail: soltdim@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2809-2774>

<sup>3</sup> Doctor in Technical Sciences, Professor Associate, Department of Electrochemical Productions Technology, National technical University of Ukraine "Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic institute", Ukraine

E-mail: g.vasilyev@kpi.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4056-5551>

<sup>4</sup> Doctor in Technical Sciences, Professor, Department of Electrochemical Productions Technology, National technical University of Ukraine "Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic institute", Ukraine

E-mail: o\_lin@xtf.kpi.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4181-5946>

<sup>5</sup> PhD in Technical Sciences, Professor Associate, Department of Physical Chemistry Technology, National technical University of Ukraine "Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic institute", Ukraine

E-mail: vorobyovavika1988@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7479-9140>

## INFLUENCE OF THE ELECTROLYTE COMPOSITION AND THE SOLVENT NATURE ON THE PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF NICKEL-BASED GALVANIC COATINGS

*Electrodeposition of galvanic coatings with improved physical-mechanical characteristics and corrosion resistance is an important scientific and technical task. In order to increase hardness and wear resistance, alloying elements, in particular, tungsten or molybdenum, can be introduced into nickel coatings.*

*The purpose of this investigation is to study the influence of the introduction of the alloying component, the composition of the electrolyte and the nature of the solvent on the physical and mechanical properties of galvanic coatings based on nickel.*

*SEM studies of the morphology of nickel-based coatings showed that crystalline coatings are deposited more finely from aqueous electrolytes than from non-aqueous electrolytes based on deep eutectic solvents (DES). For coatings based on nickel-tungsten alloy with a tungsten content of 14.6 wt.%, electrodeposited from an aqueous citrate electrolyte and nickel coatings deposited from an electrolyte based on DES, the microhardness increases twice, and the Young's modulus increases by 10...20 GPa compared to appropriate characteristics for galvanic nickel coatings deposited from Watts electrolyte. Based on the methods of repeated multiple scratching and continuous indentation and scanning with a Berkovich indenter, it was established that the corresponding coatings also have increased wear resistance. This is indicated by the smallest oscillating values of the friction force and the width of the indenter introduction grooves.*

**Keywords:** electrodeposition; nickel coatings; nickel-tungsten alloy; low-temperature eutectic solvent; microhardness; Young's modulus; wear resistance.

## РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-180-197

УДК 621.314.222.6:621.319.48:621.311:621.89:662.753

**Сергій Зайцев<sup>1</sup>, Валентин Тіхенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, інженер кафедри атомних електростанцій  
Національний університет «Одеська політехніка», (Одеса, Україна)  
E-mail: sdjavdet@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>

<sup>2</sup>доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри цифрових технологій в інжинірингу  
Національний університет «Одеська політехніка», (Одеса, Україна)  
E-mail: vntikhenko@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2804-2838>

### УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ АВТОТРАНСФОРМАТОРА ІЗ ЗОВНІШНІМ ТА ВНУТРІШНІМ ДЕФЕКТОМ У ВИСОКОВОЛЬТНОМУ УВОДІ

*Наведено результати діагностування оливнонаповненого силового автотрансформатора АТДЦТН-200000/330/110/10 із зовнішнім та внутрішнім дефектом в оливнонаповненому високовольтному вводиті ГМТПА-45-330/1000 У1. Досліджено: електричні характеристики для цього електрообладнання та фізико-хімічні характеристики проб трансформаторних олив; вплив імпульсного електричного струму високої напруги на зміни концентрацій розчинених у мінеральній трансформаторній оливі діагностичних компонентів  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$  у присутності розчиненого  $H_2$ . Отримані результати досліджень дозволяють підвищити надійність діагностування оливнонаповненого силового автотрансформатора із зовнішнім та внутрішнім дефектом в його оливнонаповненому високовольтному вводиті.*

**Ключові слова:** електротехнічне обладнання; трансформаторна олива; електричний трансформатор; розчинені гази; присадка «Іонол»; фуранові сполуки; хроматографія.

Табл.: 7, Рис.: 3, Бібл.: 33.

**Актуальність теми дослідження.** Надійність сучасних систем виробництва, розподілу та споживання електроенергії значною мірою залежить від надійності оливнонаповненого високовольтного електротехнічного обладнання (ОВЕО). Ушкодження ОВЕО із паперово-оливою електричною ізоляцією (ПОЕІ) призводять до економічної шкоди в енергетичних системах [1]. Аварії, пов'язані з електричним пробом електричної конденсаторної ізоляції високовольтних введів, є найбільш частими і економічно витратними в обладнанні об'єктів електроенергетики [2, 3]. Вимоги до технічного обслуговування ОВЕО з урахуванням його поточного стану визначають необхідність удосконалення систем технічного контролю та діагностування такого обладнання [4]. Визначення технічного стану ОВЕО з ПОЕІ необхідне для: прийняття рішень, пов'язаних з експлуатацією, технічним обслуговуванням та ремонтом цього обладнання; інженерного та економічного моделювання щодо найбільш рентабельної альтернативи для відновлення або підтримки в робочому стані обладнання [5]. Таким чином, удосконалення методів контролю технічного стану та діагностування ОВЕО з ПОЕІ є актуальним, що дозволяє вирішувати завдання контролю технічного стану, пошуку місця та визначення причин відмови (несправності), прогнозування технічного стану цього обладнання на основі відповідного діагностичного забезпечення.

**Постановка проблеми.** Характерні внутрішні дефекти в оливнонаповнених силових високовольтних електричних трансформаторах (автотрансформаторах) (далі за текстом – ОСВЕТ) виникають у таких функціональних системах, як: а) ізоляційна: (головна ізоляція, поздовжня ізоляція, ізоляція відводів, електростатичні екрани); б) електромагнітна: (остов, структурна ізоляція обмоток, елементи кріплення, магнітні шунти та екрани, ланцюг заземлення); в) струмопровідна: виводи електричних обмоток [6, 7]. При цьому

на виникнення та розвиток внутрішніх дефектів можуть впливати такі фактори, як: строк служби; електричне навантаження; пошкодження елементів високовольтних уводів, що занурені в мінеральну трансформаторну оливу (далі – МТО) трансформатора або автотрансформатора; режим роботи; зовнішні короткі електричні замикання; проникнення діагностичних газів з бака контактора перемикача електричних обмоток трансформатора (автотрансформатора) під електричним навантаженням у бак трансформатора (автотрансформатора); пошкодження насосів перекачування МТО системи охолодження; технологічне оброблення МТО [6, 7]. Таким чином, є необхідність в постійному удосконаленні методів визначення та ідентифікації внутрішніх дефектів в ОСВЕТ за допомогою відповідних методів діагностування такого електрообладнання для подальшого визначення та прогнозування його технічного стану.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основними діагностичними параметрами під час контролю технічного стану ОВЕО з ПОЕІ є: а) для оливонаповненого силового автотрансформатора (ОСАТ) – електричний опір електричної ізоляції; тангенс кута діелектричних втрат електричної ізоляції; електрична ємність електричних обмоток; коефіцієнт абсорбції; фізико-хімічні, теплофізичні, електрофізичні властивості мінеральної трансформаторної оливи (МТО) [8, 9]; вміст розчинених діагностичних газів  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ , повітря (далі – діагностичні гази) у МТО [6, 10]; б) для оливонаповненого високовольтного уводу (ОВУ) з ПОЕІ – електричний опір електричної ізоляції; тангенс кута діелектричних втрат електричної ізоляції; електрична ємність електричної ізоляції; фізико-хімічні, теплофізичні, електрофізичні властивості МТО [8, 11]; вміст розчинених діагностичних газів у МТО [6, 10].

Методами хроматографії визначають у МТО вміст таких розчинених діагностичних компонентів, як: розчинені діагностичні гази [12, 13]; присадка «Іонол» [14, 15]; фуранові сполуки 2-фуриловий спирт (2FOL), 2-фурфурол (2FAL), 2-ацетилфуран (2ACF), 5-метил-2-фурфурол (5MEF) (далі – фуранові сполуки) [16, 17].

Діагностування ОСАТ або ОВУ з ПОЕІ за результатами аналізів проб МТО методами газової хроматографії (ГХ) виконують при визначенні в МТО вмісту розчинених діагностичних газів [6, 7], присадки «Іонол» [11], фуранових сполук [6, 18] з використанням відповідних діагностичних моделей [6].

Діагностичні моделі, засновані на результатах дослідження у пробах МТО вмісту розчинених діагностичних газів, дозволяють визначати в ОСАТ або ОВУ з ПОЕІ: дефекти термічного та/або електричного характеру [19]; можливу присутність у МТО X-воску, окислювальне старіння МТО; піроліз та карбонізацію МТО; накопичення частинок вуглецю в МТО [6]. При цьому використовують: результати визначення поточних концентрацій розчинених діагностичних газів у МТО та швидкостей їх накопичення; методи «граничних рівнів концентрацій», «відносин концентрацій характерних газів», у тому числі «табличний метод», «метод графічних образів дефектів», «метод визначення швидкості збільшення концентрацій діагностичних газів у МТО» [6, 7]. За результатами досліджень вмісту в МТО розчинених діагностичних газів можливе виявлення дефектів залежно від місця їхнього прояву у відповідних функціональних системах при дослідженні: а) ОСАТ з ПОЕІ – для ізоляційної функціональної системи; електромагнітної функціональної системи; струмопровідної функціональної системи [6]; б) ОВУ з ПОЕІ – часткові електричні розряди; електричні іскріння в механічно ослабленому з'єднанні вимірювального виводу; повзучі електричні розряди вздовж поверхні остова та покришки; діелектричне перегрівання електричної ізоляції; наявність електричного контуру з великим електричним струмом у головці ОВУ з коротким електричним замиканням [20].

У середовищі іонізованого водню в об'ємі МТО в ОСАТ і ОВУ з ПОЕІ можливе утворення газів та X-воску, що призводить до зниження електричної міцності МТО [21, 22].

При виникненні імпульсів часткових електричних розрядів у локальних об'ємах МТО генеруються: сферичні ударні хвилі; імпульси електричного струму, світіння; плазмохімічні реакції в бульбашках газів, що утворилися, під дією ударних хвиль [1, 20]; акустичні ефекти. Всі ці процеси можуть призвести до деградації МТО і домішок, що утворилися в МТО – органічних кислот, спиртів, альдегідів, кетонів, фуранових сполук [20, 22]. При цьому: перевищення концентрацій CO та CO<sub>2</sub> вище граничних значень вказує на інтенсивні окислювальні процеси в об'ємі МТО при перегріванні ПОЕІ в ОВУ; при незадовільних результатах електричних випробувань ОВУ рекомендовано визначати в МТО вміст фуранових сполук: якщо їх сумарний вміст більше 1 мг/кг, то передбачається наявність дефекту, пов'язаного з перегріванням ПОЕІ в ОВУ [6].

Фуранові сполуки утворюються при деградації ПОЕІ в ОСАТ або в ОВУ під впливом електричних і теплових полів у середовищі МТО і є нестійкими речовинами та швидко розкладаються під дією температури в МТО [21]. Найбільш стійкою фурановою сполукою є 2FAL, значення концентрацій якої використовують для оцінювання технічного стану ПОЕІ [18].

Відомі результати дослідження в лабораторних умовах впливу електричної напруги на деградацію МТО та ПОЕІ з утворенням в об'ємі МТО розчинених діагностичних газів та фуранових сполук: при цьому вплив електричної напруги на деградацію фуранових сполук в об'ємі МТО не досліджено [23].

Відомий метод визначення газостійкості ізоляційних рідин під дією на них електричної напруги та іонізації, при цьому кількісно-якісний склад газів, що утворюються, у тому числі розчинених у трансформаторних оливах, не досліджується [24].

Найбільш вірогідні внутрішні дефекти виникають у таких функціональних системах в ОСВЕТ, як ізоляційна, електромагнітна, струмопровідна [1, 6].

Наведена інформація в літературних джерелах [1–24] вказує на неповноту відомостей про вплив: дефектів в ОВУ з ПОЕІ, що має зовнішні та внутрішні дефекти електричного та/або теплового характеру та стикається своєю зовнішньою поверхнею з МТО в ОСАТ, на достовірність діагностування дефектів, пов'язаних з внутрішніми конструктивними елементами власне самого ОСАТ із ПОЕІ; імпульсного електричного струму високої напруги на зміни концентрацій вже розчинених у МТО таких діагностичних компонентів, як CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, фуранові сполуки, присадка «Іонол», у присутності розчиненого H<sub>2</sub>, який утворюється при деградації МТО. Усе це вимагає виконання відповідних досліджень.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Попри наявності великої кількості досліджень методів діагностування ОСВЕТ, виявлення внутрішніх дефектів в такому електрообладнанні із урахуванням впливу на достовірність результатів діагностування зовнішніх та внутрішніх дефектів в ОВУ, що знаходяться у контакті із МТО в середині ОСВЕТ, є необхідністю для забезпечення надійності при експлуатації такого електрообладнання.

**Мета статті.** Головною метою статті є підвищення надійності результатів діагностування оливонаповнених силових високовольтних електричних автотрансформаторів із зовнішнім та внутрішнім дефектом у їх оливонаповнених високовольтних уводах із паперово-оливою електричною ізоляцією, що знаходяться в контакті з трансформаторною оливою в середині таких автотрансформаторів, з урахуванням результатів їх електричних випробувань та аналізів проб мінеральної трансформаторної оливи з такого електрообладнання.

**Завдання дослідження:** 1. Дослідження технічних станів ОСАТ та його пошкодженого ОВУ на підставі результатів: а) електричних випробувань електрообладнання;

б) ГХ аналізів проб МТО з електрообладнання; в) візуального огляду зовнішньої поверхні та внутрішніх конструктивних елементів пошкодженого ОВУ після його вилучення із ОСАТ. 2. Дослідження: а) фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних властивостей МТО в ОСАТ та у його пошкодженому ОВУ; б) взаємних зв'язків між концентраціями розчинених діагностичних компонентів у МТО в ОСАТ та у його пошкодженому ОВУ залежно від тривалості їх експлуатації; в) впливу імпульсного електричного струму високої напруги на зміни концентрацій попередньо розчинених у МТО діагностичних компонентів  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  у присутності розчиненого  $\text{H}_2$ .

3. Встановлення алгоритму дій при діагностуванні ОСАТ та його ОВУ з урахуванням результатів їх електричних випробувань та аналізів проб МТО з такого електрообладнання.

**Виклад основного матеріалу.** Об'єкти досліджень: методи діагностування технічного стану ОСАТ та його ОВУ на підставі результатів фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних, ГХ аналізів та випробувань проб МТО з цього оливонаповненого електрообладнання. Предмети досліджень: ОСАТ типу АТДЦТН-200000/330/110/10 та ОВУ типів ГМТПА-45-330/1000 У1 і ГМТА-90-110/2000 У1 (герметичне електрообладнання); МТО марок ГК; розчинені в МТО діагностичні компоненти: діагностичні гази ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , ЗВП (загальний вміст повітря), ЗВГ (загальний вміст газів); присадка «Іонол»; фуранові сполуки 2FOL, 2FAL, 2ACF, 5MEF та сума їх концентрацій  $\Sigma C_F$ ;  $\text{H}_2\text{O}$ .

При дослідженні електричних характеристик ОСАТ та його ОВУ використано засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) та випробувальне обладнання: мегаомметр ЭС0202/2Г та електричні мости змінного струму типу СА7100-2 та типу Р5026 [4, 5]. Досліджувані електричні характеристики: а) для ОСАТ:  $R_{60}$  і  $R_{15}$  – електричний опір електричної ізоляції, виміряний через 60 с і 15 с після появи на об'єкті вимірювання електричної напруги, відповідно, МОм; коефіцієнт абсорбції  $K_a$ ; тангенс кута діелектричних втрат електричних обмоток,  $\text{tg}\delta$ , %; електрична ємність  $C$  електричних обмоток, пФ [8, 9]; б) для ОВУ: тангенс кута діелектричних втрат основної електричної ізоляції  $\text{tg}\delta_1$ , %; електрична ємність  $C_1$  основної електричної ізоляції, пФ; електричний опір  $R_i$  спеціального виведення, МОм; тангенс кута діелектричних втрат електричної ізоляції вимірювального конденсатора  $\text{tg}\delta_2$ , %; електрична ємність  $C_2$  електричної ізоляції вимірювального конденсатора, пФ; електричний опір  $R_2$  вимірювального виведення, МОм [8]. Газовий хроматограф «Кристал-2000М» використаний для визначення в МТО: а) вмісту  $C_{i,m}$  (ppm)  $i$ -х розчинених діагностичних газів, ЗВП, ЗВГ – за методиками [12, 13]; б) вмісту  $C_i$ , % маси (далі – % мас.) присадки «Іонол» – за методиками [11, 14]; в) вмісту  $C_F$  (мг/кг) розчинених фуранових сполук та суми їх концентрацій  $\Sigma C_F$  (мг/кг) – за методиками [16, 17]. Досліджувані характеристики проб МТО з ОСАТ та ОВУ: пробивна напруга  $U$  (кВ) [11]; температура спалаху парів МТО у закритому тиглі  $t_{cn}$  (°C) [11]; кислотне число (КЧ), (мг КОН на 1 г МТО) [11]; водорозчинні кислоти (ВРК) (мг КОН на 1 г МТО) [10]; тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta_{MTO}$  (%) [11]; щільність  $\rho$  (г/см<sup>3</sup>) [11]; вміст води  $W$  (г/г) [11]; вміст  $C_{i,m}$  (ppm) розчинених діагностичних газів, ЗВП, ЗВГ [12, 13]; вміст  $C_i$  (% мас.) присадки «Іонол» [11, 14]; вміст  $C_F$  (мг/кг) фуранових сполук та суми їх концентрацій  $\Sigma C_F$  (мг/кг) [16, 17]. Пороги визначення в МТО діагностичних компонентів відповідають вимогам [11, 12, 16]. При дослідженні впливу імпульсного електричного струму високої напруги на зміни концентрацій попередньо розчинених у МТО діагностичних компонентів  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  у присутності розчиненого  $\text{H}_2$ : попереднє насичення МТО газоподібним  $\text{H}_2$  та розчиненими газами  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  виконано при температурі 20 °C за методиками [12, 13] до концентрації  $\text{H}_2$  у цьому МТО на рівні 5 % об'ємних (далі – % об.) з використанням пристрою, аналогічного наведеному

у роботі [25]; вимірювання виконані за методикою [11, 26] при кількості електричних пробоїв  $N = 144$ . Відбір проб МТО для визначення вмісту в них розчинених газів виконано послідовно через кожні  $N=36$  електричних пробоїв. При виконанні досліджень використано установку для випробування олив УИМ-90 з автоматичним періодичним перемішуванням об'єму МТО. При цьому: випробувальна комірка накрита електроізолюючою кришкою; газовий простір над МТО заповнений воднем і з'єднаний з атмосферним повітрям через рідинний затвор.

Для діагностування досліджених ОСАТ та ОБУ застосовані методи: електричних вимірювань; «табличний метод»; метод «графічних образів дефектів»; метод «ЕТРА (Electric Technology Research Association)»; метод «Трикутник Дюваля» [6, 8].

**Дослідження технічних станів ОСАТ та його пошкодженого ОБУ на підставі результатів їх електричних випробувань.** Досліджений ОСАТ: маса МТО 67000 кг; введено в експлуатацію в 1992 р. Через 214 місяців після введення в експлуатацію виконані електричні випробування ОСАТ щодо показників  $R_{60}$ ,  $R_{15}$ ,  $K_a$ ,  $tg\delta$ ,  $C$ , відповідно до вимог нормативних документів [8, 9]. Результати виконаних електричних випробувань показали, що ОСАТ відповідає нормам, справний та працездатний [8, 9], та результати аналізів проб МТО з ОСАТ за методами ГХ вказують на наявність у ньому внутрішнього дефекту (табл. 2). Одночасно виконані електричні випробування ОБУ типів ГМТПА-45-330/1000У1 (фази «А» та «С») та ГМТА-90-110/2000У1 (фази «А», «В» та «С») при визначенні показників  $tg\delta_1$ ,  $tg\delta_2$ ,  $R_i$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  показали, що досліджені ОБУ справні та працездатні і відповідають нормам [8]. Одночасно виконані електричні випробування ОБУ типу ГМТПА-45-330/1000У1 фаза «В» при визначенні показників  $tg\delta_1$ ,  $tg\delta_2$ ,  $R_i$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  показали, що: показники  $tg\delta_1 = 1,546\%$  (норма  $tg\delta_1 = 0,15-1,0\%$ ) та  $tg\delta_2 = 5,008\%$  (норма  $tg\delta_2 < 1\%$ ) не відповідають нормам [8]; ОБУ несправний і визнаний таким, що має пошкодження [8].

**Дослідження фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних властивостей МТО в ОСАТ та в його пошкодженому ОБУ.** Результати цих досліджень показали, що для ОСАТ показники  $\rho$ ,  $KЧ$ ,  $ВРК$ ,  $t_{en}$ ,  $W$ ,  $U$ ,  $tg\delta_{МТО}$  при  $90\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $C_i$  відповідають нормам [11]. Результати визначення сумарного вмісту фуранових сполук  $\Sigma C_F$  у МТО у процесі експлуатації ОСАТ показали, що їх концентрації не перевищували нормовані значення порогів визначення  $C_{F,min} = 0,2$  мг/кг для МТО [16, 17]. Це свідчить про те, що ПОЕІ в ОСАТ не зазнала деструкції [27, 28]. Вміст присадки «Іонол» зменшився від значення  $C_i = 0,35\%$  мас. до значення  $C_i = 0,31\%$  мас. і відповідає нормі [11].

В табл. 1 наведено результати визначення фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних властивостей проб МТО із пошкодженого ОБУ типу ГМТПА-45-330/1000У1 фаза «В».

Таблиця 1 – Результати визначення фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних властивостей проб МТО із пошкодженого ОБУ

$\Delta t_1$ , місяць	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	КЧ, мг КОН/г	$t_{en}$ , °C	W, г/т	U, кВ	$tg\delta_{МТО}$ , % (70 °C/90 °C)	$C_i$ , % мас.
Норма	нв	<0,1	>135	<20	>55	<2,5/5,0	>0,1
120*	0,853	0,005	138	12,3	57	2,0/н	0,34
1	0,854	відс.	138	11,2	56	1,0/н	0,34
94	0,852	відс.	138	15,4	52**	2,96/5,1**	0,22

**Примітки:** \* – напрацювання часу після введення в експлуатацію ОБУ в ОСАТ, місяць;  $\Delta t_1$  – напрацювання часу після попереднього аналізу проби МТО із ОБУ, місяць; відс. – числове значення менше порога визначення показника відповідним ЗВТ; \*\* – значення, що не відповідають нормам та передбачають наявність дефектів; н – вимір не виконувався; нв – показник не визначається за вимогами [11]

Джерело: розроблено авторами



Результати визначення фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних властивостей проб МТО із пошкодженого ОБУ показали (табл. 1), що: показник  $tg\delta_{МТО}(70\text{ }^{\circ}\text{C}/90\text{ }^{\circ}\text{C}) = 2,96/5,1$  не відповідає нормам; вміст води збільшився від значення  $W = 11,2$  г/т до  $W = 15,4$  г/т; показник  $U = 52$  кВ не відповідає нормам; вміст присадки «Іонол» зменшився від значення  $C_i = 0,35\%$  мас. до значення  $C_i = 0,22\%$  мас. і відповідає нормі [11].

**Дослідження взаємозв'язків між концентраціями розчинених діагностичних компонентів у МТО в ОСАТ та у його пошкодженому ОБУ залежно від тривалості їх експлуатації.** У табл. 2 представлені результати аналізів за методами ГХ проб МТО із ОСАТ.

Таблиця 2 – Результати аналізів за методами ГХ проб МТО із ОСАТ

$\Delta t_2$ , місяць	Концентрація, $C_{i,m}$ , ppm								CO <sub>2</sub> /CO
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	ЗВГ	
1 рівень	<100	<50	<0,5	<15	<50	<1500	<150	<20000	3–10
2 рівень	100– 150	50– 120	0,5–10	15– 100	50– 100	1500– 3500	150– 350	20000– 40000	
3 рівень	>150	>120	>10	>100	>100	>3500	>350	>40000	
187*	відс.	1,8	відс.	11,1	3,1	104	9,3	0,59	11,2**
0,3	відс.	2,7	відс.	18,9**	3,8	392	29	0,87	13,5**
1	1,3	3,2	відс.	23**	4,4	678	43	1,43	15,8**
3	43,9	6,4	відс.	24,8**	4,1	817	56	0,93	14,6**
0,5	45,8	6,7	відс.	28,7**	4,2	955	60	1,05	15,9**
6	51,6	8,1	відс.	28,7**	4,7	1261	91	0,94	13,9**
0,4	44,9	8,2	відс.	27,7**	4,6	1238	92	1,48	13,5**
5	98,8	9,7	відс.	27,9**	5	1430	127	2,6**	11,3**
6	582**	22,3	0,7	24,6**	5,5	1566**	88	1,73	17,8**
0,4	612**	25,1	0,4	25,5**	5,8	1637**	104	1,8	15,7**
0,33	588**	26,4	0,3	27,5**	7,1	1711**	107	3,18**	16,0**
3	28 <sup>a</sup>	3,6 <sup>a</sup>	відс. <sup>a</sup>	8,9 <sup>a</sup>	2,3 <sup>a</sup>	660 <sup>a</sup>	27 <sup>a</sup>	1,42 <sup>a</sup>	нв

**Примітки:** \* – напрацювання часу після введення в експлуатацію ОСАТ, місяць;  $\Delta t_2$  – напрацювання часу після попереднього аналізу проби МТО із ОСАТ, місяць; 1–3 рівні – граничні рівні концентрацій розчинених газів, що характеризують технічний стан ОСАТ [6]; \*\* – значення, що не відповідають нормам та передбачають наявність дефектів; <sup>a</sup> – концентрації діагностичних газів у МТО після заміни пошкодженого ОБУ; відс. – числове значення менше за поріг визначення вимірюваного показника відповідним ЗВТ; нв – розрахунок не виконується за вимогами [6].

Джерело: розроблено авторами

З табл. 2 випливає, що: залежно від тривалості експлуатації ОСАТ значення концентрацій діагностичних розчинених в МТО газів H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO постійно збільшуються, а концентрація розчиненого в МТО діагностичного газу C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> практично залишається постійною; числові значення діагностичних газів H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> в МТО перевищують норми, при цьому відносини CO<sub>2</sub>/CO поза нормою [6]; після заміни пошкодженого ОБУ на працездатний ОБУ аналогічного типу, концентрації всіх діагностичних газів в МТО в ОСАТ відповідають нормам [6]. Це вказує на відсутність внутрішніх дефектів в ОСАТ і вплив пошкодженого ОБУ на концентрації розчинених в МТО діагностичних газів H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> до його заміни на працездатний ОБУ.

В табл. 3 наведено результати аналізів за методами ГХ проб МТО із пошкодженого ОБУ типу ГМТПА-45-330/1000У1 фаза «В».

Таблиця 3 – Результати аналізів за методами ГХ проб МТО із пошкодженого ОВУ

Δt <sub>3</sub> , місяць	Концентрація, C <sub>i,m</sub> , ppm								CO <sub>2</sub> /CO
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	ЗВГ	
ГР	600	140	1	30	60	3000	800	60000	3–10
120*	160	35	відс.	1,2	14	1840	250	1,71	7,4
1	170	39	відс.	8,4	11	1860	260	1,82	7,2
33	147	48,4	відс.	5,9	11	1107	127	2,59	8,7
55	43887**	14560**	відс.	5,9	1536**	982	8,0	8,52**	122,8**

**Примітки:** ГР – граничний рівень; \* – напрацювання часу після введення в експлуатацію ОВУ в ОСАТ, місяць; Δt<sub>3</sub> – напрацювання часу після попереднього аналізу проби МТО з ОВУ до ОСАТ, місяць; \*\* – значення, що не відповідають нормам [6] та передбачають наявність дефектів; відс. – числове значення менше за поріг визначення вимірюваного показника відповідним ЗВГ.

Джерело: розроблено авторами

З табл. 3 випливає, що залежно від тривалості експлуатації ОВУ значення концентрацій розчинених діагностичних газів H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> в МТО практично не змінюються до моменту виявлення у цьому уводі дефектів на підставі електричних випробувань. Перед виведенням ОВУ з роботи, пов'язаного з незадовільними результатами електричних випробувань, значення концентрацій діагностичних розчинених газів H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, ЗВГ в МТО, а також відношення CO<sub>2</sub>/CO, зросли та перевищили встановлені граничні значення (табл. 3). При цьому значення концентрацій розчинених в МТО діагностичних газів CO<sub>2</sub>, CO, навпаки, постійно зменшувалися і знаходилися в межах встановлених граничних значень [6] до моменту виявлення в цьому уводі дефектів на підставі електричних випробувань. У зв'язку з невеликим обсягом МТО в ОВУ (приблизно 215 кг) та високим вмістом розчиненого H<sub>2</sub> (табл. 3), можна припустити, що в процесі виникнення всередині ОВУ дефекту, пов'язаного з інтенсивним виділенням H<sub>2</sub>, можливі хімічні реакції гідрування CO та CO<sub>2</sub> до CH<sub>4</sub>. Це призводить до зниження значень концентрацій CO та CO<sub>2</sub> у МТО та підвищення значення концентрації розчиненого газу CH<sub>4</sub> за хімічними рівняннями [29]:



На можливість протікання хімічних процесів за рівняннями (1) та (2) вказує зростання концентрації H<sub>2</sub>O від  $W = 12,3$  г/т до  $W = 15,4$  г/т в МТО (табл. 2).

Під впливом електричних розрядів на вуглеводні МТО основним продуктом реакції є H<sub>2</sub>, у тому числі атомарний водень, який може не тільки приєднуватися по подвійним і потрійним вуглецевим зв'язкам у молекулах ненасичених вуглеводнів, а й викликати дисоціацію вуглеводнів за С-С-зв'язками. При цьому у великих концентраціях виділяється H<sub>2</sub> і може частково гідрувати C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> і C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> до C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> в об'ємі МТО [29]. Протікання хімічних реакцій (1) і (2) може бути пов'язане з генеруванням в об'ємі МТО: хімічно активних частинок водню в процесі виникнення електричних часткових розрядів; хімічно активних частинок вже розчиненого водню в МТО під впливом електричних часткових розрядів та іонізації цього розчиненого H<sub>2</sub> у процесі протікання електричних рідинних ударів, сонохімічних та плазмохімічних реакцій [20, 22].

В табл. 4 наведено результати аналізів за методами ГХ проб МТО із пошкодженого ОВУ при визначенні ЗВП і фуранових сполук.

Таблиця 4 – Результати аналізів за методами ГХ проб МТО із пошкодженого ОВУ при визначенні ЗВП і фуранових сполук

Δt <sub>4</sub> , місяць	Компонент							
	O <sub>2</sub> , ppm	N <sub>2</sub> , ppm	ЗВП, ppm	2FOL, мг/кг	2ACF, мг/кг	5MEF, мг/кг	2FAL, мг/кг	ΣC <sub>F</sub> , мг/кг
ГР	<10000	нв	<60000	1	1	1	1	1
120*	300	32000	32300	відс.	відс.	відс.	відс.	відс.
1	250	31500	31750	відс.	відс.	відс.	відс.	відс.
33	300	23900	24200	відс.	відс.	відс.	відс.	відс.
55	250	24000	24250	0,3	0,3	0,4	1,8**	2,8**

**Примітки:** ГР – граничний рівень; \* – напрацювання часу після введення в експлуатацію ОВУ в ОСАТ, місяць; Δt<sub>4</sub> – напрацювання часу після попереднього аналізу проби МТО з ОВУ в ОСАТ, місяць; відс. – числове значення менше за поріг визначення вимірюваного показника відповідним ЗВТ; \*\* – значення, що не відповідають нормам та передбачають наявність дефектів [18]; нв – показник не визначається за вимогами [6].

Джерело: розроблено авторами

Результати визначення вмісту O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, ЗВП, фуранових сполук у пробах МТО з ОВУ (табл. 4), показують, що: ОВУ був герметичним у процесі експлуатації та повітря в нього з навколишньої атмосфери не проникало; концентрація 2FAL та сума концентрацій фуранових сполук ΣC<sub>F</sub> перевищують встановлені норми [18], що вказує на деструкцію ПОЕІ в ОВУ [18, 30].

**Дослідження технічних станів ОСАТ та його пошкодженого ОВУ на підставі результатів ГХ аналізів проб МТО з них.** У табл. 5 наведено допоміжні результати, отримані для діагностування ОСАТ та ОВУ на підставі результатів визначення за методами ГХ вмісту розчинених діагностичних газів у МТО (табл. 2 та табл. 3) та із урахуванням вимог [6].

Таблиця 5 – Допоміжні результати, отримані для діагностування ОСАТ та ОВУ на підставі результатів визначення за методами ГХ вмісту розчинених діагностичних газів в МТО

$\frac{H_2}{H_2}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$	% CH <sub>4</sub>	% C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	% C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Д, ppm
ОСАТ											
1	0,05	0,012	0,05	0	0,011	3,9	0,042	49	51	2*	54,2
ОВУ											
1	0,33	0,035	0	0	0	0,004	0	99,96	0,04	2*	14566

**Примітки:** H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> – концентрація відповідного діагностичного газу МТО, ppm; \* – умовне значення, прийняте по [6]; Д = (CH<sub>4</sub>+C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>+ C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>), ppm; % CH<sub>4</sub> = 100·CH<sub>4</sub>/Д, % відносний; % C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> = 100·C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/Д, % відносний; % C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> = 100·C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/Д, % відносний [6]

Джерело: адаптовано із [6]

**Результати дослідження ОСАТ. Визначення наявності дефекту «Табличним методом».** З даних табл. 2, табл. 5 та з використанням відносин концентрацій розчинених в МТО діагностичних газів C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, відповідно до рекомендацій [6, 7] в ОСАТ визначено тип дефекту – «Електричні розряди низької енергії» [6, 7] і при значенні CO<sub>2</sub>/CO = 16 температура в зоні дефекту менше 150 °С (табл. 2).

**Визначення наявності дефекту «Графічними методами».** На рисунку 1 показаний результат визначення наявності імовірного дефекту в ОСАТ методом «Графічного образу», який за своїм зовнішнім виглядом близький до графічного образу дефекту, наведеного в [6, 7]. У розрахунках використані відносини концентрацій розчинених діагностичних газів у МТО: H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>.

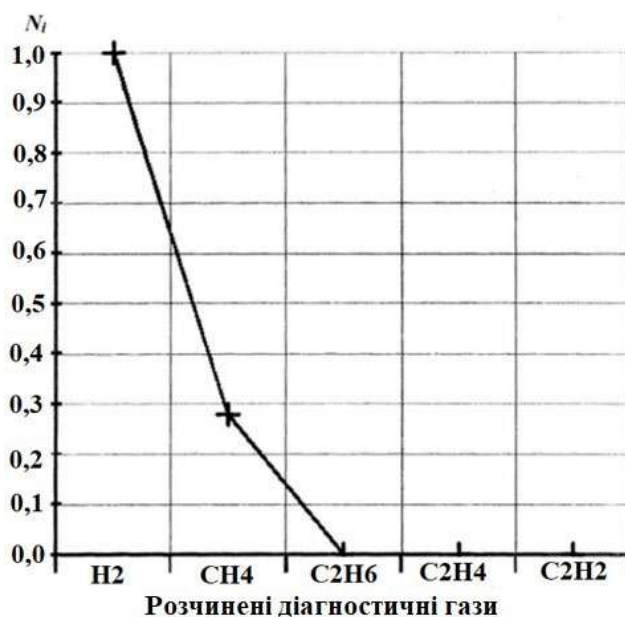


Рис. 1. Визначення наявності дефектів в ОСАТ графічним методом «Графічного образу»:  $N_i$  – значення відносин концентрацій  $i$ -х розчинених діагностичних газів  $C_i$  (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) до концентрації основного розчиненого в МТО газу  $C_o$

Джерело: розроблено авторами

З рисунку 1 випливає: основний розчинений у МТО діагностичний газ  $C_o$  – водень (діагностичний газ з найбільшою концентрацією в МТО); виявлений дефект типу «Часткові електричні розряди» [6, 7]. На рисунку 2 показані результати визначення наявності дефекту «Графічними методами».

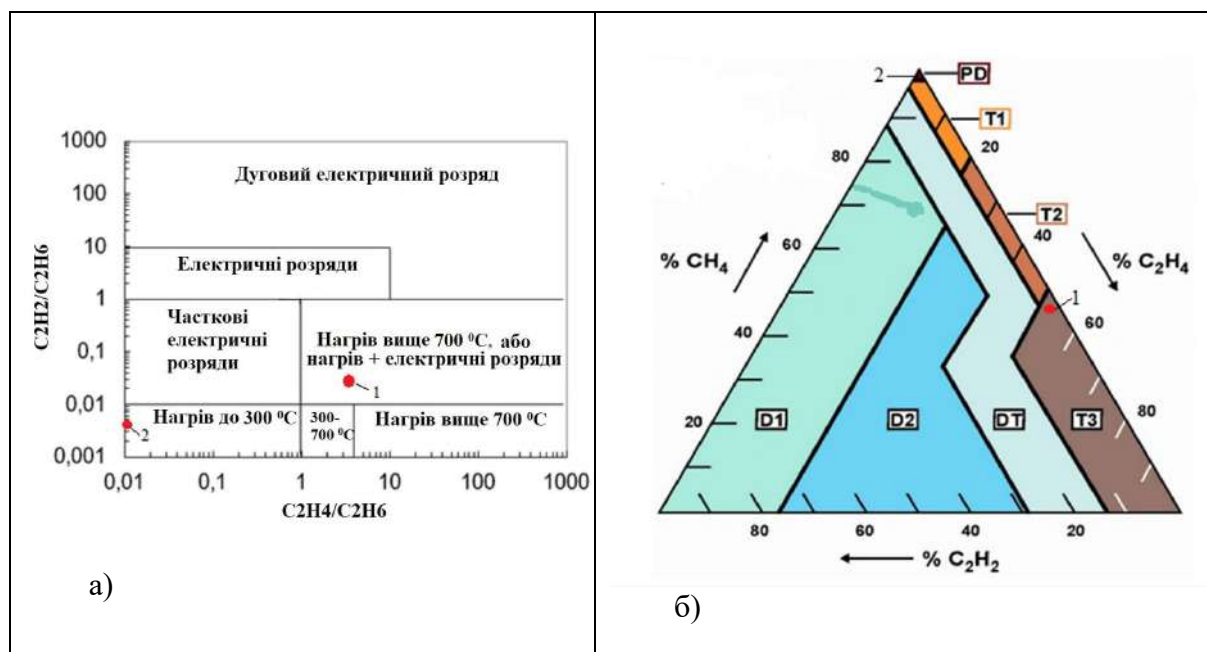


Рис. 2. Результати визначення наявності дефекту «Графічними методами»: а) метод «ЕТРА»: поз.1 – для ОСАТ; поз. 2 – для ОБУ; б) метод «Трикутник Дюваля»: поз. 1 – для ОСАТ; поз. 2 – для ОБУ

Джерело: розроблено авторами

На рисунку 2: PD – часткові електричні розряди, T1 – перегрів менше ніж 300 °C, T2 – перегрів між 300 °C та 700 °C, T3 – перегрів понад 700 °C, D1 – часткові електричні розряди низької енергії (іскріння), D2 – часткові електричні розряди високої енергії (дуга), DT – змішання дефектів теплових та електричних типів. На рисунку 2-а (поз. 1) показаний результат визначення наявності ймовірного дефекту за методом «ETRA» для ОСАТ із використанням відносин концентрацій  $C_2H_2/C_2H_6$  і  $C_2H_4/C_2H_6$  (табл. 2, табл. 5). Ймовірний дефект типу «Нагрівання вище 700 °C» або «Нагрівання та часткові електричні розряди» [6, 7]). На рисунку 2-б (поз. 1) показаний результат визначення наявності ймовірного дефекту методом «Трикутник Дюваля» для дослідженого ОСАТ (дані з табл. 2 та табл. 5). Ймовірний дефект типу «Нагрівання вище 700 °C» [6, 7].

У зв'язку з тим, що за результатами досліджень електричних характеристик ОСАТ він визнаний справним і працездатним, наявність усередині цього ОСАТ дефектів електричного і теплового характерів може бути пов'язана з внутрішніми дефектами в його ОБУ. При використанні методів діагностування «ETRA» та «Трикутник Дюваля» в ОСАТ встановлено ймовірний дефект типу «Перегрів понад 700 °C». Такий дефект має супроводжуватися утворенням в МТО гетерогенних частинок вуглецю і розчиненого  $C_2H_2$  [6, 7]. Однак у МТО не виявлено гетерогенних частинок вуглецю, а вміст розчиненого  $C_2H_2$  в МТО в ОСАТ (табл. 2) має значення від 0,3 ppm до 0,7 ppm, що відповідає рівню технічного стану 2 (передбачається наявність дефекту) [6]. При цьому концентрації окремих фуранових сполук та сума їх концентрацій у МТО не перевищують встановлених нормованих значень порогів визначення ( $C_{F,min} = 0,2$  мг/кг) для МТО [16]. Це свідчить про те, що: ПОЕІ в ОСАТ не зазнала деструкції [6, 18]; у разі діагностування ОСАТ, використання методів діагностування «ETRA» і «Трикутник Дюваля» вимагає уточнення граничних умов свого застосування.

**Результати дослідження пошкодженого ОБУ. Визначення наявності дефекту за «Табличним методом».** З даних табл. 3 і табл. 5 та з урахуванням значень відносин концентрацій розчинених діагностичних газів  $C_2H_2/C_2H_4$ ,  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$ , відповідно до рекомендацій [6] визначено: ймовірний тип дефекту в ОБУ – «Електричні розряди низької енергії» [6, 7]; при значенні  $CO_2/CO = 122,8$  температура у зоні дефекту менше 150 °C; за значення  $O_2/N_2 = 0,01$  (дані табл. 4) протікають окислювальні процеси високої інтенсивності в МТО [6, 7].

**Визначення наявності дефекту «Графічними методами».** Графічний образ ймовірного дефекту аналогічний наведеному на рисунку 1. Основний розчинений в МТО діагностичний газ –  $H_2$ . З урахуванням значень відносин концентрацій розчинених у МТО діагностичних газів  $H_2/H_2$ ,  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_6/H_2$ ,  $C_2H_4/H_2$ ,  $C_2H_2/H_2$ , ймовірний дефект – «Часткові електричні розряди» [6, 7].

На рисунку 2-а (поз. 2) показаний результат визначення наявності ймовірного дефекту за методом «ETRA» для дослідженого ОБУ. З урахуванням значень відносин розчинених у МТО діагностичних газів  $C_2H_2/C_2H_6$  і  $C_2H_4/C_2H_6$  (табл. 3 та 5) ймовірний дефект – «Нагрівання до 300 °C» [6, 7]). На рисунку 2-б (поз. 2) показаний результат визначення наявності ймовірного дефекту за методом «Трикутник Дюваля» для дослідженого ОБУ (дані з табл. 3 та 5). Ймовірний дефект – «Часткові електричні розряди» [6, 7].

На підставі отриманих результатів досліджень рекомендовано виконувати визначення вмісту фуранових сполук у пробах МТО з ОБУ із РОЕІ у випадках, якщо результати: електричних випробувань ОБУ не відповідають встановленим нормам [8]; фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних аналізів проб МТО з ОБУ не відповідають встановленим нормам [11]; аналізів за методами ГХ проб МТО вказують на перевищення концентрації хоча б для одного діагностичного розчиненого газу над встановленими нормами [6], навіть якщо вміст  $CO$  і  $CO_2$  (табл. 3) відповідають встановленим нормам по [6].

*Дослідження технічного стану пошкодженого ОВУ на підставі візуального огляду його зовнішньої поверхні та внутрішніх конструктивних елементів після його вилучення з ОСАТ.* На рисунку 3 показані результати візуального огляду зовнішньої поверхні та внутрішніх конструктивних елементів пошкодженого ОВУ типу ГМТПА-45-330/1000У1 фаза «В» після його вилучення з ОСАТ.



*Рис. 3. Результати візуального огляду та розбирання пошкодженого ОВУ типу ГМТПА-45-330/1000У1 фаза «В» після його вилучення з ОСАТ: а) сліди пошкодження електричного та термічного характеру на зовнішній поверхні ОВУ, що стикається з МТО всередині ОСАТ; б) дефекти електричного характеру у ПОЕІ; в) дефекти електричного та термічного характеру зі слідами утворення Х-воску в ПОЕІ; г) часткові електричні розряди та частки вугілля в ПОЕІ; д) дефекти електричного та термічного характеру у ПОЕІ*

Джерело: розроблено авторами

На рисунку 3-а видно сліди пошкодження електричного та термічного характеру на зовнішній поверхні ОВУ, що стикається з МТО всередині ОСАТ. На рисунку 3-б видно дефекти електричного характеру в ПОЕІ. На рисунку 3-в видно дефекти електричного та термічного характеру зі слідами утворення Х-воску в ПОЕІ (наявність Х-воску призводить до: зростання електропровідності МТО [20, 31]; зниження електричної міцності МТО [21, 32]; локального нагрівання та прогресуючої деструкції МТО [22, 33]). На рисунку 3-г видно дефекти, пов'язані з частковими електричними розрядами та утворенням

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

частинок вугілля в ПОЕІ. На рисунку 3-д видно дефекти електричного та термічного характеру в електричній ізоляції.

В табл. 6 показано основний алгоритм дій при діагностуванні ОСАТ та його ОВУ з урахуванням результатів їх електричних випробувань та аналізів проб МТО з цього електрообладнання.

*Таблиця 6 – Основний алгоритм дій при діагностуванні ОСАТ та його ОВУ з урахуванням результатів їх електричних випробувань та аналізів проб МТО із електрообладнання*

№	Процедура	Результат
1.	Відбір проб МТО із ОСАТ згідно з графіком планового відбору проб МТО	1. Результати визначення фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних властивостей проб МТО відповідають нормам 2. Результати ГХ аналізів вказують на наявність в ОСАТ дефектів – «електричні розряди низької енергії», «часткові електричні розряди», «перегрів понад 700 °С»
2.	Вивід ОСАТ з роботи	Відключення від електричної мережі
3.	Електричні випробування ОСАТ	Результати електричних випробувань ОСАТ відповідають нормам
4.	Електричні випробування ОВУ в ОСАТ	Результати електричних випробувань ОВУ: а) типів ГМТПА-45-330/1000У1 (фази «А» і «С») та ГМТА-90-110/2000У1 (фази «А», «В» і «С») – відповідають встановленим нормам; б) типу ГМТПА-45-330/1000У1 (фаза «В») – не відповідають нормам
5.	Відбір проб МТО із пошкодженого ОВУ	1. Показник $tg\delta_{МТО}(70\text{ }^{\circ}\text{C}/90\text{ }^{\circ}\text{C})$ не відповідає нормам 2. Результати ГХ аналізів вказують на наявність в ОВУ дефектів – «електричні розряди низької енергії», «часткові електричні розряди», «нагрівання до 300 °С», деградація ПОЕІ
6.	Вилучення пошкодженого ОВУ із ОСАТ і візуальний огляд зовнішньої поверхні та внутрішніх конструктивних елементів ОВУ	Результати візуального огляду: виявлені дефекти електричного і термічного характеру зі слідами Х-воску та часток твердого вуглецю в ПОЕІ
7.	Заміна пошкодженого ОВУ на дієздатний ОВУ аналогічного типу	Результати електричних випробувань ОВУ відповідають встановленим нормам
8.	Очищення та дегазація МТО у баку ОСАТ	Результати випробувань МТО відповідають нормам
9.	Введення в роботу ОСАТ	Результати випробувань ОСАТ відповідають нормам

Джерело: розроблено авторами

**Дослідження впливу імпульсного електричного струму високої напруги на зміни концентрацій попередньо розчинених в МТО діагностичних компонентів  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  у присутності розчиненого  $\text{H}_2$ .** У табл. 7 представлені результати дослідження впливу імпульсного електричного струму високої напруги на зміни концентрацій попередньо розчинених в МТО марки ГК діагностичних компонентів  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  у присутності розчиненого  $\text{H}_2$ . У процесі виконання дослідження середнє значення пробивної електричної напруги було на рівні  $U = 65$  кВ.

Таблиця 7 – Результати дослідження впливу імпульсного електричного струму високої напруги на зміни концентрацій попередньо розчинених у МТО діагностичних компонентів  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  у присутності розчиненого  $\text{H}_2$

Показник	Концентрація, $C_{i,m}$ , % об.							$W$ , г/г
	$\text{H}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_2$	$\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{CO}_2$	$\text{CO}$	$\text{H}_2\text{O}$
$N = 0$ (ГФ)	95,43	0,58	0,21	0,20	0,15	0,93	2,50	н
$N = 0$	5,0	0,25	0,25	0,34	0,35	1,00	0,30	9,0
$N = 36$	5,0	0,35	0,40	0,35	0,50	1,10	0,40	11,0
$N = 72$	5,0	0,45	0,41	0,38	0,65	0,95	0,33	12,8
$N = 108$	5,0	0,52	0,30	0,20	0,77	0,87	0,25	13,5
$N = 144$	5,0	0,70	0,25	0,15	0,88	0,65	0,18	15,0

**Примітки:**  $N$  – кількість електричних пробів; ГФ – концентрація діагностичного компоненту в газовій фазі над МТО; н – вимір не виконувався.

Джерело: розроблено авторами

З табл. 7 випливає, що у процесі дії імпульсного електричного струму високої напруги на МТО, що насичене воднем: концентрація розчиненого газу  $\text{H}_2$  в МТО не змінюється і дорівнює розчинності цього газу в МТО; концентрації розчинених газів  $\text{CH}_4$  та  $\text{C}_2\text{H}_6$  безперервно підвищуються; концентрація розчиненого в МТО газу  $\text{C}_2\text{H}_2$  підвищується до значення 0,41 % об. при  $N = 72$ , і далі зменшується до значення 0,25 % об. при  $N = 144$ . Аналогічний характер змін значень концентрацій стосується і розчинених в МТО газів  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ , при цьому концентрація  $\text{H}_2\text{O}$  в МТО безперервно підвищується. Можна припустити, що для розчинених газів  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ , виділення в об'ємі МТО водню, призводить до гідрування цих газів, зменшення їх концентрацій в МТО та підвищенню концентрації  $\text{H}_2\text{O}$  в МТО. Ці отримані дані можуть пояснити результати, що наведені в табл. 3.

Автори статті висловлюють подяку керівництву Служби діагностики, ізоляції, захисту від електричних перенапруг Південної електроенергетичної системи (м. Одеса) за надану інформацію про окремі результати випробувань ОСАТ та ОБУ.

**Висновки. 1.** Для досліджених ОСАТ та ОБУ застосовані методи діагностування: «табличний метод»; метод «графічного образу»; метод «ЕТРА»; метод «Трикутник Дюваля». Для ОСАТ встановлено види дефектів – «електричні розряди низької енергії», «часткові електричні розряди», «перегрів понад 700 °С». Фуранові сполуки 2FOL, 2FAL, 2ACF, 5MEF в МТО відсутні, що вказує на відповідність стану ПОЕІ в ОСАТ встановленим нормам. Встановлено, що використання методів діагностування «ЕТРА» та «Трикутник Дюваля» потребує уточнення граничних умов свого застосування. Для пошкодженого ОБУ виявлено наступні види дефектів – «електричні розряди низької енергії», «часткові електричні розряди», «нагрівання до 300 °С». Сума концентрацій фуранових сполук  $\Sigma C_F = 2,8$  мг/кг і перевищує встановлену норму, що вказує на деструкцію ПОЕІ. Рекомендовано додатково визначати вміст фуранових сполук у пробах МТО з ОБУ з ПОЕІ. При візуальному огляді зовнішньої поверхні та внутрішніх конструктивних елементів ОБУ після його вилучення з ОСАТ виявлено: сліди дефектів електричного та термічного характеру на зовнішній поверхні ОБУ, що стикається з МТО всередині ОСАТ; дефекти електричного характеру у ПОЕІ; дефекти електричного та термічного характеру зі слідами утворення X-воску в ПОЕІ в ОБУ; дефекти електричного та термічного характеру в ПОЕІ в ОБУ; наявність часткових електричних розрядів та частинок вугілля в ПОЕІ. **2.** Для ОСАТ: фізико-хімічні, теплофізичні та електрофізичні властивості МТО ( $\rho$ , КЧ, ВРК,  $t_{cn}$ ,  $W$ ,  $U$ ,  $tg\delta_{MTO}$  при 90 °С,  $C_i$ ) відповідають встановленим нормам; концентрації діагностичних розчинених газів  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  перевищують встановлені норми; рекомендовано визначати в МТО одночасно вміст фуранових сполук, присадки «Іонол». Для пошкодженого ОБУ з ПОЕІ: показник  $tg\delta_{MTO}(70\text{ °С}/90\text{ °С}) = 2,96/5,1$  та показник  $\Sigma C_F$



= 2,8 мг/кг не відповідають встановленим нормам. Для підвищення точності діагностування ОВУ рекомендовано виконувати одночасне визначення в МТО вмісту розчинених газів і фуранових сполук. Залежно від тривалості експлуатації ОСАТ та його ОВУ: а) для ОСАТ: концентрації розчинених газів  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $C_2H_4$  у МТО збільшуються, досягаючи своїх нормованих граничних значень; після заміни пошкодженого ОВУ на працездатний, концентрації діагностичних газів у МТО в ОСАТ відповідають встановленим нормам. Це вказує на відсутність внутрішніх дефектів в ОСАТ і вплив пошкодженого ОВУ на концентрації розчинених в МТО в ОСАТ діагностичних газів; б) для пошкодженого ОВУ: концентрації розчинених газів  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$  у МТО вище встановлених граничних значень; у разі виникнення дефекту в ОВУ в МТО можливе гідрування  $CO$  і  $CO_2$  до  $CH_4$ ; рекомендовано одночасне визначення властивостей проб МТО та вмісту в ньому діагностичних розчинених газів. У процесі дії імпульсного електричного струму високої напруги на МТО, що насичена воднем: а) концентрація розчиненого газу  $H_2$  в МТО не змінюється і дорівнює розчинності цього газу в МТО; б) концентрації розчинених газів  $CH_4$  та  $C_2H_6$  безперервно підвищуються; в) ймовірно, що для розчинених газів  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $CO_2$ ,  $CO$  виділення в об'ємі МТО водню, призводить до гідрування цих газів, зменшення їх концентрацій в МТО та підвищенню концентрації  $H_2O$  в МТО. **3.** При діагностуванні ОСАТ та його ОВУ встановлено алгоритм дій з урахуванням результатів електричних випробувань цього електрообладнання та аналізів проб МТО з нього. **4.** Отримані результати дають змогу підвищити достовірність діагностування ОСАТ та його ОВУ. Подальші перспективи досліджень полягають в удосконаленні елементів системи діагностування ОСАТ та ОВУ за результатами аналізів проб МТО з цього обладнання у процесах їх експлуатації.

### Список використаних джерел

1. Сви, П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
2. Сахно А. А. Температурная зависимость диэлектрических потерь бумажно-масляной изоляции конденсаторного типа для диагностирования высоковольтных аппаратов в непрерывном режиме / А. А. Сахно, Л. С. Скрупская // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2017. – № 4(40). – С. 52-59.
3. IEC 60137:2003(E)-08. Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V. – Geneva, Switzerland. – 99 p.
4. Абрамов, В. Б. Приемальные та эксплуатационные испытания электроустановки / В. Б. Абрамов, В. О. Бржезицкий, О. Р. Проценко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 218 с.
5. Гобрей, Р. М. Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагоджування і в експлуатації. Частина 1 / Р. М. Гобрей, О. Є. Рубаненко, Г. І. Гримуд. – Київ : «НТУКЦ», 2008. – 528 с.
6. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ» : Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 99 с.
7. IEEE Std C57.104™-2019 (Revision of IEEE Std C57.104 -2008). IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. – Transformers Committee of the IEEE Power and Energy Society, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997. USA, 2019. – 98 p.
8. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Норми випробування електрообладнання. – Київ : ГРІФРЕ: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 266 с.
9. ВБИЕ 672834.025 ИМ. Трансформаторы силовые. Инструкция по монтажу, пуску и эксплуатации. – Запорожье : Запорожский трансформаторный завод, 2001. – 38 с.
10. IEEE C57.12.90-2015/Cor 1-2017 (Corrigendum to IEEE Std C57.12.90-2015) – IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers

Corrigendum 1: Editorial and Technical Corrections: Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA, 2017. – 80 p.

11. СОУ-Н ЕЕ 43.101:2009. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Норми оцінювання якості. – Київ : КВЦ: Міністерство палива та енергетики України, 2009. – 170 с.

12. СОУ-Н ЕЕ 46.302:2006. Підготовка та проведення хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі маслонаповненого електрообладнання. Методичні вказівки. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 70 с.

13. IEC 60567:1992-07. Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and the analysis of free and dissolved gases. – Geneva, Switzerland, 2005. – 80 p.

14. ASTM Standard D 4768-96. Standard Test Method for Analysis of 2,6-Ditertiary-Butyl Para-Cresol and 2,6-Ditertiary-Butyl Phenol in Insulating Liquids by Gas Chromatography. – ASTM International, 1996. – 3 p.

15. Зайцев, С. В. Разработка газохроматографического метода определения в энергетических маслах ионала и воды методом добавок / С. В. Зайцев, В. А. Кишнеvский, И. Д. Шуляк // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 2/6(74). – С. 21-28. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40896

16. СОУ-Н ЕЕ 40.1-21677681-95:2014. Трансформаторні оливи. Методика визначення фуранових сполук : метод. вказівки. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2014. – 21 с.

17. IEC 61198:1993-09. Mineral insulating oils. Method for the determination of 2-furfural and related compounds. – Geneva, Switzerland, 1993. – 28 p.

18. СОУ-Н МЕВ 40.1-21677681-64:2012. Обстеження технічного стану і визначення залишкового ресурсу твердої ізоляції оливнонаповненого устаткування. Методика оцінювання залишкового ресурсу твердої ізоляції оливнонаповненого трансформатора : метод. вказівки. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2012. – 20 с.

19. Rogers, R. R. IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis / R. R. Rogers // IEEE Trans. on Electrical Insulation. – 1978. – Vol. 13, № 5. – P. 349-354. DOI: 10.1109/TEI.1978.298141

20. Славинский, А. З. Контроль электротехнического оборудования в эксплуатации и при ремонтах / А. З. Славинский. – Москва : Научтехлитиздат, 1999. – 110 с.

21. Липштейн, Р. А. Трансформаторное масло / Р. А. Липштейн, М. И. Шахнович. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.

22. Технологія ремонту і експлуатації високовольтних уводів та їх конструктивні особливості / О. І. Гуменюк, О. Є. Рубаненко, О. М. Остапчук, В. Л. Таловер'я, Ю. О. Шаповалов. – Київ : «НТУКЦ», 2012. – 552 с.

23. Monitoring of Low Levels of Furfural in Power Transformer Oil with a Sensor System Based on a POF-MIP Platform / N. Cennamo, L. De Maria, G. D'Agostino, L. Zeni, M. Pesavento // Sensors. – 2015. – № 15(4). – P. 8499-8511. DOI:10.3390/s150408499

24. IEC 60628:1985. Gassing of insulating liquids under electrical stress and ionization / International Electrotechnical Commission. – Geneva, Switzerland, 1985. – 34 p.

25. Improvement of gas monitoring methods in water of the hydrogen-water cooling system of NPP'S turbine generator / S. Zaitsev, A. Tykhomyrov, V. Chychenin, V. Kyshnevskiy // Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News. – 2021. – № 1(29). – P. 49-57. DOI: <https://doi.org/10.20535/2218-930012021233705>

26. IEC 60156:1995 Insulating liquids. Determination of the breakdown voltage at power frequency. Test methods. International Standard. – Geneva, Switzerland, 2018. – 37 p.

27. Thango, B. A. Assessment of Transformer Cellulose Insulation Life Expectancy Based on Oil Furan Analysis (Case Study: South African Transformers) / B. A. Thango, J. A. Jordaan, A. F. Nnachi // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. – 2021. – Vol. 6. No. 6. – P. 29-33. DOI: 10.25046/aj060605

28. Prediction of Transformers Conditions and Lifetime Using Furan Compounds Analysis / R. A. abd El-Aal, K. Helal, A. M. M. Hassan, S. S. Dessouky. // IEEE ACCESS. – 2019. – Vol. 7. – P.102264-102273. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2931422
29. Clayden, J. Organic Chemistry / J. Clayden, N. Greeves, S. Warren – Oxford University Press, 2012. – 1234 p.
30. Approach for Furan Estimation in Transformer Oil / A. Abu-Siada; Sin P. Lai; Syed M. Islam. A Novel Fuzzy-Logic. // IEEE Transactions on power delivery. – 2012. – Vol. 27, No. 2, April. – P. 469-474. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2186986
31. Костенко М.А. Техника высоких напряжений / М.А. Костенко. – М.: «Высшая школа», 1973. – 528 с.
32. Partial Discharges Behaviors of Internal Void in the Oil-Paper Insulation and its Effect on the Material / W. Zhang, Z. Li, Guojian Ji, J.Guo, Y.Yang // Proceedings of the 2015 International conference on Applied Science and Engineering Innovation. Atlantis Press, 2015. – P.1159-1163. DOI: 10.2991/asei-15.2015.229
33. Thomas, P. Ageing studies on paper-oil to assess the condition of solid insulation used in power transformers / P. Thomas; A.K. Shukla. // 2001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics (2001 June 25-29, Eindhoven, the Netherlands). – Eindhoven, 2001. – P. 69-72. DOI: 10.1109/ICSD.2001.955515

### References

1. Svi, P.M. (1992). *Methods and means of diagnostics of high voltage equipment*. Moscow: Energoatomizdat.
2. Sakhno, A., Skrupskaya, L. (2017). Temperature dependence of the dielectric loss factor of oil-impregnated condenser insulation for the diagnosis of high-voltage apparatus in the online mode. *Electromechanical and energy-saving systems*, 4(40), 52–59.
3. International Standard. (2003). *Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V* (IEC 60137:2003(E)-08).
4. Abramov, V.B., Brzezytskyi, V.O., Protsenko O.R. (2015). *Acceptance and operational tests of electrical equipment*. Kyiv: NTUU «KPI».
5. Gobrey, R.M., Rubanenko, O.Ye., Grimud, G.I. (2008). *Technical diagnostics, testing and measurement of electrical equipment in the conditions of installation, commissioning and operation. Part 1*. Kyiv: NTUKC.
6. GRIFRE. (2007). *Diagnosis of oil-filled transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of free gases selected from the gas relay and gases dissolved in insulating oil. Methodical instructions* (SOU-N EE 46.501: 2006). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine.
7. IEEE. (2019). *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. Transformers Committee of the IEEE Power and Energy Society: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA* (IEEE Std C57.104™-2019 (Revision of IEEE Std C57.104-2008)).
8. GRIFRE. (2007). *Norms of electrical equipment testing* (SOU-N EE 20.302:2007). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine.
9. Zaporozhye Transformer Plant. (2001). *Power transformers. Instructions for installation, start-up and operation* (VBIE 672834.025 IM).
10. IEEE. (2017). *IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers Corrigendum 1: Editorial and Technical Corrections: Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA* (IEEE C57.12.90-2015/Cor 1-2017 (Corrigendum to IEEE Std C57.12.90-2015)).
11. KVITS. (2009). *Acceptance, application and operation of transformer oils. Norms of quality assessment* (SOU-N EE 43.101:2009). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine.
12. GRIFRE. (2007). *Preparation and chromatographic analysis of free gases selected from the gas relay and gases dissolved in the insulating oil of oil-filled electrical equipment. Methodical instructions* (SOU-N EE 46.302:2006). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine.
13. International Standard. (1992). *Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and the analysis of free and dissolved gases* (IEC publication 60567:1992-07).

14. ASTM International. (1996). *Standard Test Method for Analysis of 2,6-Ditertiary-Butyl Para-Cresol and 2,6-Ditertiary-Butyl Phenol in Insulating Liquids by Gas Chromatography* (ASTM Standard D 4768-96).
15. Zaitsev, S.V., Kishnevsky, V.A., Shulyak, I.D. (2015). Development of a gas chromatographic method for the determination of ionol and water in energy oils by the method of additives]. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*, (2/6-74), 21–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40896
16. GRIFRE. (2014). *Transformer oils. Methods of determination of furan compounds. Methodological guidelines* (SOU-N EE 40.1-21677681-95:2014). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine.
17. International Standard. (1993). *Mineral insulating oils. Method for the determination of 2-furfural and related compounds* (IEC 61198:1993-09).
18. GRIFRE. (2012). *Inspection of technical condition and determination of residual life of solid insulation of oil-filled equipment. Method of estimating the residual life of solid insulation of an oil-filled transformer. Methodical instructions* (SOU-N MEV 40.1-21677681-64:2012). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine.
19. Rogers, R.R. (1978). IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis. *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, 13(5), p. 349–354. DOI: 10.1109/TEI.1978.298141
20. Slavinsky, A.Z. (1999). *Control of electrical equipment in operation and during repairs*. Moscow: Nauchtehlitizdat.
21. Lipstein, R.A., Shakhnovich, M.I (1983). *Transformer oil*. Moscow: Energoatomizdat.
22. Humenyuk, O.I., Rubanenko, O.E., Ostapchuk, O.M., Taloverya, V.L., Shapovalov, Yu.O. (2012). *Technology of repair and operation of high-voltage inputs and their design features*. Kyiv: Scientific-Technical Educational and Consultative Center».
23. Cennamo, N., De Maria, L., D’Agostino, G., Zeni, L., Pesavento, M. (2015). Monitoring of Low Levels of Furfural in Power Transformer Oil with a Sensor System Based on a POF-MIP Platform. *Sensors*, 15(4), p. 8499–8511. DOI:10.3390/s150408499
24. International Standard. (1985). *Gassing of insulating liquids under electrical stress and ionization* (IEC 60628:1985).
25. Zaitsev, S., Tykhomirov, A., Chychenin V., Kyshnevskiy V. (2021). Improvement of gas monitoring methods in water of the hydrogen-water cooling system of NPP’S turbine generator. *Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News*, 1(29), 49–57. DOI: <https://doi.org/10.20535/2218-930012021233705>
26. International Standard. (2018). *Insulating liquids. Determination of the breakdown voltage at power frequency. Test methods* (IEC 60156:1995).
27. Bonginkosi, A. T., Jacobus, A. J., Agha, F. N. (2021). Assessment of Transformer Cellulose Insulation Life Expectancy Based on Oil Furan Analysis (Case Study: South African Transformers). *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 6(6), 29–33. DOI: 10.25046/aj060605
28. El-Aal, R.A. abd, Helal, K., Hassan, A. M.M., Dessouky, S.S. (2019). Prediction of Transformers Conditions and Lifetime Using Furan Compounds Analysis. *IEEE ACCESS*, 7, p.102264–102273. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2931422
29. Clayden, J., Greeves, N., Warren, S. (2012). *Organic Chemistry*. Oxford University Press, 2nd edition.
30. Abu-Siada, A., Lai, S. P., Islam, S. M. A Novel Fuzzy-Logic. (2012). Approach for Furan Estimation in Transformer Oil. *IEEE Transactions on power delivery*, 27(2), 469–474. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2186986
31. Kostenko, M.A. (1973). *High voltage technique*. Moscow: Vysshaya Shkola.
32. Zhang, W., Li, Z., Ji, G., Guo, J., Yang, Y. (2015). Partial Discharges Behaviors of Internal Void in the Oil-Paper Insulation and its Effect on the Material. Proceedings of the 2015 International conference on Applied Science and Engineering Innovation (P. 1159–1163). Atlantis Press. DOI: 10.2991/asei-15.2015.229

33. Thomas, P, Shukla, A.K. (2001). Ageing studies on paper-oil to assess the condition of solid insulation used in power transformers. *In 2001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics, June 25-29* (P. 69–72). Eindhoven, the Netherlands. DOI: 10.1109/ICSD.2001.955515

Отримано 11.08.2023

UDC: 621.314.222.6:621.319.48:621.311:621.89:662.753

**Serhii Zaitsev<sup>1</sup>, Valentin Tikhenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, engineer of the Department of Nuclear Power Plants  
Odesa Polytechnic National University, (Odesa, Ukraine)

**E-mail:** [sjavidet@ukr.net](mailto:sjavidet@ukr.net) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>

<sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the Department of digital technologies in engineering  
Odesa Polytechnic National University, (Odesa, Ukraine)

**E-mail:** [vntikhenko@gmail.com](mailto:vntikhenko@gmail.com) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2804-2838>

## IMPROVEMENT OF METHODS OF DIAGNOSING A AUTOTRANSFORMER WITH AN EXTERNAL AND INTERNAL DEFECT IN THE HIGH-VOLTAGE BUSHING

*Diagnostics of oil-filled high-voltage electrical equipment allows to solve the tasks of monitoring the technical condition, finding the location and determining the causes of the malfunction, forecasting the technical condition of such equipment on the basis of appropriate diagnostic support. Typical internal defects in oil-filled power high-voltage electrical transformers (autotransformers) occur in such functional systems as insulating, electromagnetic, current-conducting. There is a need for continuous improvement of methods for determining and identifying internal defects in oil-filled power high-voltage transformers (autotransformers). The main purpose of the article is to improve the reliability of the diagnostic results of olive-filled power high-voltage electrical autotransformers with external and internal defects in their olive-filled high-voltage bushings with paper-oil electrical insulation, which are in contact with transformer oil inside such autotransformers, taking into account the results of their electrical tests and analyzes of samples of mineral transformer oil from electrical equipment. Research subjects: autotransformer type ATDCTN-200000/330/110/10; oil-filled high-voltage bushings of types GMTPA-45-330/1000U1 and GMTA-90-110/2000U1 with paper-oil electrical insulation; mineral transformer oils of the GK brand; diagnostic gases dissolved in these oils (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>), additive "Ionol", furan compounds (2-furyl alcohol, 2-furfural, 2-acetylfuran, 5-methyl-2-furfural), H<sub>2</sub>O. The following diagnostic methods are used for the investigated autotransformers and bushings: electrical measurements; "table method"; the method of "graphic images of defects"; "ETRA" method; Duval's Triangle method. Defined:*

*a) indicators of electrical characteristics for an oil-filled power autotransformer and oil-filled high-voltage bushing, and for mineral transformer oils, the indicators are breakdown voltage; the flash point of steam of transformer oils in an open crucible; acid number; water-soluble acids; tangent of the dielectric loss angle; density; the content of water, dissolved diagnostic gases, "Ionol" additives, furanic compounds; b) the effect of a pulsed electric current of high voltage on changes in the concentrations of such diagnostic gases and H<sub>2</sub>O pre-dissolved in mineral transformer oil in the presence of dissolved H<sub>2</sub>; c) types of defects in the autotransformer and its bushing. The obtained results will increase the reliability of the diagnostic results of an oil-filled power autotransformer with an external and internal defect in an oil-filled high-voltage bushing with paper-olive electrical insulation.*

**Keywords:** electrical equipment; transformer oil; electrical transformer; dissolved gases; additives "Ionol"; furan compounds; chromatography.

*Fig.: 7. Table: 3. References: 33.*

**Ярослав Кириленко<sup>1</sup>, Богдан Воробйов<sup>2</sup>, Сергій Сенченко<sup>3</sup>, Юрій Кутовий<sup>4</sup>,  
Лю Хань<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>асистент кафедри автоматизовані електромеханічні системи  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)  
E-mail: [Yaroslav.Kyrylenko@ieec.khpi.edu.ua](mailto:Yaroslav.Kyrylenko@ieec.khpi.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0331-617X>

<sup>2</sup>доктор філософії, завідувач кафедри автоматизовані електромеханічні системи  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)  
E-mail: [bohdan.vorobiov@khpi.edu.ua](mailto:bohdan.vorobiov@khpi.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0264-354X>

<sup>3</sup>аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)  
E-mail: [Serhii.Senchenko@ieec.khpi.edu.ua](mailto:Serhii.Senchenko@ieec.khpi.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0486-2471>

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, професор кафедри автоматизовані електромеханічні системи  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)  
E-mail: [Yaroslav.Likhno@ieec.khpi.edu.ua](mailto:Yaroslav.Likhno@ieec.khpi.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7082-7562>

<sup>5</sup>аспірант кафедри автоматизовані електромеханічні системи  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)  
E-mail: [seanhanzi@aliyun.com](mailto:seanhanzi@aliyun.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8182-0040>

## РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖІ

У статті представлено результати науково-методичного дослідження синтезу нейромережевого контролера та розрахунків умов виникнення фрикційних автоколивань в електроприводі рейкових транспортних засобів таких як: магістральні електровози, електропоїзди приміського сполучення, шахтні електровози, трамваї, поїзди метро та інші види транспорту. Проведені дослідження показали можливість побудови інтелектуальних систем управління, на базі прямо спрямованих нейронних мереж з сигмоїдальними активаційними функціями нейронів прихованого шару структури NN3-20-1. Такі системи, на відміну від класичних, мають хороші демпфуючі властивостями, що перешкоджає виникненню коливальних або автоколивальних динамічних режимів. Застосування нейронних мереж для управління електромеханічними системами не призводить до підвищення астатизму по впливу, що збурує, тому в даній системі не спостерігається статична помилка швидкості другої маси, яка становить 0,7%.

**Ключові слова:** Нейромережева система керування, генетичний алгоритм, асинхронний двигун, електропривод, перехідні процес, характеристика зціплення.

**Актуальність теми дослідження.** Залізничний транспорт використовують у всіх видах пасажирського та вантажного транспорту. До них відносяться магістральні електровози, електропоїзди приміського сполучення, шахтні електровози, трамваї, поїзди метро та інші види транспорту.

Пробуксовка коліс локомотивів і фрикційні авто-коливання погіршують ряд експлуатаційних та енергетичних показників залізничного транспорту. Тому розробка сучасних систем управління, які усувають ці проблеми, є актуальним завданням

**Аналіз останніх досліджень та публікацій:** Дослідження пускових режимів електроприводу (ЕП) магістрального електровоза ДСЗ виконані в [1] проведені при допущенні, що розрахункова схема механічної частини одномасова і не містить пружних зв'язків в кінематичній ланці. У водночас у роботах Штенвольфа Л.І. [2], Мінова Д.К. [3], Клепікова В.Б [4] розглянуті двомасові моделі ЕП, а, отже, при розробці моделей систем управління для асинхронного тягового ЕП необхідно враховувати маси електровоза і причіпних вагонів. У такій системі, при певних поєднанні параметрів ЕП [5], можливе виникнення коливального або автоколивального процесу, характер якого бути обумовлений як не лінійністю характеристики навантаження, так і наявністю пружного зв'язку.

**Метою статті** є дослідження двомасової електромеханічної системи магістрального електровоза ДСЗ, виявлення умов при яких в ній збуджується автоколивання, синтез нейрорегулятора, що забезпечує усунення автоколивальних режимів при будь-яких поєднаннях параметрів ЕП.

**Виклад основного матеріалу.** Для магістрального електровоза, внаслідок інерційності лінійно рухомих мас, можна вважати швидкість другої маси рівної швидкості ковзання, що дозволяє скористатися структурною схемою (рис. 1).

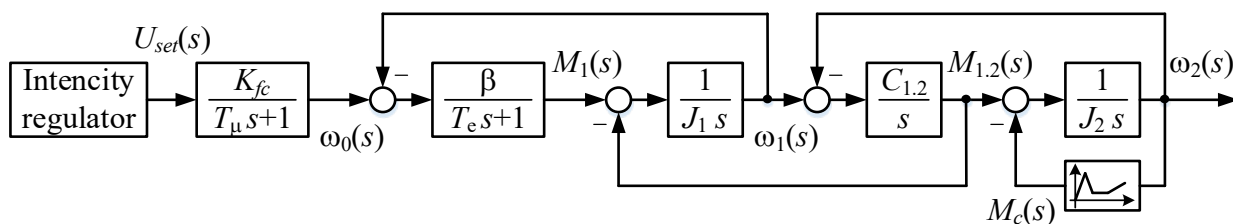


Рисунок 1 – Структурна схема двомасового ЕП електровоза ДСЗ

Структурна схема отримана за умови, що електромагнітна частина асинхронного двигуна і перетворювач частоти представлені аперіодичними ланками, характеристика зчеплення містить висхідну і падаючу ділянку, задатчик інтенсивності (ЗІ), що забезпечує лінійний закон зміни керуючого впливу. Імітаційна модель ЕП в MATLAB/Simulink (рис. 2).

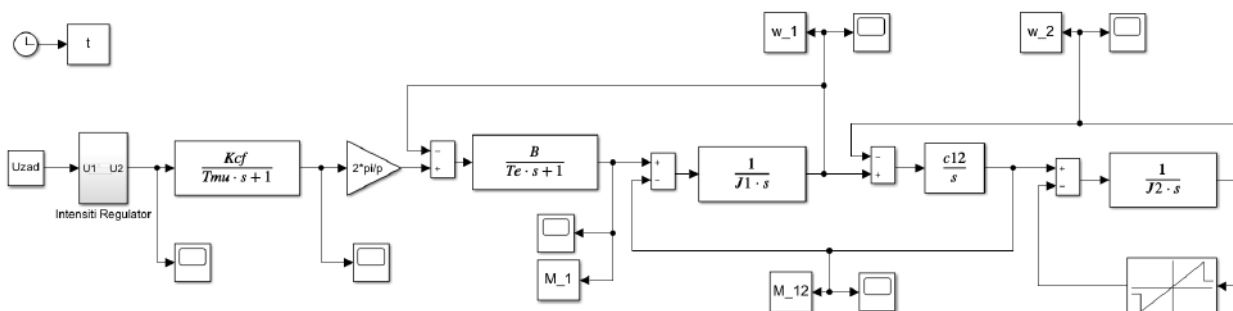


Рис.2. Імітаційна модель двомасового ЕП електровоза ДСЗ

Попередні розрахунки пускових режимів для типових умов завантаження електровоза ДСЗ показали, що в системі виникають автоколивання. Результат розрахунку (рис. 3).

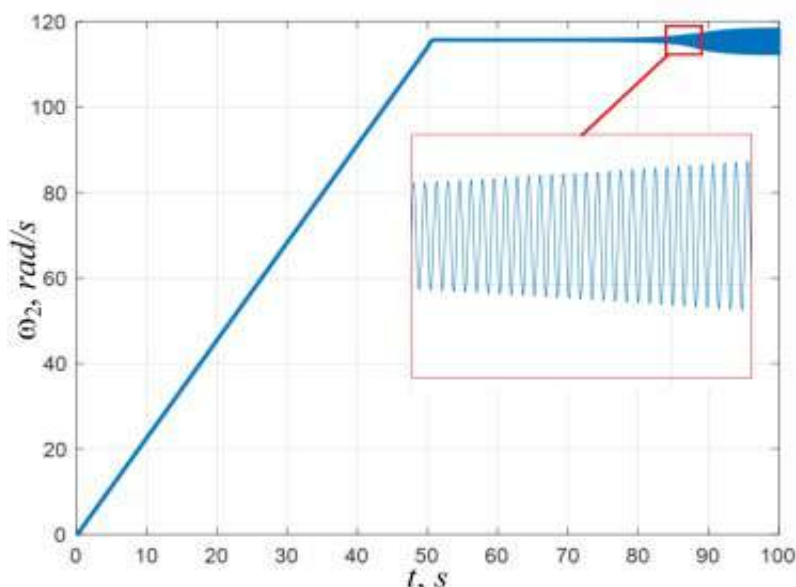


Рис.3. Перехідний процес двомасового електроприводу електровоза ДСЗ для типових умов завантаження

Відповідно до методики визначення умов виникнення фрикційних автоколивань, запропонованої Клепиковим В.Б. в [4], за фізичними параметрами системи  $T_e = 0.7$  с,  $J_1 = 150$  кг · м<sup>2</sup>,  $\beta = 7.61 \cdot 10^3$  і приведеним до швидкості двигуна параметрам  $J_2 = 150$  кг · м<sup>2</sup>,  $C_{1,2} = 10^7$  Н · м, а також  $\beta_c = -6200$  для падаючої ділянки характеристики зчеплення були розраховані узагальнені безрозмірні параметри  $\gamma$ ,  $b$ ,  $T_{M1}^*$ ,  $\nu$  значення яких дозволяють визначити характер динамічного процесу ЕП:  $\gamma = (J_1 + J_2)/J_1$  – коефіцієнт співвідношення мас;  $\nu = \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_{эм}^2}$ ; где  $\Omega_{12} = \frac{\sqrt{C_{12}(J_1 + J_2)}}{\sqrt{J_1 \cdot J_2}}$  – власна частота пружних недемпфованих коливань пружної механічної системи,  $\Omega_{em} = \frac{1}{\sqrt{T_e \cdot T_{M1}}}$  – частота електромеханічних коливань,  $T_{M1} = \frac{J_1}{\beta}$  – електромеханічна постійна часу;  $T_{M1}^* = \Omega_{1,2} \cdot T_{M1}$  – відносне значення електромеханічної постійної часу; безрозмірний параметр  $b = \frac{\beta_c}{\beta}$ .

Отримані значення параметрів  $\nu = 108,9134$  і  $\gamma = 6,4089$  для даного ЕП знаходяться в четвертому секторі простору узагальнених параметрів  $\nu$  і  $\gamma$  [4], отже, це дозволяє визначити межі розрахункових діапазонів відповідно до системи рівнянь, наведеної нижче:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega_{*1}^2 = \frac{\nu+1}{2 \cdot \nu} + \sqrt{\left(\frac{\nu+1}{2 \cdot \nu}\right)^2 - \frac{1}{\gamma \cdot \nu}} \\ \Omega_{*2}^2 = \frac{\nu+1}{2 \cdot \nu} - \sqrt{\left(\frac{\nu+1}{2 \cdot \nu}\right)^2 - \frac{1}{\gamma \cdot \nu}} \\ \Omega_{*3}^2 = \frac{(\gamma-1)}{\gamma} \\ \Omega_{*4}^2 = 1; \\ \Omega_{*5}^2 = 1 - \frac{1}{\gamma} + \frac{1}{\nu} \end{array} \right. \quad (1)$$

За співвідношеннями (2), (3) здійснено розрахунок параметрів  $b$ ,  $T_{M1}^*$  у діапазоні  $[\Omega_1 - \Omega_4]$ , оскільки ці межі є обмежуючим для сектора №4.

$$b = \frac{\gamma \cdot \nu \cdot \Omega_*^4 - \gamma \cdot (\nu+1) \cdot \Omega_*^2 + 1}{\frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \Omega_*^2 - 1}; \quad (2)$$

$$T_{M1}^* = \sqrt{\frac{[\Omega_*^2 - (1 - 1/\gamma + 1/\nu)] \nu b}{(\gamma-1)(1 - \Omega_*^2)}}; \quad (3)$$

Показані межі стійкості системи у площині параметрів  $b$ ,  $T_{M1}^*$  для типового завантаження електровоза (рис. 4).

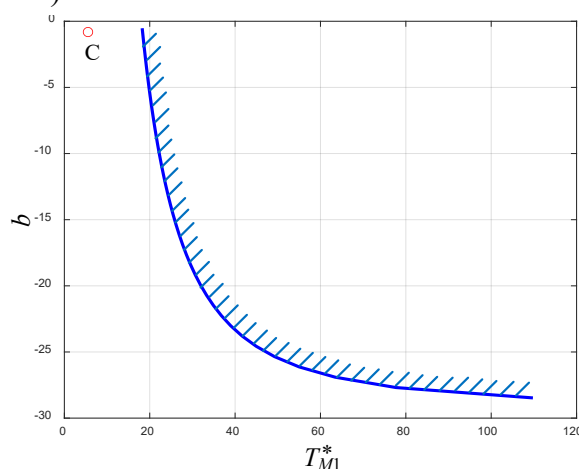


Рис.4. Кордони стійкості системи при завантаженні 5 вагонів



Робоча точка  $C$ , координати якої дорівнюють  $b = 0,81139$ ,  $T_{M1}^* = 5,534$ , знаходиться у площині коливального перехідного процесу. Частота коливань при цьому становить 33 Гц, а амплітуда 5% від значення швидкості другої маси. Для усунення коливань, що виникають у системі при будь-яких поєднаннях параметрів, нижче наведено синтез системи з нейрорегулятором та зворотним зв'язком за швидкістю другої маси.

Як показали раніше проведені дослідження [6], для реалізації замкнутих систем управління з нейронною мережею для управління електродвигуном постійного або змінного струму цілком достатньо одного зворотного зв'язку за швидкістю, з дискретизацією за часом і однією ланкою чистого запізнення. Таким чином, нейронна мережа матиме 3 вхідних нейрона, на які подається вектор вхідних сигналів у вигляді сигналу завдання, поточного та попереднього значення швидкості другої маси ЕП. Мінімально-достатня кількість нейронів прихованого шару таких систем дорівнює 10 – 20, а вихідних нейронів у разі потрібно один. На цьому вихідному нейроні і формуватиметься керуючий вплив для частотного перетворювача. Нейронні мережі такого типу позначаються NN3–20–1 (рис. 5).

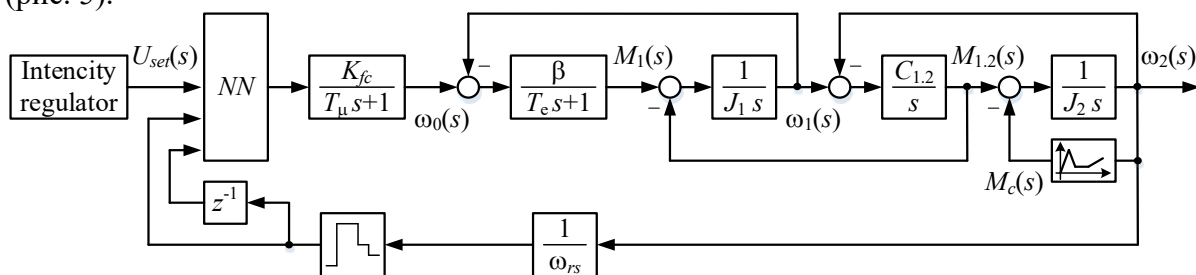


Рис.5. Нейромережева система керування електровозом ДСЗ

Для глобальної оптимізації параметрів нейронних мереж необхідно використовувати метод генетичного алгоритму [6]. Розглядаючи нейронну мережу як єдиний набір параметрів, генетичний алгоритм здатний здійснювати її оптимальну настройку при розмірності пошукового простору достатньою для вирішення більшості практичних завдань. При цьому спектр додатків, що розглядаються, набагато перевершує можливості алгоритму зворотного поширення помилки. Поєднання цих двох обчислювальних технологій, штучні нейронні мережі та генетичні алгоритми, розглядається сьогодні як потенційний джерело майбутнього прогресу у сфері еволюційного моделювання. Крім властивої йому глобальності, генетичний алгоритм, як тренувальна процедура, має ту перевагу в порівнянні з алгоритмом зворотного поширення помилки, що він здатний тренувати нейронну мережу відразу по вихідним характеристикам об'єкта, а не вихідним сигналам нейронної мережі.

Відповідно, вихідний сигнал нейронної мережі описується наступним рівнянням:

$$NN = W_2 \cdot \text{tansig}(W_1 \cdot U + B_1) + B_2 \tag{4}$$

де NN – вихід нейронної мережі;  $\text{tansig}$  — функція активації;  $W_1$  – матриці вагових коефіцієнтів нейронів прихованого шару нейронної мережі;  $W_2$  – матриці вагових коефіцієнтів нейронів вихідного шару нейронної мережі;  $B_1$  – це матриці зсувів нейронів прихованого шару нейронної мережі;  $B_2$  – матриці зсувів нейронів вихідного шару нейронної мережі;  $U = \begin{bmatrix} U_{set} \\ \omega_{2,i} \\ \omega_{2,i-1} \end{bmatrix}$  – це матриця вхідних сигналів нейронної мережі, компонентами якої є:  $U_{set}$  це сигнал заданої швидкості;  $\omega_{2,i}$  є поточним значенням швидкості,

та  $\omega_{2,i-1}$  це попереднє значення швидкості двигуна, отримане за допомогою зворотного зв'язку за швидкістю. Параметри отриманого нейрорегулятора (див. табл. 1).

Таблиця 1 - матриці зсувів нейронів прихованого та вихідного шарів нейронної мережі

№	Прихований шар, В1	Вихідний шар, В2	№	Прихований шар, W1			Вихідний шар, W2
1	-0.576	-6.006	1	0.105	-0.256	0.0262	-1.085
2	-0.497		2	0.987	0.831	-0.527	-5.119
3	0.7007		3	0.130	0.369	-0.053	-1.537
4	0.8262		4	0.883	-0.736	0.571	-4.400
5	-0.776		5	-0.459	-0.514	0.083	-8.569
6	-0.268		6	-0.959	0.221	-0.441	-9.071
7	-0.998		7	0.729	-0.285	0.295	5.879
8	0.3503		8	-0.969	0.627	0.908	-8.462
9	-0.7276		9	0.925	0.825	-0.167	4.005
10	0.7072		10	0.627	0.468	-0.726	7.402
11	0.0523		11	0.490	0.142	0.7826	5.499
12	0.0333		12	0.576	-0.763	-0.428	-0.321
13	0.6916		13	-0.928	-0.546	-0.515	-5.194
14	-0.301		14	-0.892	0.809	0.0884	-9.991
15	0.8836		15	-0.778	-0.903	0.0604	-2.564
16	0.7886		16	0.241	0.514	0.513	3.094
17	-0.734		17	0.033	0.240	-0.577	0.094
18	0.3117		18	-0.424	-0.693	-0.579	-4.617
19	0.5047		19	-0.457	0.043	0.0551	3.476
20	0.9868		20	0.978	-0.098	-0.656	7.958

Представлений перехідний процес швидкості другої маси тягового асинхронного електроприводу електровоза ДСЗ з нейромережевою системою управління. Оскільки, при навчанні нейронної мережі не враховувалися необхідні обмеження координат ЕП, зумовлені, наприклад, електронною та механічною міцністю приводу та ін, тому був застосований задатчик інтенсивності (рис. 6).

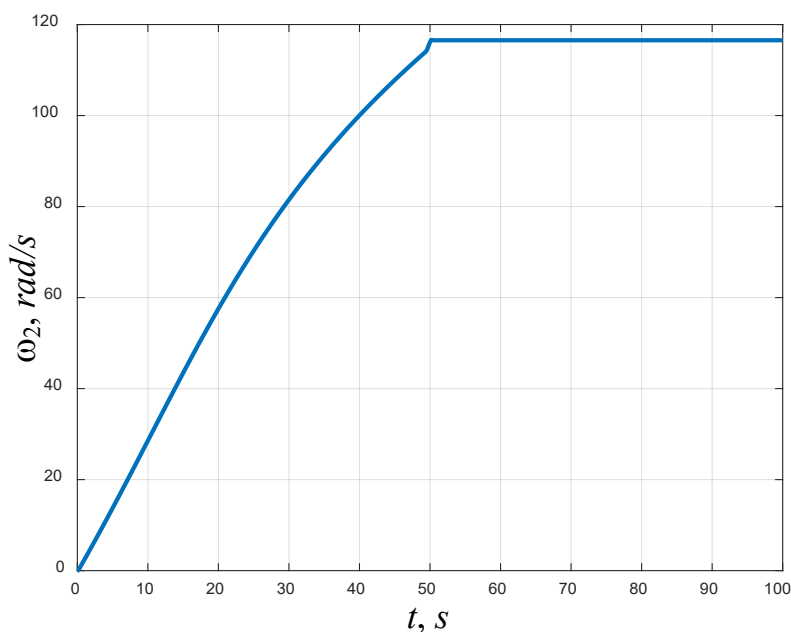


Рис.6. Перехідний процес двомасового електроприводу електровоза ДСЗ з нейронною мережею та задатчиком інтенсивності

**Висновки.** Проведені дослідження показали можливість побудови інтелектуальних систем управління, на базі прямо спрямованих нейронних мереж з сигмоїдальними активаційними функціями нейронів прихованого шару структури NN3-20-1. Такі системи, на відміну від класичних, мають хороші демпфуючими властивостями, що перешкоджає виникненню коливальних або автоколивальних динамічних режимів. Застосування нейронних мереж для управління електромеханічними системами не призводить до підвищення астатизму по впливу, що збурює, тому в даній системі спостерігається статична помилка швидкості другої маси, яка становить 0,7%.

### Список використаних джерел

- [1] Дослідження пускових режимів частотно-регульованого електроприводу магістрального електровозу ДС3 / Ю. М. Кутовий, Т. Ю. Кунченко, І. В. Обруч, Я. О. Кириленко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика. – 2019. – № 16. – С. 95-98.
- [2] Штейнвольф, Л. І. Якісна теорія фрикційних автоколивальних у механічних передачах / Л. І. Штейнвольф // Теорія механізмів і машин. Перегляд. – Харків : ХДУ, 1966. – Вип. 1. – С. 76-88.
- [3] Минов, Д. К. Підвищення тягових властивостей електровозів та тепловозів з електричною передачею / Д. К. Мидов. – Москва : Транспорт, 1965. – 257 с.
- [4] Клепиков, В. Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением : монография / В. Б. Клепиков. – Харьков : Підручник НТУ "ХПІ", 2014. – 407 с.
- [5] Клепиков, В. Б. Про фрикційні автоколивання в електроприводах / В. Б. Клепиков // Електрика. – 1986. – № 4. – С. 59-62.
- [6] Обруч, І. В. Замкнуті системи управління електроприводом із двигуном постійного струму послідовного збудження на базі нейронних мереж / І. В. Обруч, Ю. М. Кутовой // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Проблеми автоматизованого ЕП: Теорія та практика». – 2013. – Спец. Вип. №36. – С. 485-487.

### References

- [1] Kutovy, Yu. M., Kunchenko, T. Yu., Obruch, I. V., Kirilenko, Ya. O. (2019). Investigation of the starting modes of the frequency-regulated electric drive of the mainline electric locomotive DS3. *Bulletin of the National Technical of the University "KhPI". Ser. : Problems of automated electric drive Theory and practice*, 16, 95-98.
- [2] Steinwolf, L. I. (1966). A clear theory of frictional vibrations in mechanical transmissions. *Theory of mechanisms and machines*. (Vol. 1). P. 76-88.
- [3] Minov, D. K. (1965). Improvement of traction power of electric locomotives and diesel locomotives with electric transmission. Moscow: Transport.
- [4] Klepikov, V. B. (2014). Dynamics of electromechanical systems with nonlinear thorns. Kharkiv: Pidruchnik NTU "KhPI".
- [5] Klepikov, V. B. (1986). About frictional auto-motion in electric drives. *Electrics*, 4, 59-62.
- [6] Obruch, I. V., Kutovoy, Yu. M. (2013). Closed-loop control systems for an electric drive with a motor of a constant flow of sequential activation based on neural measurements. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Problems of automated EP: Theory and practice"*, 36, 485 - 487.

Отримано 14.09.2023

**Yaroslav Kyrylenko<sup>1</sup>, Bohdan Vorobiov<sup>2</sup>, Sergiy Senchenko<sup>3</sup>, Yurii Kutovoi<sup>4</sup>, Khan Liu<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>assistant of the department Automated electromechanical systems

National technical university "Kharkiv polytechnic institute" (Харків, Україна)

E-mail: [Yaroslav.Kyrylenko@ieec.khpi.edu.ua](mailto:Yaroslav.Kyrylenko@ieec.khpi.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0331-617X>

<sup>2</sup> Ph. D, head of the department Automated electromechanical systems

National technical university "Kharkiv polytechnic institute" (Харків, Україна)

E-mail: [bohdan.vorobiov@khpi.edu.ua](mailto:bohdan.vorobiov@khpi.edu.ua). ORCID: : <https://orcid.org/0000-0002-0264-354X>

<sup>3</sup>postgraduate student of the department Automated electromechanical systems

National technical university "Kharkiv polytechnic institute"» (Харків, Україна)

E-mail: [Serhii.Senchenko@ieec.khpi.edu.ua](mailto:Serhii.Senchenko@ieec.khpi.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0486-2471>

<sup>4</sup>Ph. D, Professor of the department Automated electromechanical systems

National technical university "Kharkiv polytechnic institute" (Харків, Україна)

E-mail: [Yaroslav.Likhno@ieec.khpi.edu.ua](mailto:Yaroslav.Likhno@ieec.khpi.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7082-7562>

<sup>5</sup>postgraduate student of the department Automated electromechanical systems

National technical university "Kharkiv polytechnic institute" (Харків, Україна)

E-mail: [seanhanzi@aliyun.com](mailto:seanhanzi@aliyun.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8182-0040>

## DESIGN OF THE CONTROL SYSTEM OF TRACTIONAL ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE BASED ON NEUROCONTROLLER

*The article examines the synthesis of a neuro-boundary controller and the development of minds in the culprit of frictional auto-switches in the electric drive of railway transport vehicles such as mainline electric locomotives, municipal electric trains, mine electric locomotives, trams, metro trains and other types of transport. Slippage of locomotive wheels and frictional self-oscillations worsen a number of operational and energy indicators of railway transport. Therefore, the development of modern management systems that eliminate these problems is an urgent task. The purpose of the article is to study the two-mass electromechanical system of the DS3 mainline electric locomotive, to identify the conditions under which self-oscillation is excited in it, and to synthesize a neuroregulator that ensures the elimination of self-oscillating modes for any combination of electric drive parameters. The investigations showed the feasibility of intelligent control systems based on direct neural measurements of the sigmoidal activation functions of the neurons of the attached ball structure NN3-20-1. Such systems, in contrast to the classical ones, have good damping power, which overcomes the disadvantage of columbing or autocolumn dynamic modes. Transient processes of the speed of the second mass of the traction asynchronous electric drive of the DS3 electric locomotive with a neural network control system are presented. Since, during the training of the neural network, the necessary restrictions of the coordinates of the electric drive, caused, for example, by the electronic and mechanical strength of the drive, were not taken into account. The tightening of neural circuits for controlling electromechanical systems does not lead to an increase in astatism in the flow that boils, so in this system a static reduction in the liquidity of another mass, which becomes 0.7%, is avoided.*

**Keywords:** Neuro-fusing system, genetic algorithm, asynchronous motor, electric drive, transition process, clutch characteristic.

## РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-205-214

УДК 502.35:004.4

*Лідія Давибіда*

кандидат геологічних наук, доцент кафедри геотехногенної безпеки та геоінформатики,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (Івано-Франківськ, Україна)  
E-mail: [lidia.davybida@nung.edu.ua](mailto:lidia.davybida@nung.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9796-7124> ResearcherID: F-3567-2017

### АНАЛІЗ ЗВ'ЯЗКУ МІНЛИВОСТІ РІВНІВ ПІДЗЕМНИХ ВОД ТА ІНДЕКСІВ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПОСУХ ЗАСОБАМИ ПЛАТФОРМИ GOOGLE EARTH ENGINE

*Дані спостережень за змінами положення рівнів ґрунтових вод у свердловинах Державної мережі гідрогеологічного моніторингу України були використані для проведення аналізу їх взаємозв'язку із окремими спектральними індексами (індикаторами посухи), встановленими за даними дистанційного зондування. Отримані результати дозволили встановити, що індекси посухи доцільно використовувати для оперативної оцінки впливу посухи на ресурси ґрунтових вод. Вивчення режиму рівнів для групи свердловин із різними гідрогеологічними властивостями може допомогти зрозуміти вплив метеорологічної та гідрологічної посухи на водоносні горизонти підземних вод у межах досліджуваної території Карпатського регіону.*

*Ключові слова:* моніторинг; свердловини; Landsat; ГИС; геодані; часові ряди; кореляція.  
Табл.: 2. Рис.: 5. Бібл.: 17.

#### **Актуальність теми дослідження.**

Система підземних вод є невід'ємною частиною гідросфери Землі, і процеси, що відбуваються в ній, так чи інакше пов'язані з глобальним кругообігом води через інфільтрацію, випаровування, транспірацію тощо. Підземні води є критично важливим природним ресурсом, який вразливий до впливу кліматичних змін та антропогенних чинників. Крім того, підземні води є одним із найбільш динамічних компонентів геологічного середовища, діяльність якого впливає на формування, розвиток та активізацію зсувів, карсту, селевих потоків, суфозії тощо [1]. Тому необхідний систематичний і безперервний моніторинг гідрогеологічного режиму, оскільки отримана інформація про зміни його параметрів є необхідною базою для ефективного управління водними ресурсами, прогнозування стану водоносних горизонтів і поверхневих вод, а також ризику розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів [2]. Стандарти моніторингу та управління водними ресурсами викладені в Рамковій водній директиві (ВРД) Європейського Союзу (Директива 2000/60 / ЄС) [3]. Нині мережа Державної системи гідрогеологічного моніторингу в Україні перебуває у край незадовільному стані, що зумовлено недостатнім фінансуванням, відсутністю системної оптимізації та оновлення, знищенням спостережних свердловин і відсутністю доступу до них на тимчасово окупованих територіях і територіях, де ведуться активні бойові дії. Ще у довоєнний період (станом на 2020 рік у порівнянні з 1990 роком) кількість гідрогеологічних моніторингових свердловин зменшилася з понад 7000 до 846. Негативним наслідком є втрата безперервних часових рядів рівня ґрунтових вод, спостереження за якими для деяких пунктів почалися в 1940-х роках, і які можуть бути використані для складання довгострокових гідрогеологічних і гідрологічних прогнозів, а також прогнозів активізації екзогенних геологічних процесів (зсувів, карсту, підтоплення та ін.). Зараз через повномасштабну російську військову агресію ситуація із знищенням мережі спостережних свердловин стала ще більш загрозливою. Очевидно, що через бойові дії на території України та масштабну економічну кризу ситуація з функціонуванням Державної мережі гідрогеологічного моніторингу не покращиться найближчим часом. Тому розробка методів відновлення розривів у рядах спостережуваних показників режиму підземних вод є актуальним завданням.

**Постановка проблеми.** При вивченні і моделюванні гідрогеологічного режиму важливо враховувати варіації сезонних коливань рівнів підземних вод, особливо для неглибоких водоносних горизонтів, у різних регіонах України [4]. Тому додаткові дані, такі як результати спостережень за метеорологічними параметрами, за рівнями поверхневих вод, а також дані супутникового моніторингу можуть бути корисними як при відновленні пропусків у рядах рівнів підземних вод, обумовлених відсутністю вимірювань, так і для проектування оновленої мережі гідрогеологічного моніторингу. Ефективними інструментами інтеграції таких гетерогенних просторово-часових даних є сучасні геоінформаційні системи (ГІС) і технології.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання розробки заходів для відновлення Державної спостережної мережі гідрогеологічного моніторингу і її поступової адаптації до європейських норм і вимог, зокрема, формування єдиної бази даних із залученням ГІС-технологій, розглянуто у роботі [5]. Згідно [6] особливу увагу слід приділяти транскордонним територіям відповідно до вимог Рамкової Водної директиви ЄС [3]. Численні наукові праці [7-10] розглядають питання відображення просторово-часових закономірностей мінливості режиму підземних вод і побудови їх цифрових моделей засобами ГІС.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** В останні роки особливу увагу приділяють використанню даних дистанційного зондування Землі для моніторингу підземних вод, дослідженню зв'язків між даними супутникових спостережень і рівнями підземних вод, розробляють методи аналізу та моделювання для прогнозування змін гідрогеологічного режиму [11]. Недостатньо дослідженим залишається питання оптимізації гідрогеологічного моніторингу через використання індикаторів (індексів) посухи.

**Метою статті** є оцінка зв'язку між основними спектральними індексами посухи та мінливістю рівня ґрунтових вод за допомогою хмарної геоінформаційної платформи з відкритим кодом Google Earth Engine для Карпатського регіону, територія якого завжди була однією з найменш вивчених в Україні у гідрогеологічному плані через незначне охоплення мережею спостережних свердловин (рис. 1).

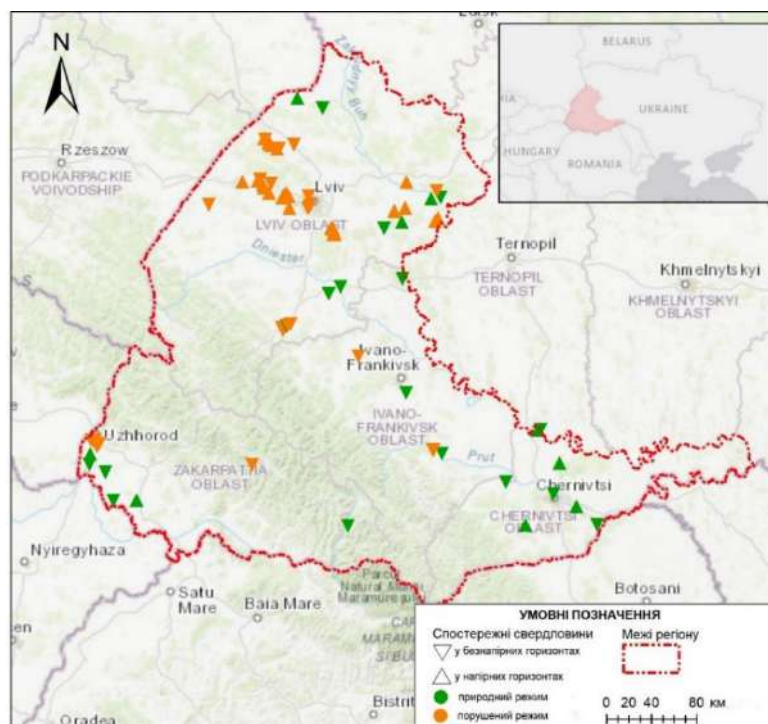


Рис.1. Територія досліджень

**Виклад основного матеріалу.** У межах Карпатського регіону, який включає Закарпатську, Івано-Франківську, Львівську та Чернівецьку області, розташовано 42 % родовищ підземних мінеральних вод України. Основним джерелом побутового водопостачання для населення у межах регіону є підземні води. Умови виникнення і запаси підземних вод в регіоні різні в залежності від конкретного типу гідрогеологічного басейну, до якого відноситься дана територія. Виділяють такі басейни, як Карпатський, Передкарпатський (Зовнішні Східні Карпати) та Волино-Подільський [12]. Також тут часто спостерігаються такі екологічно несприятливі явища, як повені, зсуви, ерозія, забруднення поверхневих і підземних вод, вирубка лісів тощо [1, 2].

Узагальнений алгоритм дослідження і опрацювання даних спостережень для розглянутого регіону наведено на рисунку 2.

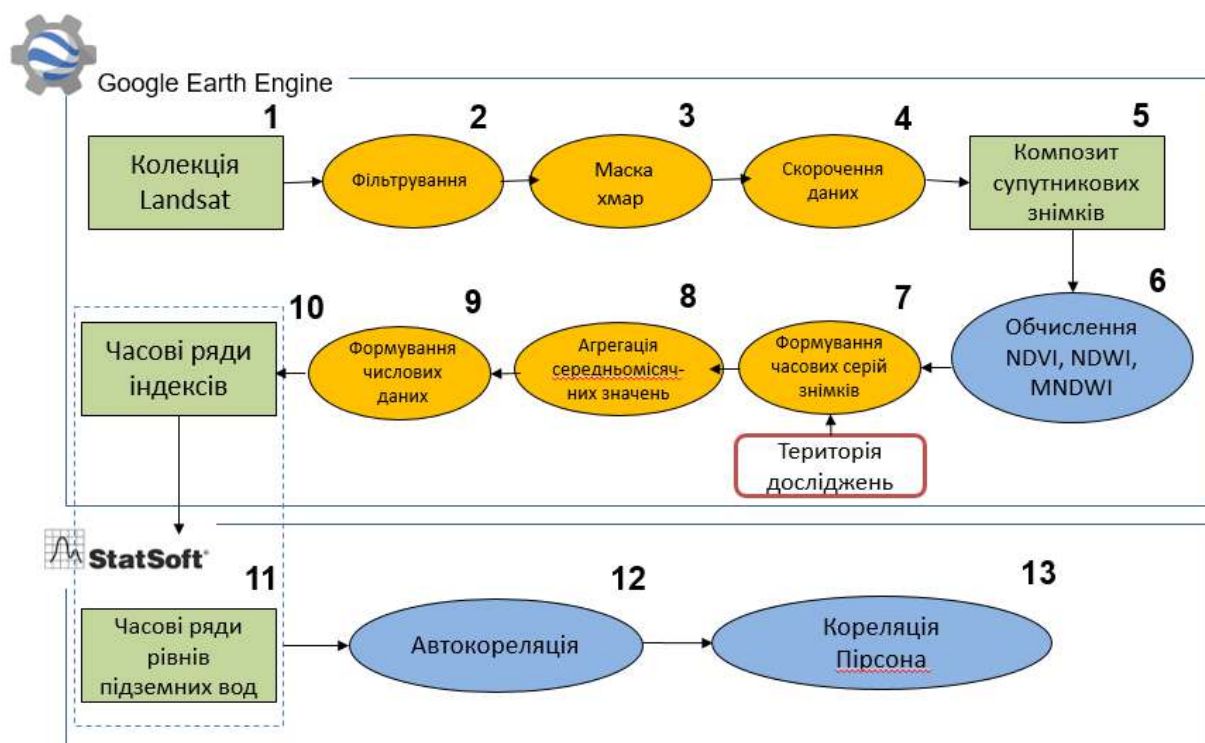


Рис.2. Методологія досліджень

Щомісячні дані про глибину підземних вод 6 моніторингових свердловин неглибоких безнапірних водоносних горизонтів надані Державною службою геології та надр України. Їх основні характеристики наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Основна інформація про свердловини мережі моніторингу підземних вод

Номер свердловини	Довгота	Широта	Глибина, м	Стратиграфія	Період спостережень
w1 (249678807)	23°20'15"	49°49'27"	17,2	Q	1979-1981, 1988-2000, 2007-2010, 2017-2019
w2 (249430054)	24°57'29"	48°32'58"	25,0	AQ <sub>3</sub>	1970-1996, 2001-2012, 2017-2019
w3 (249389110)	25°01'48"	48°31'48"	15,0	AQ <sub>3</sub>	1993-2013, 2017-2019
w4 (244250144)	22°24'48"	48°16'51"	33,0	AQ <sub>1-4</sub>	1973-1992, 1996-2013, 2016-2019
w5 (244010006)	22°13'12"	48°28'18"	51,0	AQ <sub>1-4</sub>	1966-1999, 2003-2004, 2009-2012, 2016-2019
w6 (249040001)	25°54'59"	48°18'57"	13,0	Q	1954-2009, 2015-2019

Мультиспектральні зображення Landsat 8 OLI/TIRS Collection 2, використані в цьому дослідженні, доступні для безкоштовного завантаження за період з квітня 2013 року по теперішній час на сайті Геологічної служби США (USGS).

Існує багато спектральних індексів, корисних для моніторингу та оцінки різних типів посухи (метеорологічної, гідрологічної, сільськогосподарської та соціально-економічної) [13-15]. У цьому дослідженні було використано такі стандартні індекси посухи, отримані на основі даних дистанційного/супутникового зондування, як вегетаційний індекс (*NDVI*), водний індекс (*NDWI*) і модифікований водний індекс (*MNDWI*) [16, 17].

Логіка використання *NDVI* для моніторингу посухи полягає в тому, що вологість ґрунту відіграє важливу роль у зростанні та здоров'ї рослинності, і як наслідок, густина рослинності реагує на забезпеченість водними ресурсами (Lavender, 2016). *NDVI* розраховується на основі співвідношення:

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED),$$

де *NIR* – відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні спектра, *RED* – відбиття у червоному діапазоні спектра.

*NDWI* часто використовується для оцінки вмісту вологи та виділення відкритих водойм на супутникових знімках. *NDWI* розраховується за такою формулою:

$$NDWI = (GREEN - NIR)/(GREEN + NIR),$$

де *GREEN* – відбиття у зеленому діапазоні спектра.

*MNDWI* є варіантом індексу *NDWI*, який використовується для виявлення водних об'єктів на супутникових або аерозображеннях забудованих територій. Для розрахунку цього індексу використовується співвідношення:

$$MNDWI = (GREEN - SWIR1)/(GREEN + SWIR1),$$

де *SWIR1* – відбиття у короткохвильовому інфрачервоному діапазоні спектра.

Коефіцієнт кореляції Пірсона (*r*), який було використано для оцінки кореляції індексів, отриманих за допомогою даних дистанційного зондування, та гідрогеологічних спостережень, обчислено за відомою формулою:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

де  $x_i$  – дані щодо глибини залягання рівня ґрунтових вод та  $y_i$  – індекс посухи для *i*-го місяця часового ряду з *n* спостережень.

Формування вхідної бази даних, розрахунок значень індексів на основі мультиспектральних супутникових зображень, створення картографічних моделей досліджуваної території, розрахунок середніх значень індексів та побудова часових рядів для місць розташування спостережних свердловин з  $R = 2$  км, а також подальший аналіз проводився за допомогою платформи Google Earth Engine (GEE) (рис. 3).

Для досліджуваної території характерна значна просторова та часова мінливість розглянутих індексів посухи в цілому та окремих локальних зон живлення безпосередньо перших від поверхні водоносних горизонтів підземних вод.



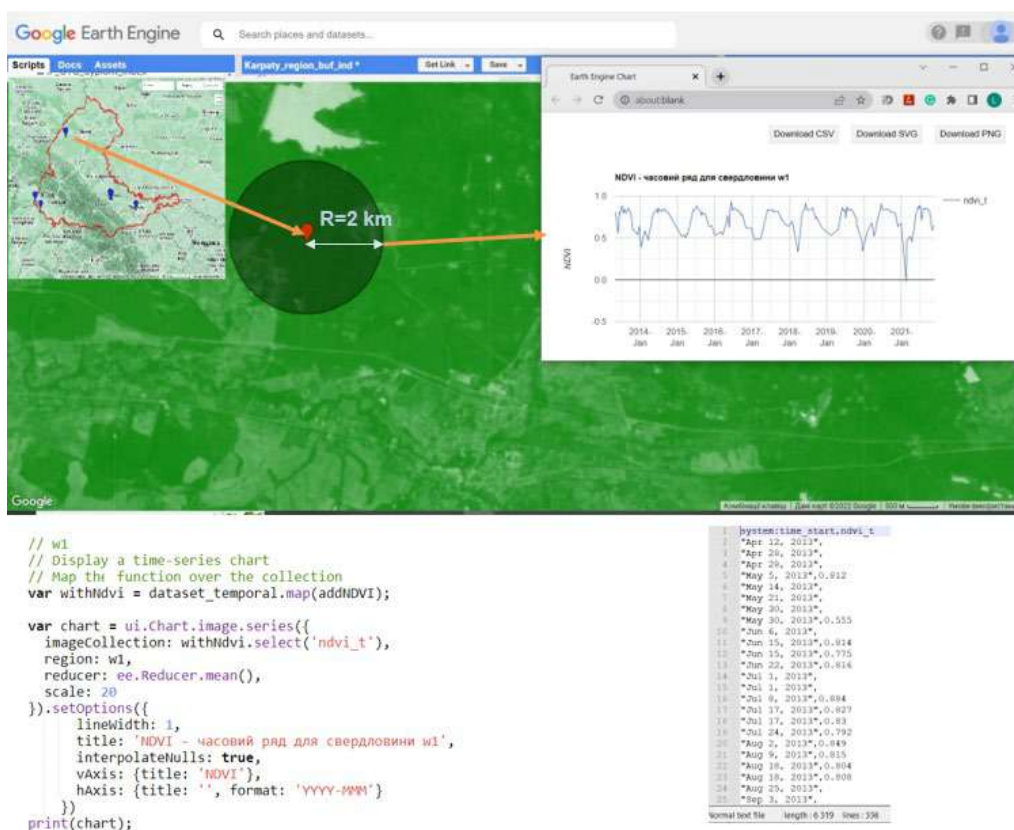


Рис.3. Приклад генерації часового ряду індексу NDVI для місцевості в околицях однієї із спостережних свердловин у середовищі GEE

Часова мінливість NDVI, NDWI, MNDWI характеризується чіткою 12-місячною періодичністю (рис. 4), яку можна порівняти із сезонністю рівнів для непорушеного (природного) режиму підземних вод (рис. 5).

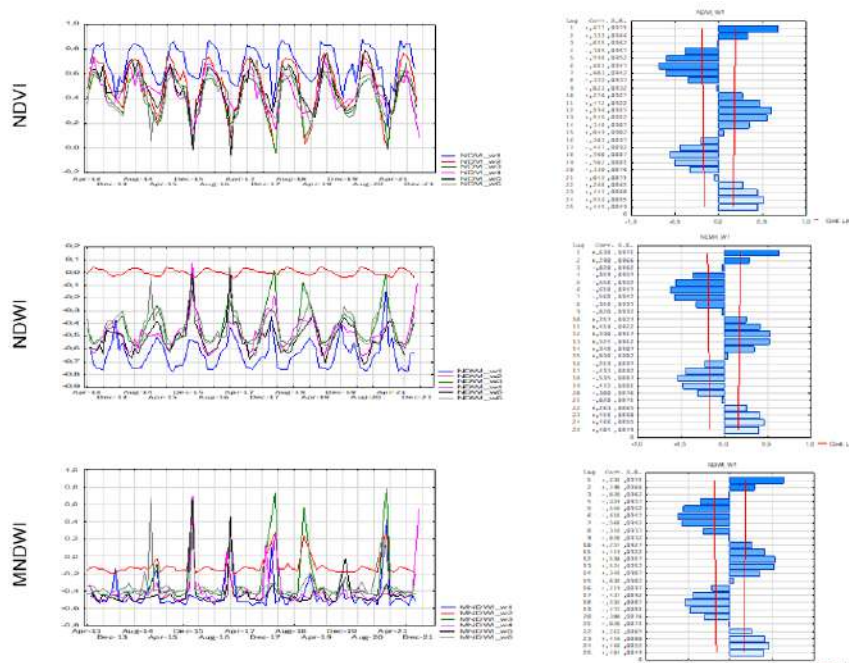


Рис.4. Графіки середньомісячних значень спектральних індексів та приклади графіків їх типових автокореляційних функцій

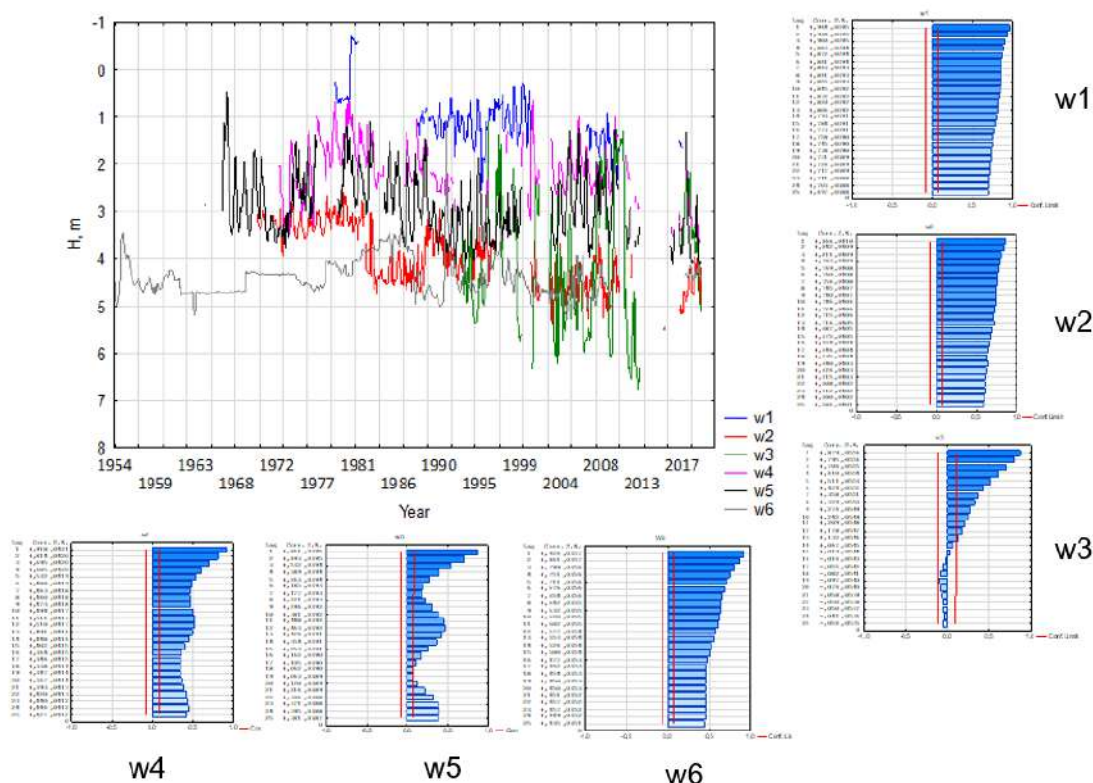


Рис.5. Графіки середньомісячних значень глибини залягання рівня підземних вод у спостережних свердловинах і графіки відповідних автокореляційних функцій

Кореляційний аналіз середньомісячних рівнів у гідрогеологічних свердловинах та осереднених значень індексів посухи для ділянок розміщення свердловин, а також оцінка значущості отриманих коефіцієнтів кореляції виконані шляхом автоматизованого розрахунку в програмному середовищі STATISTICA. Статистична значущість коефіцієнтів кореляції встановлена за допомогою відомого *t*-критерію Стьюдента на рівні значимості  $\alpha=0,05$ :

$$t = \frac{r}{\sqrt{1 - r^2}} \sqrt{n - 2}$$

Розраховане за цією формулою значення порівнюється з критичним значенням *t*-критерію Стьюдента з урахуванням заданого рівня значущості  $\alpha$  та числа ступенів свободи ( $n - 2$ ). Якщо  $t_{факт.} > t_{табл.}$ , то отримане значення коефіцієнта кореляції вважається значущим і робиться висновок про тісний статистичний взаємозв'язок величин.

Результати кореляційного аналізу наведені у таблиці 2 (статистично значущі коефіцієнти кореляції виділені жирним шрифтом).

Таблиця 2 – Коефіцієнти кореляції для середньомісячних рівнів у спостережних свердловинах та осереднених значень індексів посухи для ділянок розміщення свердловин

Свердловини	NDVI	NDWI	MNDWI
w1	<b>-0,975</b>	<b>0,956</b>	<b>0,301</b>
w2	-0,277	-0,368	0,133
w3	0,187	-0,199	-0,247
w4	0,001	-0,102	<b>0,318</b>
w5	-0,223	0,111	<b>0,595</b>
w6	<b>-0,477</b>	<b>0,489</b>	<b>0,438</b>

Відсутність статистично значущого зв'язку між мінливістю показників і рівнями ґрунтових вод (як, наприклад у розглянутих свердловинах  $w_2$  і  $w_3$ ) може бути індикатором порушення гідрогеологічного режиму внаслідок впливу штучних факторів.

Слід також враховувати, що різна глибина залягання ґрунтових вод, характер геоморфологічних і гідрогеологічних умов можуть впливати на реакцію режиму підземних вод на вплив кліматичних факторів. Для подальшого дослідження природи зв'язку варто збільшити вибірку досліджуваних свердловин і доповнити дані результатами попередніх програм дистанційного моніторингу (Landsat 7, Landsat 5).

**Висновки.** У роботі вперше на основі сукупності даних дистанційного зондування та спостережень за підземними водами встановлено зв'язок між спектральними індексами та рівнями підземних вод у гідрогеологічних моніторингових свердловинах досліджуваної території Карпатського регіону. Отримані результати дозволяють припустити, що супутникові знімки можуть бути використані для спостереження за впливом посухи на ресурси підземних вод перших від земної поверхні водоносних горизонтів (насамперед для вивчення сезонної мінливості водності) у межах території дослідження. Для подальшого вивчення та прогнозування довгострокових закономірностей необхідно враховувати певні обмеження вхідних даних. Так, часові ряди даних Landsat зазвичай також мають прогалини через номінальний 16-денний цикл часової розрізненості, хмарність та інші фактори. Необхідно запропонувати спеціальні методи реконструкції для отримання безперервних часових рядів даних Landsat. Спеціальний алгоритм для уніфікації (калібрування, зіставлення каналів, виправлення помилок сканування) даних Landsat має бути попередньо реалізований, наприклад, за допомогою бібліотек Python та QGIS для об'єднання даних спостережень в єдиний часовий ряд. Необхідно також враховувати тип поверхні, ґрунтовий покрив, землекористування та їх зміни протягом періоду спостережень, оскільки ці умови впливають як на формування режиму ґрунтових вод, так і на значення спектральних індексів.

### Список використаних джерел

1. Hydrogeological conditions and natural factors forming the regime of groundwater levels in the Ivano-Frankivsk region / L. Davybid, D. Kasiyanchuk, L. Shtohryn, E. Kuzmenko, M. Tymkiv // Journal of Ecological Engineering. – 2018. – №19(6). – С. 34-44. DOI:10.12911/22998993/91883
2. Davybid, L. Spatial analysis of the relation between the distribution of dangerous exogenous geological processes and landscape hydrogeological complexes in Transcarpathian [Electronic resource] / L. Davybid, D. Kasiyanchuk, L. Shtogrin // [International Conference of Young Professionals «Geo-Terrace-2020»](https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.20205755?crawler=true). – 2020. – P. 1-5. — Access mode : <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.20205755?crawler=true>
3. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy [official website] [Electronic resource] – Access mode : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32000L0060>
4. Рубан, С. А. Гідрогеологічні оцінки та прогнози режиму підземних вод України : монографія / С. А. Рубан, М. А. Шинкаревський. – Київ : УкрДГРІ, 2005. – 572 с.
5. Шестопалов, В. М. Стан і шляхи реформування державної системи моніторингу підземних вод з урахуванням міжнародного досвіду та вимог водної рамкової директиви Європейського Союзу / В. М. Шестопалов, Н. Г. Люта // Мінеральні ресурси України. – 2016. – № 2. – С. 3-4.
6. Koshliakov, O. Y. Cross-border aspect of geoinformation provision of water resource management in Ukraine [Electronic resource] / O. Y. Koshliakov, O. V. Dyniak, I. Y. Koshliakova // 16th International Conference Geoinformatics. Theoretical and Applied Aspects. – 2017. – P. 1-5 – Access mode <https://www.earthdoc.org/content/papers/10.3997/2214-4609.201701797>
7. Groundwater Potential Assessment Using GIS and Remote Sensing Techniques: Case Study of West Arsi Zone, Ethiopia / J. Kabeto, D. Adeba, M. S. Regasa, M. K. Leta // Water. – 2022. – №14. – 1838. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14121838>

8. An Overview of Groundwater Monitoring through Point-to Satellite-Based Techniques / A. Masood, M. A. U. R. Tariq, M. Z. U. R. Hashmi, M. Waseem, M. K. Sarwar, W. Ali, R. Farooq, M. Almazroui, A.W.M. Ng // *Water*. – 2022. – № 14. – P. 565. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14040565>
9. Malik, M. I. Remote Sensing and GIS based groundwater potential mapping for sustainable water resource management of Lidder catchment in Kashmir Valley, India / M. I. Malik, M. S. Bhat, S. A. Najar // *J Geol Soc India*. 87. – 2016. – P. 716-726. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12594-016-0444-3>.
10. Modeling groundwater potential using novel GIS-based machine-learning ensemble techniques / A. Arabameri, S. C. Pal, F. Rezaie, O. A. Nalivan, I. Chowdhuri, A. Saha, S. Lee, H. Moayedi // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – 2021. – Vol. 36. – 100848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100848>.
11. Lavender, S. Monitoring land cover dynamics at varying spatial scales using high to very high resolution optical imagery / S. Lavender // *Isprs - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLI-B8. – 2016. – P. 937-939. DOI: doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B8-937-2016.
12. Chaly, P. Hydrogeological Problems of the Carpathian Region in the Liviv Province [Electronic resource] // P. Chaly // *Groundwater Management in the East of the European Union* / eds. T. Nalecz. – NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht, 2011. – P. 67-70. – Access mode : <file:///C:/Users/Nataliya/Downloads/GroundwaterManagementintheEastoftheUEIndex.pdf>
13. Bhuiyan, C. Various drought indices for monitoring drought condition in Aravalli Terrain of India / C. Bhuiyan, // XXth ISPRS Congress, Technical Commission VII (July 12-23, 2004, Istanbul, Turkey ) / editor O. Altan. – International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. – ISPRS Archives – 2004. – Vol. XXXV, Part B7. – P. 1283-1288.
14. Leelaruban, N. Examining the Relationship between Drought Indices and Groundwater Levels / N. Leelaruban, G. Padmanabhan, P. Oduor // *Water* – 2017. – Vol. 9, № 2. – P. 82. DOI: doi:10.3390/w9020082
15. Niranga, A. A comprehensive assessment of remote sensing and traditional based drought monitoring indices at global and regional scale / A. Niranga, E. Mahesh, B. Geomatics // *Natural Hazards and Risk*. – 2022. – Vol.13, № 1. – P. 762-799. DOI: doi: 10.1080/19475705.2022.2044394
16. A weighted normalized difference water index for water extraction using Landsat imagery / G. Qiandong, P. Ruiliang, L. Jialin, C. Jun // *International Journal of Remote Sensing*. – 2017. – 38:19. – P. 5430-5445. DOI: 10.1080/01431161.2017.1341667
17. Szabó, S. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories / S. Szabó, Z. Gácsi, B. Balázs, // *Landscape & Environment*. – 2016. – № 10(3-4). – P. 194-202. DOI: 10.21120/LE/10/3-4/13

## References

1. Davybida, L., Kasiyanchuk, D., Shtohryn, L., Kuzmenko, E., & Tymkiv, M. (2018). Hydrogeological conditions and natural factors forming the regime of groundwater levels in the Ivano-Frankivsk region (Ukraine). *Journal of Ecological Engineering*, 19(6), 34-44. doi:10.12911/22998993/91883.
2. Davybida, L., Kasiyanchuk, D., & Shtogrin, L. (2020). Spatial analysis of the relation between the distribution of dangerous exogenous geological processes and landscape hydrogeological complexes in Transcarpathian. *International Conference of Young Professionals, GeoTerrace 2020*. doi:10.3997/2214-4609.20205755.
3. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy [official website]. [http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5c835afb-2ec6-4577-bdf8-756d3d694eeb.0004.02/DOC\\_1&format=PDF](http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5c835afb-2ec6-4577-bdf8-756d3d694eeb.0004.02/DOC_1&format=PDF).
4. Ruban S. A., Shynkarevskiy M.A. (2005). Hydrogeological assessments and forecasts of the groundwater regime in Ukraine. Kyiv: UkrDHRI.
5. Shestopalov, V.M., Liuta, N. H. (2016). State and ways of reforming the state groundwater monitoring system considering the international experience and the requirements of the Water Framework Directive of the European Union. *Mineral Resources of Ukraine*, 2, 3-4.

6. Koshliakov, O. Y., Dyniak, O. V., & Koshliakova, I. Y. (2017). Cross-border aspect of geoinformation provision of water resource management in Ukraine. 16th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects.
7. Kabeto, J., Adeba, D., Regasa, M.S., Leta, M.K. (2022). Groundwater Potential Assessment Using GIS and Remote Sensing Techniques: Case Study of West Arsi Zone, Ethiopia. *Water*, 14, 1838. doi:10.3390/w14121838.
8. Masood, A., Tariq, M.A.U.R., Hashmi, M.Z.U.R., Waseem, M., Sarwar, M.K., Ali, W., Farooq, R., Almazroui, M., Ng, A.W.M. (2022). An Overview of Groundwater Monitoring through Point-to Satellite-Based Techniques. *Water*, 14, 565. doi:10.3390/w14040565.
9. Malik, M.I., Bhat, M.S., & Najar, S.A. (2016). Remote Sensing and GIS based groundwater potential mapping for sustainable water resource management of Lidder catchment in Kashmir Valley, India. *J Geol Soc India*, 87, 716–726. doi:10.1007/s12594-016-0444-3.
10. Alireza Arabameri, Subodh Chandra Pal, Fatemeh Rezaie, Omid Asadi Nalivan, Indrajit Chowdhuri, Asish Saha, Saro Lee, Hossein Moayed. (2021). Modeling groundwater potential using novel GIS-based machine-learning ensemble techniques. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100848. doi:10.1016/j.ejrh.2021.100848.
11. Lavender, S. (2016). Monitoring land cover dynamics at varying spatial scales using high to very high resolution optical imagery. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B8, 937-939. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B8-937-2016.
12. Chaly, P. (2011). Hydrogeological Problems of the Carpathian Region in the Liviv Province. In: Nalecz, T. (eds) *Groundwater Management in the East of the European Union*. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht. doi:10.1007/978-90-481-9534-3\_8.
13. Bhuiyan, C. (2004). Various drought indices for monitoring drought condition in Aravalli Terrain of India. *ISPRS Archives – Volume XXXV Part B7, 2004, XXth ISPRS Congress, Technical Commission VII, July 12-23, 2004, Istanbul, Turkey* (Altan O, editor.). International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, p. 1283–1288.
14. Leelaruban, N., Padmanabhan, G., & Oduor, P. (2017). Examining the Relationship between Drought Indices and Groundwater Levels. *Water*, 9(2), 82. doi:10.3390/w9020082.
15. Niranga, A., & Mahesh, E. (2022). A comprehensive assessment of remote sensing and traditional based drought monitoring indices at global and regional scale. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 13(1), 762-799. doi:10.1080/19475705.2022.2044394.
16. Qiandong Guo, Ruiliang Pu, Jialin Li, & Jun Cheng (2017). A weighted normalized difference water index for water extraction using Landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(19), 5430-5445. doi:10.1080/01431161.2017.1341667.
17. Szabó, S., Gácsi, Z., & Balázs, B. (2016). Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories. *Landscape & Environment*, 10(3-4), 194–202. doi:10.21120/LE/10/3-4/13.

Отримано 03.06.2023

UDC 502.35:004.4

### Lidiia Davybida

PhD in Geological Sciences, Associate Professor of the Department of Geotechnogenic Safety and Geoinformatics,  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
(Ivano-Frankivsk, Ukraine)

E-mail: [lidiia.davybida@nung.edu.ua](mailto:lidiia.davybida@nung.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9796-7124>

ResearcherID: F-3567-2017

## ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE VARIABILITY OF GROUNDWATER LEVELS AND INDICES OF METEOROLOGICAL DROUGHTS USING THE GOOGLE EARTH ENGINE PLATFORM

*Groundwater is a critically important natural resource vulnerable to climate change and artificial factors. In addition, groundwater is one of the most dynamic components of the geological environment. Their regime affects dangerous exogenous geological processes' formation, development and activation. Therefore, systematic monitoring of the hydrogeological regime*

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

is necessary for the effective management of water resources, forecasting of the state of aquifers and surface waters, as well as the risk of the development of dangerous processes.

Actual scientific researches and issues analysis about the restoration of the State hydrogeological monitoring network of Ukraine and its adaptation to European standards shown the relevance of this problem, as well as the feasibility of involving GIS technologies and remote sensing data in its solution.

The purpose of the article is to assess the relationship between the main spectral drought indices and the variability of the groundwater level in the Carpathian region using the open-source cloud geoinformation platform Google Earth Engine.

Observation data on changes in groundwater levels in wells of the State network of hydrogeological monitoring of Ukraine were used to analyze their relationship with some spectral indices (drought indicators) established by remote sensing data. The obtained results made it possible to establish that it is appropriate to use drought indices for the operational assessment of the drought impact on groundwater resources.

In this work, a methodology for processing data from observations of groundwater levels compatible with the results of satellite monitoring in the Google Earth Engine environment is proposed and its practical application is demonstrated. For the first time, based on a set of remote sensing data and groundwater observations, a relationship between spectral indices and groundwater levels in hydrogeological monitoring wells of the Carpathian region was established. Studying the regime of levels for a group of wells with different hydrogeological conditions can help to understand the impact of meteorological and hydrological drought on groundwater aquifers within the study region, as well as other areas.

**Keywords:** technological accessories; functional assignment; woodworking; furniture production.

Table: 2. Fig.: 5. References: 17.

**Андрій Колесников<sup>1</sup>, Михайло Замула<sup>2</sup>**<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри хімії та екології

Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: [kolesnikov\\_himek@ogasa.org.ua](mailto:kolesnikov_himek@ogasa.org.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8737-0933>

ResearcherID: IRZ-3809-2023.

<sup>2</sup>здобувач ступеня доктора філософії, аспірант кафедри міського будівництва та господарства

Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)

E-mail: [zamulamichailodaba@gmail.com](mailto:zamulamichailodaba@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0029-3758>

ResearcherID: IRZ-3909-2023.

**СИСТЕМНІ МЕХАНІЗМИ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ У  
БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ**

У статті на основі досліджень часових змін електропровідності, діелектричних втрат, екзотермічних ефектів та швидкості ультразвуку проводиться аналіз системних механізмів твердіння гіпсових композитів. Одержані експериментальні криві трансформуються за допомогою визначення кривизни. Показано, що виникнення особливостей в трансформованих кривих відбувається у вузьких часових вікнах, майже одночасно. Це явище інтерпретується як результат перетворень структури «тверда частина – границя розділу – рідка фаза» композиту. Запропоновано практичний метод визначення кінця тужавлення за допомогою аналізу трансформованих залежностей.

**Ключові слова:** гіпсові композити, твердіння, системні механізми, кривизна

Рис.:5. Бібл.: 16.

**Постановка проблеми.** Одним із основних завдань будівельного матеріалознавства є створення композиційних матеріалів з оптимальним набором експлуатаційних характеристик, що формуються у композиційному матеріалі під час структуроутворення. Структуроутворення, що відбувається протягом життєвого циклу матеріалу – явище фіксації просторового розподілу різномасштабних частинок матеріалу внаслідок сукупності фізико-хімічних процесів. Одним із таких є формування структурно-механічних бар'єрів  $E_{st} \gg kT$ , що поділяють мінімуми структурного потенціалу, у зв'язку з різними механізмами, зокрема утворенням коагуляційно-кристалізаційної структури із гідратних новоутворень та інших частинок композиту. На мезоскопічному рівні в результаті перебігу описаних процесів формується структура кластерів і внутрішніх меж розділу [1], що утворюють мережеву структуру [2] з кластерів-вузлів та «прохідних» структур з мікрочастинками, з'єднаних фазовими контактами. Така структура загалом із точністю до масштабного рівня якісно відповідає також органічним полімерам [3].

У процесі утворення структур ряд властивостей досліджуваних гіпсових матеріалів змінюються за визначеним сценарієм, що повторюється від одного зразка до іншого. Серед цих властивостей - електропровідність в'язучого тіста, що вимірюється на змінному струмі (для запобігання поляризації електродів), теплопродукція (екзотермія) в'язучого, що твердне, швидкість проходження імпульсів ультразвуку [4], міра діелектричних втрат у в'язучому. Незважаючи на достатню повторюваність відповідних кривих, кожна з вищенаведених характеристик є сумарним відображенням кількох процесів, що відбуваються як паралельно, так і послідовно. Так, екзотермічний ефект, пов'язаний із твердінням багатокомпонентних композитів, є сумою теплових ефектів змочування, розчинення, гідратації, формування новоутворень (це основні вклади, [5]). Прямий аналіз експериментальних кривих, одержуваних щодо відповідних характеристик твердіючого композиційного в'язучого, з цих причин є складним. Таким чином, для в'язучих матеріалів та композитів на їх основі може бути сформульована ємна та інформаційно насичена задача реконструкції механізмів структуроутворення за непрямими, сумарними результатами вимірювань, що відображають багато процесів одночасно.

**Актуальність проблеми.** Вирішення сформульованої задачі дозволяє уточнити модельні уявлення про процеси структуроутворення у композиційних матеріалах. Відповідне дослідження є прикладом отримання структурно-орієнтованої інформації з безперервних експериментальних залежностей. Пропоновані методи можна застосувати до досить широкого кола подібних завдань. Розроблена методика дозволяє на основі експериментальних часових залежностей ефективно виділити послідовність якісних змін у композиційному в'язучому, що твердіє, і дати їм фізичну інтерпретацію. Практична цінність пропонованого алгоритму дослідження полягає в можливості надійного визначення кінця тужавлення в випадках неможливості застосування стандартизованої пенетраційної методики.

**Новизна матеріалу** полягає в запропонованому алгоритмі обробки експериментальних даних, введенні часової шкали якісних змін на основі властивостей трансформованих експериментальних кривих, в структурно-орієнтованій інтерпретації якісних змін, що спостерігаються, в розробленому практичному методі визначення термінів тужавлення за експериментальними даними.

**Об'єктом дослідження** є багатокомпонентний матеріал на основі гіпсу.

**Предметом дослідження** є механізми процесів структуроутворення в багатокомпонентному композиційному матеріалі та методи реконструкції інформації про нього за даними непрямих фізичних вимірів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У процесі структуроутворення в мінеральних в'язучих та композитах на їх основі відбуваються фізико-хімічні зміни, що характеризуються різними просторовими масштабами. Змінюються багато фізичних властивостей в'язучого тіста, прямо чи опосередковано пов'язаних зі структурою – міцність, в'язкість, пластична міцність, температура, швидкість поширення звукових та ультразвукових коливань, електричні характеристики [6].

Для оцінки процесів структуроутворення дисперсій в'язучих різного складу запропоновано [7] набір кривих структуроутворення (зміни фізичних властивостей композиційного в'язучого з часом) та надано їх фізико-хімічне трактування. Процес структуроутворення для цементних композицій поділено на чотири стадії, що відображають колоїдно-хімічний та деформаційний стан систем (рис. 1). Загальний характер структуроутворення у разі гіпсових композитів характеризується достатнім ступенем якісної подібності до цементних матеріалів.

На першій стадії I відбувається інтенсивна гідратація. Колоїдні частинки, що утворилися, коагулюють, і до кінця цієї стадії утворюється просторовий каркас коагуляційної структури, в яку входять покриті гідратними новоутвореннями частинки в'язучого. З цим узгоджується зростання електропровідності та рН, тепловиділення та найбільше ущільнення системи, про яке можна судити з контракції, що досягає до кінця I стадії максимуму.

Контракція властива колоїдним системам, зменшення об'єму пояснюється орієнтацією структурних елементів та води [8]. При цьому контракція відбувається також за рахунок суто стеричного фактора при утворенні просторового каркасу коагуляційної структури – малі частинки та структурні елементи проникають у простір між громіздкими агрегатами структури, внаслідок чого компактність системи зростає. Максимум контракції до кінця I стадії підтверджує утворення просторової коагуляційної структури. Для гіпсових композитів спостерігається суперпозиція кількох процесів. Частина з них пов'язана з розглянутими геометричними та фізичними факторами упаковки та зумовлюють контракцію. Інші доданки зумовлені протилежним ефектом – зростанням об'єму новоутворень та формуванням пористої кристалізаційної структури. Результируючий ефект у разі часто пов'язаний зі збільшенням об'єму [9].



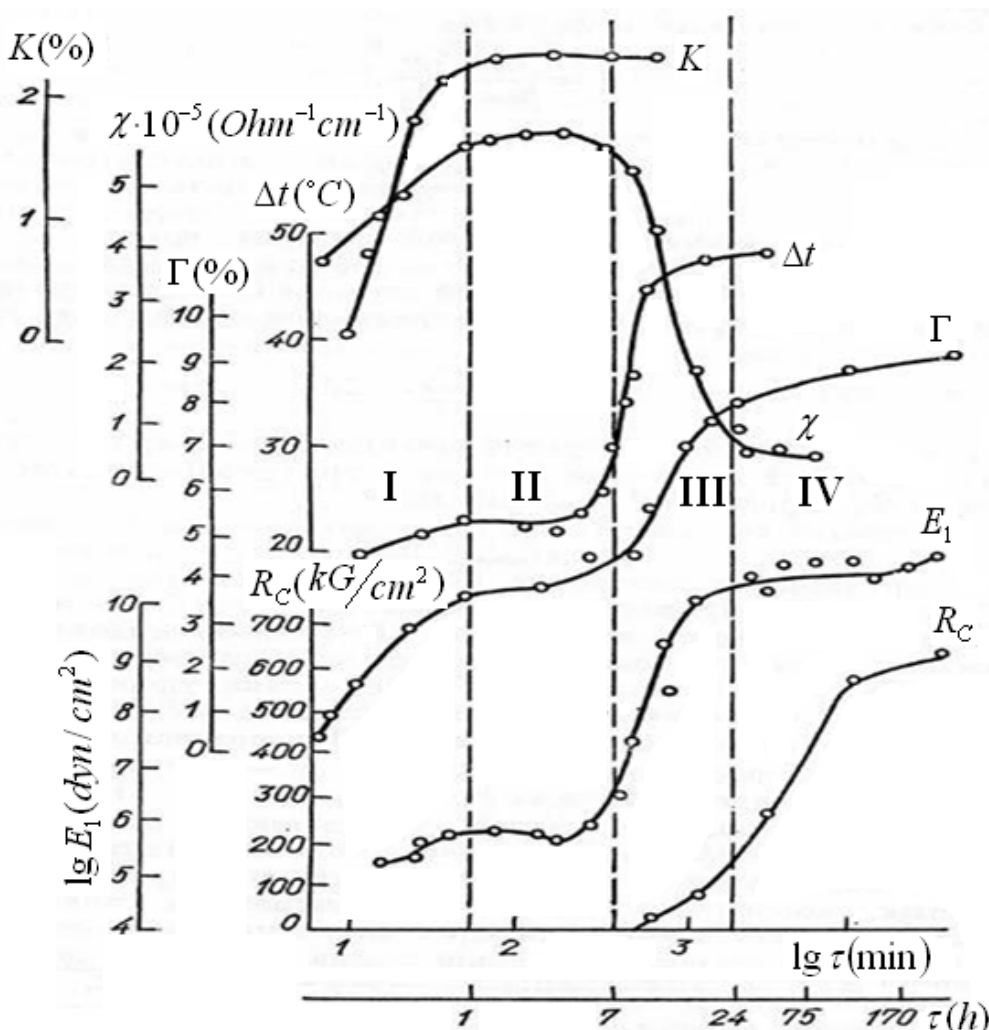


Рис.1. Криві процесів структуроутворення  $E_1$  твердіючих систем в нормальних умовах протягом 28 діб та криві тепловиділення  $\Delta t$ , зміни ступеня гідратації  $\Gamma$ , межі міцності  $R_c$ , питомої електропровідності  $\chi$  та контракції  $K$ .

На другій стадії II (для цементних композитів) вже спостерігаються деструктивні явища, що відбивається на кривій структуроутворення коливаннями модулю швидкої еластичної деформації. Ці явища виникають в результаті фізико-хімічних процесів, що відбуваються в надрах коагуляційної структури. Можна припустити, що ці ефекти деструкції відбуваються у зв'язку з початком процесу переходу трисульфатного гідросульфатоалюмінату в моносульфатну форму, а також у зв'язку з утворенням вторинних структур. Остання причина (формування вторинної структури з частковою первинною деструкцією) є основною для формування на цій стадії коливань пластичної міцності у гіпсових композитів [10].

Деструкція на початку другої стадії відбувається у зв'язку з розпадом глобул та утворенням вторинних структур [7]. Ці деструктивні явища на кривих проявляються систематично та підтверджуються одночасним симбатним падінням резонансної частоти того ж зразка. При цьому також коливається температура на ділянках, які відповідають деструктивним явищам у другій стадії.

Деструктивні явища продовжуються в інших стадіях процесу структуроутворення та супроводжуються уповільненням зростання температури зразка та ефектами на кривих резонансної частоти.

Відповідні криві (рис.1) наочно підтверджують, що твердіння цементів та інших в'язучих, у тому числі і гіпсових, а також композитів на їх основі, є сумарним процесом, що є суперпозицією протилежно спрямованих явищ, в якому безперервно відбувається утворення структур та їх деструкції [11]. Тепловиділення в'язучих, що твердіють, обумовлено не тільки процесами гідратації, а й поверхневими явищами, а також і процесами структуроутворення.

Процес структуроутворення на першій та другій стадіях характеризуються розвитком високоеластичних деформацій із великим періодом ретардації (до 10-15 хв). Модулі швидкої еластичної деформації в цих стадіях дорівнюють 104-106 дин/см<sup>2</sup>. Ці величини характеризують коагуляційну структуру [12]. До кінця другої стадії переважають процеси кристалізаційного структуроутворення, що відбивається на його кривій різким збільшенням модуля пружності, що досягає до кінця третьої стадії 10-11 дин/см<sup>2</sup> і більше.

Одночасно інтенсивно виділяється тепло та збільшується ступінь гідратації (III стадія). На кривій зміни рН на той час починається спад, що, мабуть, пов'язано зі зменшенням концентрації вільних іонів Ca<sup>2+</sup> і OH<sup>-</sup>, що вступають у гідратні сполуки (для цементу) [7]. На цій стадії утворюється основний просторовий кристалізаційний каркас. Даний процес відбувається інтенсивно і часто закінчується деякими спадами модуля пружності в результаті внутрішніх напруг в кристалізаційній структурі.

На четвертій (IV) стадії відбувається основне зростання міцності. Модуль пружності підвищується менш інтенсивно, ніж на третій стадії. Можна вважати, що міцність у цьому періоді наростає за рахунок субмікроструктурних, гелеподібних, гідросілікатних мінералів, що повільно розвиваються і зумовлюють непружні властивості цементного каменю. Вони ростуть на основному кристалізаційному каркасі та розвиваються всередині нього. Для двоводного гіпсу часткове руйнування кристалізаційного каркасу та зростання новоутворень відіграє аналогічну роль. Створювані внутрішні напруги проявляються у вигляді спадів модуля пружності та міцності [7].

Проаналізувавши отримані криві кінетики структуроутворення в цілому, можна зробити висновок, що при твердінні в'язучих речовин фізичні властивості в'язучого тіста і їх зміни в різній ступені пов'язані з коагуляційною структурою, що формується, і кристалізаційною структурою, що розвивається на її основі.

**Виділення не досліджених раніше частин загальної проблеми.** Важлива задача реконструкції механізмів змін в твердіючих композитах на основі непрямих фізичних вимірювань не має однозначного структурно-орієнтованого вирішення. Серед різних шляхів рішення подібних задач не виділено стереотипних методів (застосовуваних для різних фізичних властивостей). Часто особливості експериментальних кривих аналізуються безпосередньо, що може приховувати важливі, хоч і не яскраво виражені якісні зміни. Без відповідних засобів трансформації експериментальних кривих системні закономірності процесів твердіння не проявляються чітко, це зокрема стосується єдності темпоритмів структурних перетворень у в'язучому тісті. Перехід до об'єктивізації і візуалізації якісних змін запропонованими методами послідовно вирішує задачу аналізу системних механізмів досліджуваних явищ.

**Метою роботи** є розробка системно-структурної інтерпретації явищ структуроутворення, яка, зокрема, полягає у врахуванні синхронності та періодичності змін структурних чинників і, відповідно, фізичних властивостей композиційного в'язучого тіста. Відповідними задачами є врахування таких особливостей:

1. Експериментальні криві, що безпосередньо отримуються з експериментальних даних, можуть бути трансформовані (виходячи з їх апроксимації можуть бути отримані інші криві), в результаті інтерпретаційна здатність дослідження може зрости.

2. Інтерпретаційна можливість розглянутих методів у дослідженні процесів структуроутворення істотно зростає при одночасному комплексному дослідженні різнорідних характеристик, наприклад, наведених вище.

3. Важлива роль в інтерпретації ефектів, що відбуваються в в'язучому тісті, належить збігу або зближенню у часі якісних змін експериментальних або трансформованих залежностей (перетин осей, екстремальні значення).

4. Всі досліджувані властивості є структурно-залежними, хоча така залежність виражена різною мірою. Швидкість ультразвуку безпосередньо залежить від структури кластерів твердих частинок і зв'язків між ними (кристалізаційних контактів), здатних проводити механічний вплив крізь твердіючий зразок. Іншим властивостям притаманна залежність від геометричних показників шарів зв'язаної води, що лежать на поверхні твердіючого в'язучого та вільної води пір та капілярів. Між геометричними параметрами цих структур існує якісна взаємна відповідність. Тому в якості цільової моделі процесів, що відбуваються, повинна бути обрана структурно-орієнтована.

Послідовне застосування розглянутих чотирьох принципів дозволяє обґрунтувати інтерпретацію структурних перетворень у композиційному в'язучому тісті багатокомпонентного матеріалу. Наведені методи дозволяють також дати вирішення важливому інженерно-технічному завданню – визначити терміни твердіння багатокомпонентного композиту складної структури.

**Основні результати роботи.** Вихідним набором експериментальних даних є часові залежності наступних фізичних властивостей твердіючого в'язучого тіста: діелектричні втрати, екзотермія, електропровідність та швидкість поширення ультразвукових імпульсів. Для відображення на єдиній шкалі відповідні експериментальні дані були нормовані. Нормовані експериментальні дані показано на рис 2.

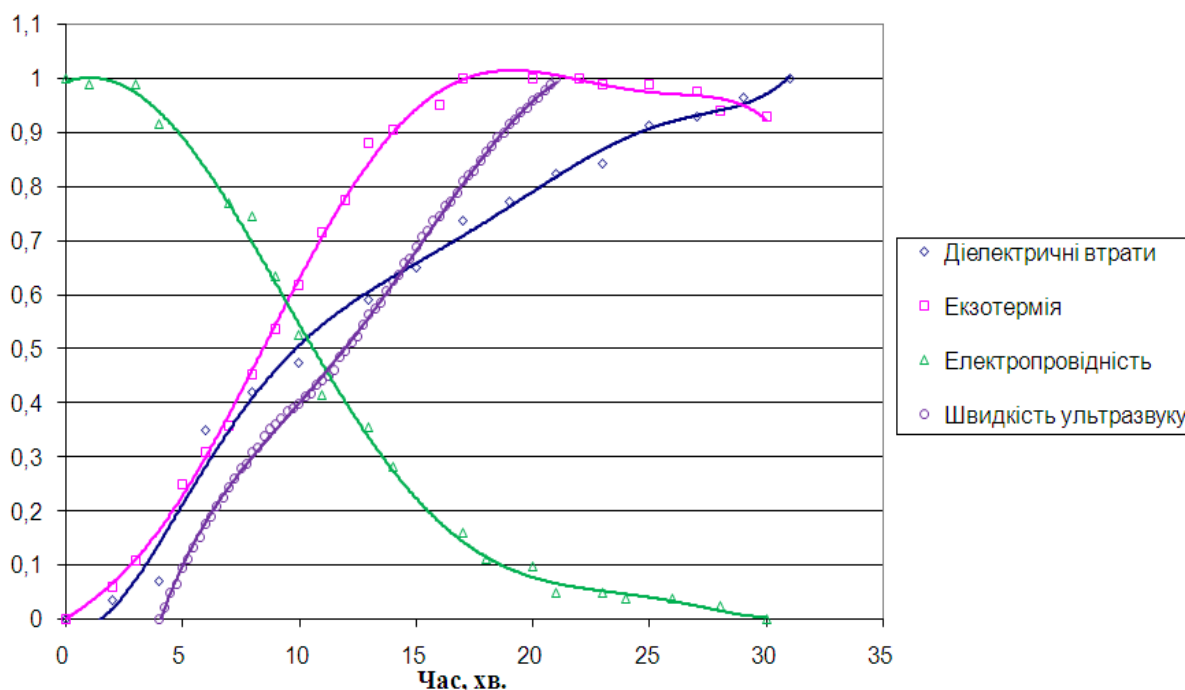


Рис.2. Нормований графік фізичних властивостей композиційного в'язучого тіста, що твердіє

Відповідні експериментальні криві властивостей, що змінюються в часі, отримані фізичними методами, пов'язаними зі збуренням, що впливають на структуроутворення. Оскільки ці впливи були досить малі (ультразвукові імпульси невеликої потужності, малі

струми, що проходять через в'язуче тісто), їх ефект приймався досить малим і таким, що не впливає істотно на процеси, які відбуваються в композиційному в'язучому тісті.

Для інтерпретації отриманих даних поряд із вихідними кривими (рис.3) розглянемо трансформовані. Практичну корисність показав перехід від самих кривих до значень їхньої кривизни. Кривизна кривої  $k(t)$  і обернена їй величина радіуса кривизни  $\rho(t)$  визначається за формулою (1)

$$k(t) = \frac{1}{\rho(t)} = \frac{\frac{d^2 y(t)}{dt^2}}{\left[ \sqrt{1 + \left( \frac{dy(t)}{dt} \right)^2} \right]^{3/2}} \quad (1)$$

Для застосування розглянутого підходу будується поліноміальна апроксимація кривих багаточленами ступеня 5, що показує задовільну точність (коефіцієнт детермінації  $R^2 \leq 0,98$ ). Криві апроксимації показані на рис.3.

Рівняння апроксимації підставлялися у (1), по ньому обчислювалися значення кривизни. Значення кривизни експериментальних кривих утворюють залежність  $k(t)$ . Графіки для значень кривизни кожної фізичної характеристики наведено на рисунку 3.

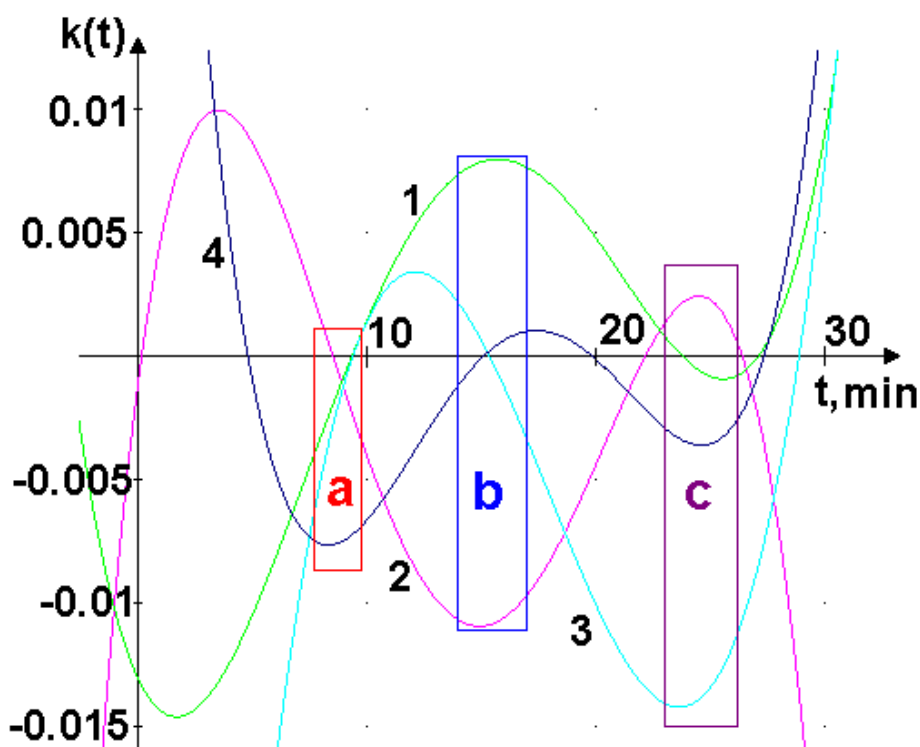


Рис.3. Значення кривизни експериментальних кривих;  
1 – електропровідність, 2 – екзотермічний ефект, 3 – швидкість ультразвукових імпульсів, 4 – діелектричні втрати. Часові інтервали a, b, c – інтервали групування особливостей (мінімумів, максимумів, перетину осі X)

При спільному аналізі трансформованих кривих стає зрозумілим факт групування особливостей наведених залежностей, тенденція до такого явища виникає ще в області

початку тужавлення композиційного в'язучого тіста (~ 5 хв), проте яскравий прояв подібного роду починається в області кінця тужавлення (інтервал **a**, рис. 3, ~9 хв.). та в декількох наступних точках (інтервал **b**, рис. 3, ~15 хв; інтервал **c**, рис. 3, ~25 хв.).

Збіг особливостей кривих структуроутворення (особливо у трансформованій формі) у певних вузьких часових інтервалах (рис.3), потребує системної інтерпретації.

Системна інтерпретація відрізняється від наведеної вище акцентом на вплив результатів проходження різних процесів на їх же параметри (зокрема, на швидкість) і на динамічні зміни в системі, що розглядається в цілому, вона включає і фізико-хімічні механізми, подібні до розглянутих раніше. Системна функція процесу може бути тісно пов'язана із змінами кривизни експериментальних кривих.

Розглянемо геометричне значення локальних змін кривизни експериментальних кривих. Воно полягає у виникненні «згладжених» зламів на графіках та плавній зміні тангенсу кута нахилу дотичної, рис. 4.

Однією зі специфічних рис системності, що відноситься до мінеральних в'язучих і застосовуваних при інтерпретації вихідних і трансформованих експериментальних залежностей, є двоїста структура матеріалу. Вона утворена мінеральними або органічними компонентами – матеріалом, наповнювачами або заповнювачами та добавками, а також рідиною в капілярно-пористій структурі матеріалу як дисперсної системи. Головним компонентом рідини є зазвичай водний розчин (в капілярному або зв'язаному стані), його склад змінюється кількісно та якісно в процесі твердіння, головними розчиненими компонентами є гідратовані іони.

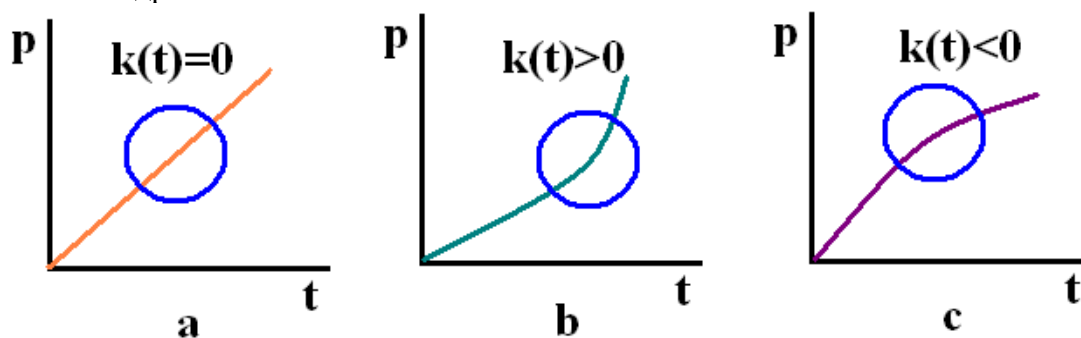


Рис.4. Локальні особливості експериментальних кривих та знак кривизни.

У процесі твердіння дві фази – рідка та тверда, і межа поділу між ними піддаються структурній трансформації. Рідка структура є індукованою, залежить від структури композиту, що твердіє, існує і більш слабкий зворотній вплив. Досліджувані фізичні властивості залежать від показників розглянутих структур по-різному. Так, властивості, пов'язані з електропровідністю та діелектричними втратами залежать безпосередньо від геометричної та топологічної структури рідкої фази та поверхні розділу (від характеристик твердої фази опосередковано). У той же час швидкість проходження ультразвукових імпульсів, пластична міцність, міцність при стисканні та згинанні безпосередньо залежать від структури твердої фази (від рідкої фази – опосередковано), теплові процеси – насамперед від структури поблизу межі розділу фаз. Одним із непрямих відображень системності у змінах структурних аспектів є єдність темпоритмів зміни фізичних характеристик (рис. 3). Системність змін властивостей проявляються також в єдності походження змін, що відбуваються. У цьому сенсі перехід до трансформованих кривих є інженерним прийомом, добре пристосованим до прояви слабо виявлених при візуальному розгляді якісних характеристик експериментальних кривих.

Розглянемо системну інтерпретацію явищ, що відбуваються в композитному в'язучому тісті, на часовому інтервалі **a** (рис. 3).

Для зростаючого графіка діелектричних втрат спостерігається перегин терміном  $\sim 9$  хв. від замішування, чому відповідає мінімум кривизни в негативній області (рис. 3). Діелектричні втрати в умовних одиницях вимірювалися за допомогою діелькометра-воломіра, що є малопотужним високочастотним генератором, добротність коливального контуру якого залежить від характеру досліджуваного діелектрика [13]. Діелектричні втрати пов'язані в основному з перебудовами у подвійних шарах, утворених молекулами води та мінеральними компонентами, зокрема, гіпсом  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , у молекулярній, іонній та гідратованій формах. Періодична перебудова подвійних шарів пов'язана також із втратою енергії та, відповідно, з діелектричними втратами [13].

Вода в композиційному матеріалі розподілена за його пористою структурою, її характерні її власні структурні характеристики, індуковані матеріалом. Вона присутня в основному в трьох формах - гідратаційна вода у складі кристалогідратів (зокрема, гіпсу), вода, адсорбована на поверхні пір і капілярів, яка взаємодіє з мінеральними компонентами за рахунок зарядів та водневих зв'язків (зв'язана вода), вільна вода пір і капілярів [14].

У момент замішування композиційного в'язучого тіста відбувається змочування вихідних компонентів, проникнення води в капілярно-пористу структуру зерен в'язучого та інших компонентів та реакція гідратації, останні два ефекти перебиваються в часі.

У процесі гідратації реагують шари зв'язаної води, які відразу замінюються вільною водою. Кількість вільної води обмежена (явище витрати кінцевих кількостей, характерне для багатьох фізико-хімічних систем). У період **a** ( $\sim 9$  хв, рис. 3) запаси вільної води значною мірою витрачені, вода існує у зв'язаній формі (гідратаційні шари). Геометрична та топологічна структура шарів води вже інша, з'являються, зокрема, нові межі розділу, пов'язані з витратою вільної води. Швидкість реакції переходу води з пов'язаної в гідратну (без заміщення) менше, чому відповідає наявність перегину вихідних експериментальних кривих діелектричних втрат, а також екстремум кривизни.

Незважаючи на істотний вплив на описані процеси складу і структури композиту, виникнення перегину (і відповідного екстремуму кривизни) діелектричних втрат за рахунок геометро-топологічної перебудови водної компоненти в'язучих вважається досить універсальною закономірністю.

Для інтерпретації часової залежності електропровідності (рис. 2) і відповідної кривизни (рис. 3) корисною є подібність експериментальної кривої провідності до класичних перколяційних кривих (наприклад, для провідності у разі перколяції зв'язків [15]). На інтервалі **a** (рис. 3) видно, що кривизна для графіка провідності проходить через 0, змінюючи знак з негативного на позитивний. Як було показано раніше, діелектричні втрати та їх зміна обумовлені властивостями вільної та зв'язаної у вигляді шарів адсорбованих молекул води. Якщо для діелектричних втрат найважливішими були локальні властивості, то для провідності, вимірюваної на низьких частотах з метою усунення поляризації електродів, істотна об'ємна структура шарів молекул води, індукована структурою матеріалу. Шари води капілярно-пористої структури композиту формують зв'язану систему перколяційного (охоплюючого) кластера. Вони утворюють провідну структуру, якою здійснюється переміщення гідратованих іонів. Процес гідратації, що триває, призводить до зникнення вільної води, квазідвовимірна структура шарів зв'язаної води, що формує охоплюючий кластер (точніше, його провідну структуру), розривається, перетворюючись на сукупність локальних кластерів, між якими провідність реалізується через гідратні новоутворення з високим опором. Провідність зменшується швидше в момент формування квазідвовимірної структури шарів води, чому відповідає перехід кривизни через вісь абсцис. В області **b** (рис.3) максимуму кривизни електропровідності процес гідратації в основному завершений. Провідність здійснюється через збіднені водою поверхневі

шари та гідратні новоутворення, максимум кривизни відповідає переходу між механізмами та зміні відповідних кутів нахилу дотичних (рис. 2) при  $\sim 17$  хв від замішування.

Якщо електропровідність в'язучого тіста і рівень діелектричних втрат, а також зміна цих властивостей у період твердіння значною мірою залежать від структури дисперсійного середовища (водного розчину), то швидкість поширення ультразвукових імпульсів визначається структурою твердих компонентів - новоутворень, зерен, що містять вихідне в'язуче, наповнювачів і добавок.

Структурні зміни твердої компоненти зручно розглядати у термінах теорії перколяції [15]. Фізичному еквіваленту початку тужавлення ( $\sim 5$  хв) відповідає формування перколяційного кластера з твердих частинок (зокрема, частинок новоутворень), пов'язаних кристалізаційними та фазовими контактами. Ультразвукові імпульси механічного характеру проводяться остовом перколяційного кластера. Момент формування провідної структури відбивається першим спрацьовуванням ультразвукової вимірювальної установки та першою точкою на графіці [16].

Структурні трансформації твердої компоненти продовжуються, перколяційний кластер збагачується «мертвими кінцями» [15], однозв'язними структурами, які не беруть участь у явищах провідності. Ці структурні елементи формують зовнішній периметр кластера, швидкість зростання структури стабілізується через виснаження запасів вільної води. Цьому відповідає погано виражений перегин на експериментальній кривій (рис.2), який виявляється при трансформації експериментальної кривої (рис. 3) – кривизна тут проходить через 0.

Трансформації твердої компоненти на цьому етапі не завершуються, що, зокрема, відбивається на графіку зміни кривизни швидкості ультразвуку (рис. 3). Одним з варіантів концептуальної інтерпретації подальшої еволюції швидкості ультразвуку є трансформація однозв'язаних фрагментів («мертвих кінців») у дво- та тризв'язані структури (рис. 5), що беруть участь у провідності. Цьому етапу відповідає екстремум кривизни в області (**b**, рис. 3).

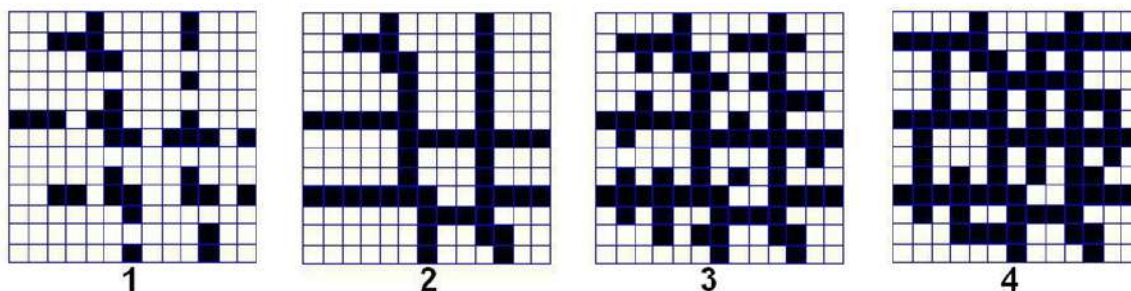


Рис.5. Схема трансформації структури композиційного матеріалу під час твердіння. 1-початковий період, 2-утворення провідної структури, початок тужавлення, 3-період **a** (утворення додаткових однозв'язаних фрагментів), 4 – період **b** (трансформація однозв'язаних фрагментів у дво- та тризв'язані)

Екзотермія твердіючого композиту є найбільш непрямим відображенням структурних трансформацій, які відбуваються в композиті, тепловий ефект має кілька складових [5]. У високонаповнених композиційних матеріалах, подібних до досліджуваних, новоутворення ростуть з поверхні зерен вихідного в'язучого, де є шари матеріалу, що прогрідував, або кристалографічно подібних ділянок поверхні твердих частинок, крізьрозчинний механізм росту новоутворень утруднений. Точка перегину на експериментальній кривій екзотермії відповідає найбільшій швидкості тепловиділення та звернення до нуля значення кривизни (рис.3). Цьому моменту приблизно відповідає момент досягнення

значної площі контакту гідратаційного розчину з вихідним в'язучим всередині капілярно-пористої структури та формування тонких шарів молекул води (зв'язаної води) і води в дрібних капілярах, а також невисокої наповненості пулу вільної води, що не контактує з в'язучим матеріалом. Зменшення наповненості пулу вільної води здійснюється за рахунок процесу гідратації та через заповнення пористої мікроструктури зерен матеріалу. Таким чином, інтенсивність екзотермічних процесів також опосередковано пов'язана з геометро-топологічною структурою водних шарів у композиційних матеріалах, а нуль кривизни для екзотермії (рис. 3) відповідає відносно рівномірному розподілу води за доступною для гідратації поверхні вихідного в'язучого.

Ефект синхронізації якісних змін в в'язучому тісті можна використовувати в практичних інженерних цілях. Одним із можливих застосувань є визначення термінів тужавлення і, особливо, кінця тужавлення високонаповнених композиційних матеріалів у тих випадках, коли стандартна методика, заснована на методах пенетрації, не спрацьовує. Слід зазначити, що терміни тужавлення розглядаються як договірні величини, які приблизно відповідають структурним змінам в'язучому тісті.

Для практичного використання рекомендується сукупність двох методів. Перший має бути тісно пов'язаний із структурними змінами у твердій фазі, другий – в індукованій структурі рідкої фази. Пропонується використовувати пару методів "швидкість ультразвукових імпульсів - діелектричні втрати" або "швидкість ультразвукових імпульсів - електропровідність". Початок тужавлення надійно визначається за першим спрацьовуванням ультразвукової установки (утворення провідної структури перколяційного кластера) [16], кінець тужавлення - по обох запропонованих змін кожної пари властивостей, з обчисленням кривизни експериментальних кривих.

Процеси, що відбуваються на пізніх термінах твердіння, у період **b** і **c** (рис.3) для своєї інтерпретації вимагають додаткових експериментальних даних, для стану **b** запропонована структурна інтерпретація. В цілому, для пізніх якісних змін справедлива єдність темпоритмів і тісний зв'язок з якісними структурними змінами, що представляється предметом майбутніх досліджень.

**Висновки.** Попередня обробка експериментальних кривих (перехід до кривизни) дозволяє наочно виявити аспекти системності, що спостерігається при твердінні композиту і базуються на єдності геометро-топологічних трансформацій структури твердої фази та індукованої структури рідкого середовища. Відповідні перебудови відбуваються в близькі моменти часу (майже синхронно). Оскільки цей ефект не пов'язаний безпосередньо з хімічною природою матеріалу, що твердіє, то він видається досить універсальним. Таким чином, зміна фізичних властивостей тісно пов'язана зі структурними змінами у твердій та рідкій фазах твердіючого композиційного в'язучого і здійснюється в єдиному темпоритмі, що частково відображається в періодичному виникненні якісних змін в експериментальних кривих, особливо в запропонованій трансформованій формі.

#### Список використаних джерел

1. Выровой, В. Н. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства / В. Н. Выровой, В. С. Дорофеев, В. Г. Суханов. – Одесса : ТЕС, 2011. – 168 с.
2. Нехорошев, А. В. Ресурсосберегающие технологии керамики, силикатов и бетонов. Структурообразование и тепловая обработка / А. В. Нехорошев, Г. И. Цителаури, Е. Хлебионек, Ц. Жадамбаа – Москва : Стройиздат, 1991. – 488 с.
3. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин и др.; под ред. А. А. Берлина. – СПб: Профессия, 2008. – 560 с.



4. Ultrasonic Control of the Formation of Gypsum Binders / V. Kersh, A. Kolesnikov, N. Xlytsov, A. Foshch // Actual Problems of Engineering Mechanics 6th International Conference "Actual Problems of Engineering Mechanics" (APEM 2019). – 2019. – Vol. 968. – P. 122-127
5. Дослідження структуроутворення гіпсових композитів на основі рівнянь Колмогорова / А. В. Колесников, С. В. Семенова, Н. В. Казмірчук, Г. А. Кириленко // Вісник ОДАБА. – 2020. – № 78. – С. 97-107.
6. Ієрархія структурних змін пи твердінні композитів за результатами виміру швидкості ультразвуку / В. Я. Керш, А. В. Колесников, М. А. Замула, О. О. Маковецька // IX Міжнародна конференція «Актуальні проблеми інженерної механіки», м.Одеса. – Одеса, 2022. – С. 57-62.
7. Гранковский, И. Г. Структурообразование в минеральных вяжущих системах / И. Г. Гранковский. – Киев : Наукова думка, 1984. – 300 с.
8. Райхель, В. Бетон : в 2-х ч. – Ч : Свойства. Проектирование. Испытание / В. Райхель, Д. Конрад ; пер. с нем. ; под ред. В. Б. Ратинова. – Москва : Стройиздат, 1979. – 111 с.
9. Sampson, D. H. Gypsum: properties, production and applications: Chemical Engineering / D. H. Sampson. – Methods and Technology, Nova Science Publishers, 2011.– 387 p.
10. Пшеничный, Г. Н. Строительные материалы и изделия: технология активированных бетонов / Г. Н. Пшеничный. – Москва : Юрайт, 2019. – 224 с.
11. Применение динамической теории информации для исследования структурообразования в строительных композитах / С. В. Семенова, А. В. Колесников, Т. П. Олейник, Г. А. Кириленко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2017.– № 66.– С. 59-65.
12. Коагуляционные контакты в дисперсных системах / В. В. Яминский, В. А. Пчелин, Е. А. Амелина, Е. Д. Щукин. – Москва : Химия. 1982.
13. Браун, В. Диэлектрики / В. Браун. – Москва : Издательство, 1961.– 324 с.
14. Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах : сб. докладов IV конференции по поверхностным силам / под ред. Б.В. Дерягина. – Москва : Наука. 1972.– 312 с.
15. Тарасевич, Ю. Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы / Ю. Ю. Тарасевич. – Москва : редакция УРСС, 2002. – 112 с.
16. Керш, В. Я. Ультразвуковой метод исследования твердения гипсовых вяжущих / В. Я. Керш, А. В. Колесников // Актуальні проблеми інженерної механіки : тези доп. VI міжнар. Наук-практ. Конф. – одеса : одаба, 2019. – с. 125-128.

### References

1. Vyrovoy, V.N., Dorofeev, V.S., Suhanov, V.G. (2011). *Composite building materials and constructions. Structure, self-organization, properties*. Odessa: TES.
2. Nekhoroshev, A.V., Citelauri, G.I., Hlebionek, E., Zhadambaa, C. (1991). *Resource-saving technologies of ceramics, silicates and concretes. Structure formation and heat treatment*. Moscow: Strojizdat.
3. Kerber, M.L., Vinogradov, V.M., Golovkin, G.S., et al. (2008) *Polymer composite materials: structure, properties, technology*. Saint Petersburg: Professiya.
4. Kersh, V., Kolesnikov, A., Xlytsov, N., Foshch A. (2019). Ultrasonic Control of the Formation of Gypsum Binders. *6th International Conference "Actual Problems of Engineering Mechanics"*, 968. P. 122-127.
5. Kolesnikov, A.V., Semenova, S.V., Kazmirchuk, N.V., Kirilenko, G.A. (2020). Study of structure formation of gypsum composites based on Kolmogorov's equations. *Visnik ODABA*, 78, 97-107.
6. Kersh, V. Ya., Kolesnikov, A. V., Zamula, M. A., Makovecka, O. O. (2022). Hierarchy of structural changes during the hardening of composites based on the results of ultrasound velocity measurements. *International conference "Actual problems of mechanical engineering"*. Odesa. P. 57-62.
7. Grankovskij, I. G. (1984). *Structure formation in mineral binders*. Kyiv: Naukova dumka.
8. Rajhel, V., Konrad, D. (1979). *Concrete: In 2 hours. Part 1. Properties. Design. Trial*. Moscow: Strojizdat.
9. Sampson, D. H. (2011). *Gypsum: properties, production and applications: Chemical Engineering Methods and Technology*. Nova Science Publishers.

10. Pshenichnyj, G.N. (2019). *Building materials and products: activated concrete technology*. Moscow: Yurajt.
11. Semenova, S.V., Kolesnikov, A.V., Olejnik, T.P., Kirilenko, G.A. (2017). Application of dynamic information theory for the study of structure formation in building composites. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 66, 59-65.
12. Yaminskij, V.V., Pchelin, V.A., Amelina, E.A., Shchukin, E.D. (1982). *Coagulation contacts in dispersed systems*. Moscow: Himiya.
13. Braun, V. (1961). *Dielectrics*. Moscow: Izdatinlit.
14. Deryagin, B.V. (Ed). (1972). *Surface forces in thin films and dispersed systems. Collection of reports IV conference on surface forces*. Moscow: Nauka.
15. Tarasevich, Yu.Yu. (2002). *Percolation: theory, applications, algorithms*. Moscow: Editorial URSS.
16. Kersh, V.Ya., Kolesnikov, A.V. (2019). Ultrasonic method for studying the hardening of gypsum binders. *Actual problems of engineering mechanics: Proceedings of 4th International science and practice conference. Odesa: ODABA*. P. 125-128

Отримано 14.08.2023

UDC 666.9-129

**Andrey Kolesnikov<sup>1</sup>, Mykhailo Zamula<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> PhD, associate professor of the Department of Chemistry and Ecology,  
Odessa State Academy of Construction and Architecture (Odesa, Ukraine)

E- mail: [kolesnikov\\_himek@ogasa.org.ua](mailto:kolesnikov_himek@ogasa.org.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8737-0933>  
ResearcherID: IRZ-3809-2023.

<sup>2</sup> graduate student of the Department of Urban Construction and Economy,  
Odessa State Academy of Construction and Architecture (Odesa, Ukraine)

E- mail: [zamulamichailodaba@gmail.com](mailto:zamulamichailodaba@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0029-3758>  
ResearcherID: IRZ-3909-2023.

**SYSTEM MECHANISMS OF STRUCTURE FORMATION IN MULTICOMPONENT COMPOSITE MATERIALS**

*In this work, based on the study of the time dependence of physical properties - exothermia (heat release), electrical conductivity on alternating current, dielectric losses in the volume of the hardening composite dough, the propagation velocity of ultrasonic pulses, a systematic interpretation of the mechanisms of structure formation and hardening of gypsum-based composites is considered. The study consists of three stages - the transformation of experimental data, which consists in calculating the curvature of the corresponding experimental curves, the joint display of the transformed curves and the interpretation of ongoing processes, taking into account the resulting visualization. The key stage of the system interpretation of the obtained data is the transformation of the experimental curves. It makes it possible to identify features in the experimental dependences that are hardly noticeable in direct visual analysis, but important for identifying qualitative changes in the system under study. In the graphic dependences of the curvature of the experimental curves, there is a synchronization of the appearance of qualitative features - the curvature vanishing and curvature extrema. Features appear almost simultaneously, in narrow time windows. This fact allows giving a systematic interpretation of the phenomena under study. The main systemic features are the unity of the tempo-rhythms of system-structural changes in the binder dough, associated with the unity of their causes - geometric changes in the dual structure of the binder dough - the solid phase and the liquid phase of the induced geometry formed by layers of free and bound water. The system-structural interpretation of the ongoing changes makes it possible, in particular, to identify the stages of the proposed topological changes in the solid phase - the formation of a conducting structure (core) of a percolation cluster of the solid phase, the fouling of the conducting structure with single-connected elements (dead ends), the transformation of single-connected fragments into doubly connected fragments participating in conducting effects. These changes determine the conductive properties with respect to ultrasonic pulses. In parallel with these transformations and almost simultaneously, the induced structure of the liquid and surface phases is transformed, which is directly related to changes in other physical properties. The temporal unity of these changes is a manifestation of the systemic nature of the ongoing processes. The proposed method for processing experimental data has an applied aspect associated with indirect methods for determining the setting time from the transformed ultrasound velocity curves and the electrical properties of the composite binder dough.*

**Key words:** gypsum composites, hardening, system mechanisms, curvature

**Сергій Крячок<sup>1</sup>, Вадим Беленок<sup>2</sup>, Валерій Гладілін<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії картографії та землеустрою  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: geodesist2015@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5633-1501>. ResearcherID: N-3061-2016

<sup>2</sup>кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри аерокосмічної геодезії та землеустрою  
Національний авіаційний університет (Київ, Україна).

E-mail: belenok.vadim@nau.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5357-7493>. ResearcherID: AAF-1013-2021

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії та землеустрою  
Білоцерківський національний аграрний університет (Біла Церква, Україна)

E-mail: vgladilin.55@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0492-3510>. ResearcherID: EWG-8288-2022

**ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ  
ДЕФОРМАЦІЙ ВІДНОВЛЕНИХ СПОРУД**

*Пошкоджені в наслідок обстрілів споруди можуть бути відновлені. Однак, через сторонню дію несуча спроможність основ, стійкість конструкцій таких споруд може бути порушена. Тому по завершенню відновлювальних робіт доцільно вести моніторинг за їх станом.*

*Аналіз нормативних документів з питань моніторингу технічного стану об'єктів дозволяє визначити особливості проведення геодезичного моніторингу його деформації.*

*Метою статті є аналіз можливостей відомої універсальної роботизованої системи для її застосування з метою контролю деформацій відновлених об'єктів.*

*Розглянуто склад, принцип роботи та застосування роботизованої системи, яка може бути застосована для контролю за деформаціями основ, фундаментів відновлених споруд та їх частин, інженерних мереж та об'єктів інфраструктури.*

**Ключові слова:** геодезичний моніторинг, роботизована система, порушені споруди, деформації споруд.

*Рис.: 7 Бібл.: 8.*

**Актуальність теми дослідження.** Наразі об'єкти енергетики, промислові споруди, торговельні центри, житлові будинки зазнають повних або часткових руйнувань внаслідок обстрілів. Пошкоджені споруди можуть бути відновлені. Однак, через дію вибухової хвилі, струс від розривів боєприпасів, падіння уламків збитих засобів ураження несуча спроможність основ, стійкість конструкцій таких споруд може бути порушена.

**Постановка проблеми.** Геодезичне забезпечення супроводжує процес будівництва споруд на стадії проектування та її зведення [1, 2, 3]. У випадку пошкодженої споруди обстеження та оцінки її технічного стану виконуються згідно з [4], а геодезичні роботи під час відновлення споруди виконуються у відповідності з нормативним документом [2]. Після завершення відновлювальних робіт, враховуючи попередню значну сторонню дію на конструкцію споруди та її основу, доцільно вести моніторинг за її станом. Це особливо важливо для висотних споруд, споруд значної протяжності та унікальних споруд, руйнування яких може призвести до людських жертв та значних економічних збитків.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Моніторинг – нагляд за технічним станом об'єкта, його частин, окремих конструкцій або основ з оцінюванням їх деформацій та несучої здатності, стійкості та придатності до експлуатації [5]. Згідно з нормативним документом [4] моніторинг технічного стану об'єктів та їх конструкцій виконується шляхом періодичного або безперервного спостереження і контролю. За результатами спостережень прогнозується подальший розвиток негативних процесів. Періодичність контролю визначається з урахуванням максимально можливої швидкості зміни контрольованого параметру та співвідношення вартості цих робіт до можливих збитків від несвоєчасного виявлення пошкоджень. Методика та обсяг спостережень, які включають виміри, повинні забезпечити достовірність і повноту отриманої інформації. Це дозволяє підготувати обґрунтовані висновки щодо поточного технічного стану об'єкту спостережень та короткостроковий прогноз щодо його стану.

Важливим елементом моніторингу технічного стану об'єкту є проведення геодезичного моніторингу його деформацій. Геодезичний моніторинг включає в себе елементи вимірювань, фіксацію результатів та аналітичну обробку отриманих даних. Геодезичному моніторингу підлягають: основи, фундаменти, конструкції будівель та споруд або їх частини, інженерні мережі, підземні споруди, об'єкти інфраструктури, що їх оточують [2]. Під час геодезичного моніторингу визначають наступні характеристики деформацій. Для основ: вертикальні деформації та горизонтальні зміщення ґрунту. Для фундаментів: абсолютне осідання, середнє осідання; нерівномірне осідання, відносне нерівномірне осідання. Для наземної частини споруди: відхилення від вертикалі (крен) споруди в цілому, будівельних конструкцій (осей колон, стін, ліфтових шахт тощо); деформації колон та інших бетонних конструкцій; розкриття тріщин та динаміку їх розвитку [2]. Для вимірювання нахилів фундаменту та їх нерівномірного осідання рекомендовано використовувати стаціонарну гідростатичну систему, для відхилення від вертикалі, коливань і кручення верху будівлі (споруди) - систему вимірювання коливань і нахилів споруди або стаціонарну автоматизовану систему на основі давачів кута відхилення від вертикалі [2].

**Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми.** В наведених нормативних документах визначення деформацій споруд спирається на традиційні методи інженерної геодезії: геометричне (гідростатичне, гідродинамічне) нівелювання, лінійно-кутові вимірювання, створні способи та фотограмметричні методи. Наразі використовуються: GPS-координування – для дослідження деформацій багатоповерхівок, наземне лазерне сканування – для визначення кренів споруд, інклінометри – для контролю горизонтального зміщення споруди, роботизовані тахеометри – для визначення просторових деформацій несучих та огорожувальних конструкцій [6,7]. Недослідженим є застосування автономних роботизованих систем геодезичного моніторингу деформацій, котрі інтегрують сучасні засоби інженерної геодезії, для контролю деформацій відновлених об'єктів.

**Мета статті.** Головною метою цієї статті є аналіз можливостей відомої універсальної роботизованої системи для її застосування з метою контролю деформацій відновлених об'єктів.

**Виклад основного матеріалу.** В джерелі [8] наведено системи моніторингу зсувів та деформацій 3DeMoN. Система моніторингу 3DeMoN - автономна і автоматична платформа моніторингу, що складається з ряду станцій моніторингу, розподілених на об'єктах моніторингу (наприклад, зсув ґрунту, міст або будівля) і підключених до одного або декількох цифрових (наприклад, GPS-приймачів або лазерних віддалемірів), або аналогових давачів (наприклад, інклінометрів, тензодатчиків і т.д.) і центральної серверної станції. Центральний сервер забезпечує збір, зберігання даних, управління конфігурацією станцій моніторингу, автоматичну обробку даних та контроль за коректною роботою мережі.

Архітектура Центру управління 3DeMoN базується на сучасному об'єктно- та компонентно-орієнтованому дизайні і реалізована за допомогою мови програмування Java™, що відповідає стандартам Java™ 2 Enterprise Edition (J2EE). Базова структура програми може бути розширена, відповідно до вимог кожного конкретного проекту моніторингу, програмними компонентами, що підключаються, специфічними для певного комунікаційного пристрою.

Перший вимірювальний пристрій, який був інтегрований в платформу 3DeMoN - це одно частотний L1 GPS-приймач. Він має точність визначення координат: абсциси та ординати  $\pm 2$  мм, аплікати  $\pm 4$  мм. Можна встановлювати на об'єкті моніторингу одну або декілька автономних вимірювальних станцій GPS-роверів (рис. 1.), а також одну або декілька опорних GPS-станцій. Опорні станції повинні бути розташовані у стабільних

місцях, поза межами об'єкту моніторингу та рухомих об'єктів. Дані про фазу несучої частоти з супутників GPS синхронно збираються всіма вимірювальними станціями мережі та автоматично завантажуються на центральну серверну станцію. Нарешті, автоматична служба статичної постобробки даних GPS виконує всі необхідні перетворення, повторну вибірку і базові розрахунки, повертаючи відносні 3D-координати точок моніторингу як кінцевий результат кожної вимірювальної кампанії. Система здатна автоматично виконувати повний цикл збору, передачі та постобробки даних.



*Рис. 1. Вимірювальна станція 3DeMoN на об'єкті моніторингу: GPS-ровер з сонячною батареєю [8]*

3DeMoN-Laser - це система на основі лазерного віддалеміра, яка дозволяє виконувати безперервні та автономні вимірювання відстані з міліметровою точністю на відстані до 1000 м (рис. 2, а). Типова конфігурація віддаленої системи 3DeMoN-Laser складається зі станції моніторингу DeMoN, яка здатна керувати трьома лазерними приладами. У разі встановлення на відкритому повітрі лазерні прилади зазвичай монтуються в захисній кабіні (рис. 2, б). При безпосередньому підключенні до мережі, наприклад, у випадку локальної системи моніторингу всередині будівлі, то до 160 лазерних приладів можуть бути інтегровані в одну мережу, поєднуючись через шину і з'єднання Інтернет.

Система 3DeMoN-Laser може бути застосована в різних сферах моніторингу, таких як зсуви, осідання ґрунту, нестабільність схилів, моніторинг тунелів, та будівель, контроль рівня води в резервуарах або в інженерній геодезії, де необхідно проводити вимірювання відстаней з міліметровою точністю.

Основні характеристики системи 3DeMoN-Laser: максимальна вимірювана відстань 1 км, час вимірювання 0.2 - 4 с, точність вимірювання відстані (стандартне відхилення) складає  $\pm 0,2$  мм (вимірювання в приміщенні) та  $\pm 1,5$  мм (зовнішні вимірювання).

Прилад ROBOVEC базується на лазерному віддалемірі, встановленому на двовісній модульній конструкції для горизонтальної та вертикальної орієнтації вимірювального приладу. Прилад здатний вимірювати варіацію відстаней і варіації відхилення горизонтальних і вертикальних кутів. Крім того, під час кожного вимірювання визначається і

зберігається температура повітря і потужність відбитого сигналу. Прилад керується через Інтернет-з'єднання і тому може бути легко інтегрований в існуючі системи моніторингу через дротову або бездротову локальну мережу (рис. 3, а). Під час вимірювання ROBOVEC може виконати повне сканування рівня відбитого сигналу на обраних цілях. Отримані дані потім автоматично обробляються за допомогою програмного забезпечення та власних алгоритмів.



Рис. 2. 3DeMoN-Laser: а) - установка з двома лазерними приладами та станцією моніторингу з сонячним живленням; б) – установка в захисній кабіні [8]

Це дозволяє розраховувати координати центру нової цілі та слідкувати за рухомими цілями (наприклад, на зсуві). На рис. 3, б показано типове зображення рівня відбитого сигналу з результатами роботи алгоритму центрушукача цілі (візирної марки).

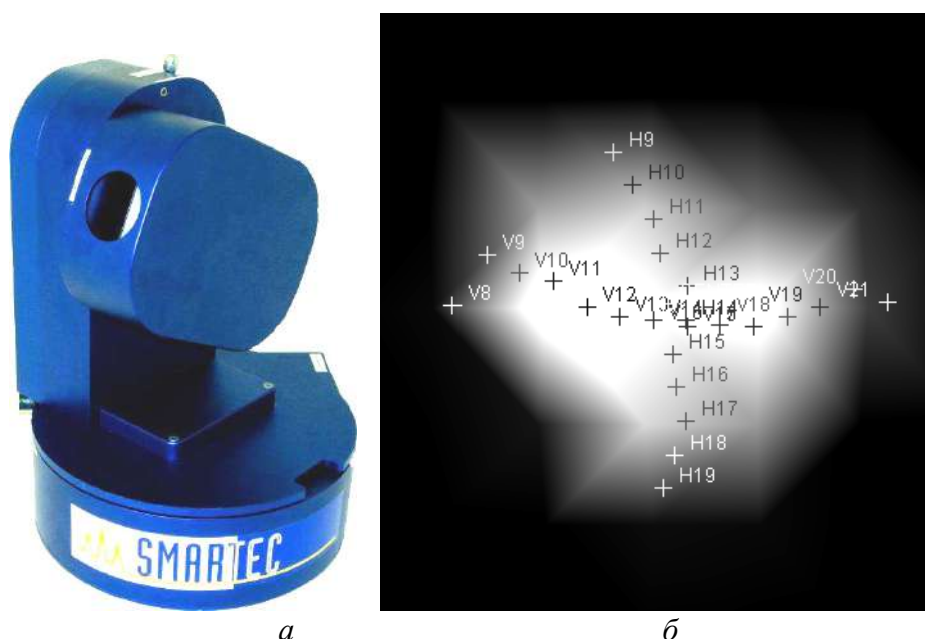


Рис. 3. Прилад ROBOVEC: а) – зовнішній вигляд; б) – результат роботи алгоритму пошуку центру марки [8]

На відстанях менше 50 м ROBOVEC може працювати у без рефlectorному режимі, то окрім зйомки та моніторингу, він може також використовуватися для інших задач, наприклад, отримання профілів або сканування поверхонь.

Платформу 3DeMoN було залучено для моніторингу даху метрополітену. Метрополітен Галіфакс (Швейцарія) – це мультирозважальний центр, спортивний об'єкт та виставковий центр, з'єднаний зі Світовим центром торгівлі та конференцій (рис. 4). Наразі він має місткість на 10595 глядачів. З часу будівництва арени наприкінці 1970-х років проектні навантаження значно зросли. Спостерігається постійне та зростаюче використання підвісного обладнання для світла та звуку, збільшуючи навантаження на несучі конструкції [8].

Власники метрополітену в Галіфаксі вирішили провести структурне дослідження конструкції даху і забезпечити засоби для ефективного моніторингу фактичних снігових навантажень і управління розважальними навантаженнями, підвішеними до даху.



Рис. 4. Зовнішній вигляд Метрополітен Галі факс [8]

Була встановлена комплексна система моніторингу стану конструкції, що поєднує в собі волоконно-оптичні давачі і блок ROBOVEC, яка надає інформацію про стан конструкції даху в реальному часі (рис. 5, рис. 6).

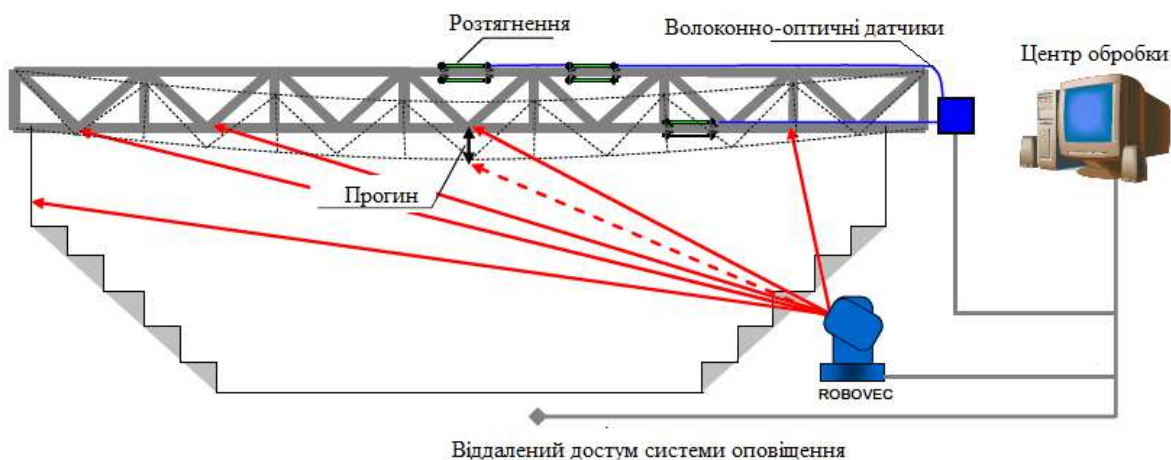


Рис. 5. Конфігурація системи моніторингу [8]

Блок зчитування волоконно-оптичних давачів і прилад ROBOVEC підключені до існуючої локальної мережі, а спеціальний комп'ютер керує давачами, збором даних і вимірюваннями. Дані деформації волоконно-оптичних давачів автоматично компенсуються за допомогою відповідних температурних давачів, в той час як вимірювання кута нахилу і відстані автоматично перетворюються в значення прогину.

Попередження та сигнали тривоги динамічно генеруються за досягнення заданих порогових значень деформації в балках або порогових значень прогину ферм.

*а**б*

*Рис. 6. Елементи системи моніторингу: а) – ROBOVEC встановлений на колоні в центрі станції метро; б) - центральний вимірювальний пункт зі спеціальним комп'ютером (ліворуч) та волоконно-оптичним блоком зчитування [8]*

Повідомлення про ці події надсилаються електронною поштою певній кількості осіб з персоналу охорони будівлі, а також у вигляді світлової сигналізації в диспетчерській. На рис. 7 показані відхилення, виміряні за допомогою ROBOVEC протягом 2 тижнів.



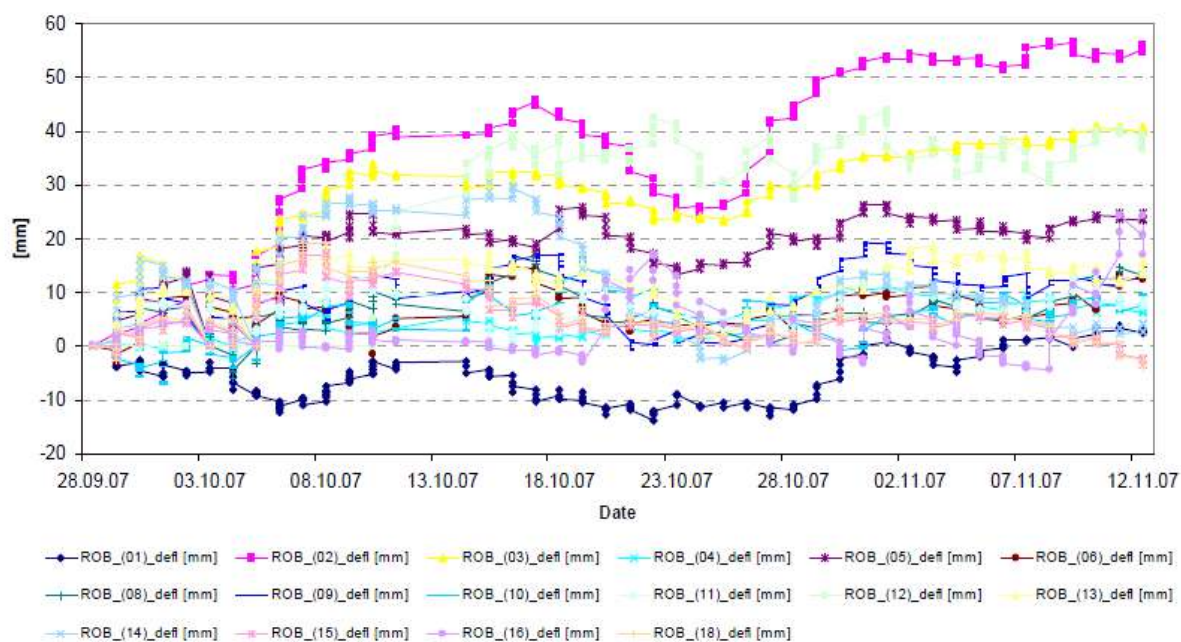


Рис. 7. Графіки вимірних прогинів [8]

Прилад виконує повне сканування всіх деформаційних марок кожні 6 годин, тоді як 36 волоконно-оптичних датчиків виконують сканування кожні 15 хвилин.

**Висновки відповідно до статті.** Розглянуто склад, принцип роботи та застосування роботизованої системи моніторингу зсувів та деформацій 3DeMoN, яка дозволяє оперативно та з міліметровою точністю визначати параметри зсувів, деформації споруд та навколишніх об'єктів. Така чи подібна автономна та автоматична універсальна роботизована платформа може бути застосована для контролю за деформаціями основ, фундаментів відновлених споруд та їх частин, інженерних мереж та об'єктів інфраструктури, що їх оточують.

#### Список використаних джерел

1. ДБН А. 2.2-3:2014. Зміна № 2. Склад та зміст проектної документації на будівництво. – Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2022. – 18 с.
2. ДБН В 1.3-2:2010. Зміна № 1. Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Геодезичні роботи у будівництві. – Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2018. – 32 с.
3. Modern Technologies of Geodetic Support of Planning Works in High-Rise Construction [Electronic resource] / O. Novomlynets, O. Tereshchuk, S. Kryachok, V. Belenok, H. Shaty, V. Gladilin // Geodetski list. – 2022. – Vol. 76 (99). № 1. – P. 71-86. – Accessed mode: <https://hrcak.srce.hr/en/clanak/398796>.
4. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 44 с.
5. ДБН В.1.2-5:2007. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів. – Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2007. – 12 с.
6. Смолій, К. Аналіз сучасних геодезичних та геотехнічних методів моніторингу за деформаціями інженерних споруд / К. Смолій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2015. – № 1 (29). – С. 87-89.
7. leica Geosystems. [Electronic resource]]. – Accessed mode: <https://ngc.com.ua/ua/info/monitoring-obyektov.html>.

8. Manetti, L. 3-Demon Monitoring Platform: Examples of applications in structural and geotechnical monitoring projects / L. Manetti, D. Inaudi, B. Glisic // 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering : Book of Papers. (Lisbon, 12 – 15 May 2008). – Lisbon, 2008. – P. 1-14.

### References

1. State building regulations. (2022). SBR A. 2.2-3:2014. Shift №2. *Composition and content of project documentation for construction*. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Economy of Ukraine.
2. State building regulations. (2018). SBR V 1.3-2:2010. Shift №1. *System for ensuring the accuracy of geometric parameters in construction. Geodetic works in construction*. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Economy of Ukraine.
3. Novomlynets, O., Tereshchuk, O., Kryachok, S., V. Belenok, V., Shatyi H. & Gladilin, V. (2022). Modern Technologies of Geodetic Support of Planning Works in High-Rise Construction. *Geodetski list*, 76(99), 1, 71-86. <https://hrcak.srce.hr/en/clanak/398796>
4. State Standard of Ukraine. (2017). SSTU-N B V.1.2-18:2016. *Guidelines for the inspection of buildings and structures to determine and assess their technical condition*. Kyiv: DP «UkrNDNTS» of Ukraine.
5. State building regulations. (2007). SBR V.1.2-5:2007. *Scientific and technical support of construction objects*. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Economy of Ukraine.
6. Smoliy, K. (2015). Analysis of modern geodetic and geotechnical methods of monitoring deformations of engineering structures. *Modern achievements of geodetic science and production*, 1(29), 87-89.
7. leica Geosystems. (2023). *ngc.com.ua*. <https://ngc.com.ua/ua/info/monitoring-obyektov.html>
8. Manetti, L., Inaudi, D., & Glisic, B. (2008). 3-Demon Monitoring Platform: Examples of applications in structural and geotechnical monitoring projects. Book of Papers, 4th *IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, Lisbon, 12 – 15 May 2008, 1 – 14.

Отримано 21.07.2023

UDC 528.4

**Sergiy Kryachok<sup>1</sup>, Vadym Belenok<sup>2</sup>, Valery Gladilin<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** geodesist2015@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5633-1501>. **ResearcherID:** N-3061-2016

<sup>2</sup>PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of the Aerospace Geodesy and Land Management

National Aviation University (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [belenok.vadim@gmail.com](mailto:belenok.vadim@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5357-7493>. **ResearcherID:** AAF-1013-2021

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Geodesy and Land Management,

Bila Tserkva National Agrarian University (Bila Tserkva, Ukraine)

**E-mail:** [vgladilin.55@gmail.com](mailto:vgladilin.55@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0492-3510>. **ResearcherID:** EWG-8288-2022

## APPLICATION OF GEODETIC MONITORING TO CONTROL DEFORMATIONS OF RECONSTRUCTED STRUCTURES

*Currently, energy facilities, industrial buildings, shopping centers, and residential buildings are completely or partially destroyed as a result of shelling. Due to extraneous impact, the bearing capacity of foundations and structural stability of such structures may be disturbed.*

*The inspection, assessment of the technical condition of the damaged structure and its restoration are carried out in accordance with the existing regulatory documents. After completion of restoration works, taking into account the previous significant extraneous impact on the structure and its foundation, it is advisable to monitor their condition. This is especially important for high-rise structures, structures of considerable length and unique structures, the destruction of which may result in human casualties and significant economic losses.*

*The analysis of normative documents on monitoring of technical condition of objects and their structures allows determining the ways of monitoring, the criterion of its periodicity. An important element of monitoring the technical condition of the object is geodetic monitoring of its deformations.*

*The purpose of the article is to analyze the capabilities of the well-known universal robotic system for its application to control the deformations of restored objects.*

*The 3DeMoN robotic shear and deformation monitoring system consists of a number of monitoring stations distributed at the monitoring object and connected to one or more digital devices (GPS receivers, laser range finders) or analog sensors (inclinometers, strain gauges, fiber-optic sensors, etc.) and a central server station. The central server station provides data collection, data storage, configuration management of monitoring stations, automatic data processing and control over the correct operation of the network. This allows to quickly and with millimeter accuracy determine the parameters of landslides and deformations of structures and surrounding objects.*

*Such or similar autonomous and automatic universal robotic system can be applied to control deformations of the bases, foundations of restored structures and their parts, engineering networks and infrastructure objects that surround them.*

**Key words:** *geodetic monitoring, robotic system, deformation of the building.*

*Fig.: 7. Bibl.: 8.*

**Денис Кухтар<sup>1</sup>, Роксолана Олесків<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії та землеустрою  
Інституту будівництва, архітектури та енергетики  
Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу  
(м. Івано-Франківськ, Україна)

E-mail: [denys.kukhtar@nung.edu.ua](mailto:denys.kukhtar@nung.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2839-4318>

<sup>2</sup> кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії та землеустрою  
Інституту будівництва, архітектури та енергетики  
Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу  
(м. Івано-Франківськ, Україна)

E-mail: [roksolanaoleskiv@gmail.com](mailto:roksolanaoleskiv@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0334-3028>

**МЕТОД ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ РАДАРНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ ДЛЯ  
МОНІТОРИНГУ ТЕРИТОРІЙ ПІДЗЕМНОГО СХОВИЩА ГАЗУ**

*У роботі представлено використання методу диференціальної інтерферометрії для території підземного газосховища, який дозволяє відстежити вертикальний рух топографічної поверхні об'єкту.*

*Представлено результати опрацювання 29 радіолокаційних знімків, отриманих супутником Sentinel-1 за період з червня 2020 р. до травня 2021 р. На основі результатів опрацювання було отримано 28 деформаційних карт, які показують динаміку вертикальних рухів земної поверхні між послідовними зніманнями. Результати узгоджуються з даними наземних досліджень та відповідають сезонним рухам покрівлі газосховища, зумовлених виробничими процесами. Вважаємо застосування методу дистанційного радіолокаційного зондування ефективним для моніторингу короткострокових рухів топографічної поверхні підземного сховища газу.*

**Ключові слова:** підземне газосховище; диференціальна інтерферометрія; інтерферограма; дистанційне зондування; супутникові радіолокаційні знімки; Sentinel-1.

*Рис.: 2. Бібл.: 14.*

**Вступ.** Моніторинг підземних сховищ газу (ПСГ) – це гарантія безперебійної роботи стратегічно важливого об'єкту паливно-енергетичного комплексу. Нові технології дозволяють проводити певні етапи відстеження дистанційними методами неруйнівного контролю, які не потребують зупинки чи зміни режиму експлуатації підприємства, а проводяться незалежно від технологічного процесу об'єкту. Світовий досвід демонструє ефективне використання супутникових знімків для вирішення завдань інженерно-геодезичного моніторингу. Застосування супутникової радіолокаційної інтерферометрії (InSAR), активної технології дистанційного зондування Землі, є потужним інструментом для визначення деформації поверхні та відображення рельєфу на поверхні земної кулі.

Саме дослідження зміни висотного положення топографічної поверхні підземного газосховища є важливим елементом моніторингу. Застосування методики InSAR забезпечує створення суцільної карти вертикальних рухів покрівлі ПСГ. На відміну від дискретних результатів визначення висот реперів, суцільні карти вертикальних деформацій дозволяють виявляти небезпечні прояви: тріщинуватості покрівлі, розгерметизації, зміни агроландшафтів тощо. Зокрема, в багатьох випадках, неналежна експлуатація ПСГ призводить до його розгерметизації, що зумовлює загазованість повітря, проникнення газохімічних сполук у водоносні горизонти, а також виникнення небезпечних зсувних та ерозійних процесів, що викликає зміни ландшафтів природно-територіальних комплексів [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженням даних супутникової радарної інтерферометрії на важливих енергетичних об'єктах займаються багато науковців. Цікавим є результати такої роботи саме для територій ПСГ [2, 3], аналіз даних якої вказує на виявлення досить чітких змін вертикального переміщення топографічної поверхні з точністю до міліметрів. Результати показують високу кореляцію між періодичним закачуванням і відбором природного газу в/з підземного резервуара та періодичними змінами висоти місцевості над ним (амплітуда змін висоти в сантиметрах), що може дозволити виявити аномальні явища.

Окрім очевидних переваг використання безконтактних методів спостереження, супутникова радарна інтерферометрія забезпечує високу точність та просторову щільність результатів спостережень. За результатами опрацювання, отримують карти вертикальних рухів досліджуваної території. Наявність доступу до баз даних супутникових знімків дозволяє створювати набори даних для аналізу геодинамічної активності території в минулому, а також визначати швидкість переміщення окремих ділянок. Метод використовується для моніторингу природних небезпек, наприклад, землетрусів, виверження вулканів, зсувів; також у структурному проектуванні, зокрема моніторинг просідання та структурної стабільності [4].

Вертикальні переміщення території ПСГ можна відстежити контактними геодезичними методами (геометричне нівелювання, ГНСС вимірювання) [5]. Поєднання дистанційних та наземних методів моніторингу газотранспортної системи та територій підземних сховищ газу удосконалює процес відстеження та виявлення змін у положенні характерних точок рельєфу.

**Методи дослідження.** Для створення карт вертикальних рухів земної поверхні, на основі супутникових радіолокаційних даних, застосовують два основні підходи: метод диференціальних інтерферограм (DInSAR) [6,7,8] та удосконалений метод диференціальних інтерферограм (A-DInSAR) [9]. Створення диференціальної інтерферограми (Differential InSAR) виконується на основі опрацювання двох радіолокаційних знімків певної території із застосуванням цифрової моделі рельєфу. Принципова відмінність удосконаленого методу диференціальних інтерферограм полягає в опрацюванні часової серії, яка складається з десятків радіолокаційних знімків. У залежності від особливостей опрацювання часових серій знімків, розрізняють методи постійних розсіювачів (PS – Persistent Scatterers Method), коротких базисних ліній (SBAS – Small Baseline Subset). Розв'язок багатьох задач потребує комбінації вказаних підходів [10, 11].

Кожен із вказаних методів має свої переваги та недоліки. Тому вибір методу досліджень проводиться на основі аналізу особливостей об'єкту спостережень, наявності вхідних даних та додаткових даних для верифікації результатів.

**Метою** даного дослідження є оцінка ефективності застосування методу диференціальної радіолокаційної інтерферометрії для реєстрації вертикальних рухів земної поверхні на території підземного сховища природного газу.

**Об'єктом дослідження** є територія Богородчанського підземного сховища газу. Вхідними даними для проведення дослідження були радіолокаційні знімки, отримані супутником Sentinel-1, який запущений та функціонує в рамках європейської програми Copernicus. Мінімальний інтервал часу між зніманнями досліджуваної території супутником Sentinel-1 становить 12 днів. Політика відкритого доступу, яка ведеться програмою Copernicus, забезпечує можливість вільного використання даних дистанційного зондування, у тому числі даних супутникових радіолокаційних спостережень.

Порівняння результатів опрацювання диференціальних інтерферограм з результатами незалежних спостережень не проводилось через відсутність додаткових даних наземних вимірювань (часові серії GNSS даних, геометричне нівелювання). Тому інтерпретацію вертикальних рухів на території підземного сховища газу проводили на основі даних про сезонні цикли закачування та викачування газу із газосховища [5]. Для дослідження сезонних вертикальних рухів земної поверхні було обрано період з червня 2020 р. до травня 2021 р. Вказаний період відповідає річному циклу роботи газосховища: розпочинається із закачування газу до сховищ влітку; восени, з початком опалювального сезону, розпочинається відбір газу, який триває до завершення опалювального сезону навесні. Згідно даних АТ «Укртрансгаз» у 2020 році підземні сховища газу в Україні

були заповнені на 82,8%, що в середньому на 30% перевищило показники попередніх та наступних років [12]. Тому, з урахуванням великих обсягів закачування газу, нами очікувалась значна геодинамічна активність поверхні над територією газосховища в період 2020-2021 рр.

Для вказаного періоду часу (червень 2020 р. – травень 2021 р.), до опрацювання було взято 29 супутникових радіолокаційних знімків, отриманих супутником Sentinel-1A, з часовим інтервалом між зніманнями 12 днів. Тип даних – SLC (Single Look Complex Product); режим знімання IW (Interferometric Wide Mode) – широкосмугова інтерферометрія з роздільною здатністю знімка 5\*14 м. Для кожної послідовної пари знімків створювалась диференціальна інтерферограма та карта вертикальних рухів території газосховища і прилеглих територій. Загалом отримано 28 деформаційних карт, які показують динаміку вертикальних рухів земної поверхні між зніманнями.

**Результати.** Відомо, що метод диференціальної радарної інтерферометрії особливо ефективно показує себе у випадку різких просторових рухів земної поверхні впродовж короткого проміжку часу. Прикладами таких ситуацій є зсуви ґрунту, деформації земної поверхні внаслідок землетрусів та вулканічної активності, інші геодинамічні процеси. Ефективність визначення рухів земної поверхні досягається завдяки короткому часовому базису між радарними знімками, мінімальне значення якого становить 12 днів.

Застосування даного методу для території підземного сховища газу показало відсутність аномальних вертикальних переміщень. Суттєвих вертикальних рухів земної поверхні за 12-денні інтервали не відбувалося. Згідно результатів аналізу 28 диференціальних інтерферограм (на основі 29 радіолокаційних знімків) та карт вертикальних рухів земної поверхні, досліджувана територія показувала однакову динаміку з усіма довколишніми ділянками за межами газосховища. Територія промислового майданчику станції, на кожній деформаційній карті, характеризувалася відносною стабільністю, що є свідченням безпеки та експлуатаційної надійності газоперекачувального обладнання.

На кількох картах зафіксовано вертикальні рухи, які вирізнялися із загальної тенденції: точкові осідання при загальній динаміці підняття; підняття окремих ділянок при відсутності вертикальних рухів на решті території.

На рис.1 представлено карту вертикальних рухів земної поверхні території газосховища, отриману методом диференціальної радіолокаційної інтерферометрії на основі супутникового знімання, виконаного 29.07.2020 р. та 10.08.2020 р. В межах контуру газосховища спостерігаємо різну динаміку поверхні: в центральній частині території, в межах промислового майданчику, вертикальні рухи близькі до нуля; в напрямку з південного-заходу на північний-схід території спостерігаємо точкові підняття на рівні 10-15 мм, які співпадають з положенням експлуатаційних свердловин; територія в північно-східній частині зазнала підняття в межах 20-30 мм. Оскільки період спостереження співпадає з режимом закачування газу в сховище, то можемо інтерпретувати отримані результати як піднімання гирла свердловин та окремих територій в результаті збільшення тиску в газосховищі. Величини отриманих значень відповідають результатам геометричного нівелювання, які систематично проводяться на даному газосховищі, та описані в роботі [13].

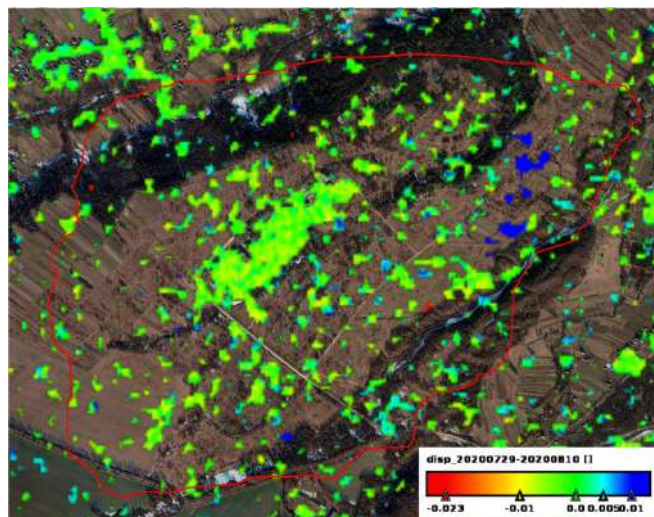


Рис. 1. Карта вертикальних рухів земної поверхні на території газосховища (знімання 29.07.2020 – 10.08.2020): одиниці вимірювання – метри;  
— контур газосховища

На рис.2 представлено карту вертикальних рухів земної поверхні території газосховища, отриману на основі супутникового знімання, виконаного 25.04.2021 р. та 07.05.2021р. Переважна більшість території на отриманій карті стабільна у вертикальному положенні. Також спостерігається тенденція до підняття в межах 10 мм. Але ця тенденція притаманна не лише території газосховища, але й поза його межами. Тому не пов'язуємо цю динаміку з технологічними процесами. Однак, на карті чітко прослідковуються точкові ділянки осідань, які розосереджені на всій території газосховища. Положення цих ділянок відповідає розташуванню свердловин. Величини визначених осідань знаходяться в межах від -15 мм до -19 мм. На окремих свердловинах зафіксовано осідання -23 мм та -26 мм. Період спостереження 25.04.2021-07.05.2021рр. відповідає режиму завершення відкачування газу зі сховища. Об'єми газу, а відповідно і тиск, у цей період мінімальні. Тому спостерігаємо осідання гирл свердловин.

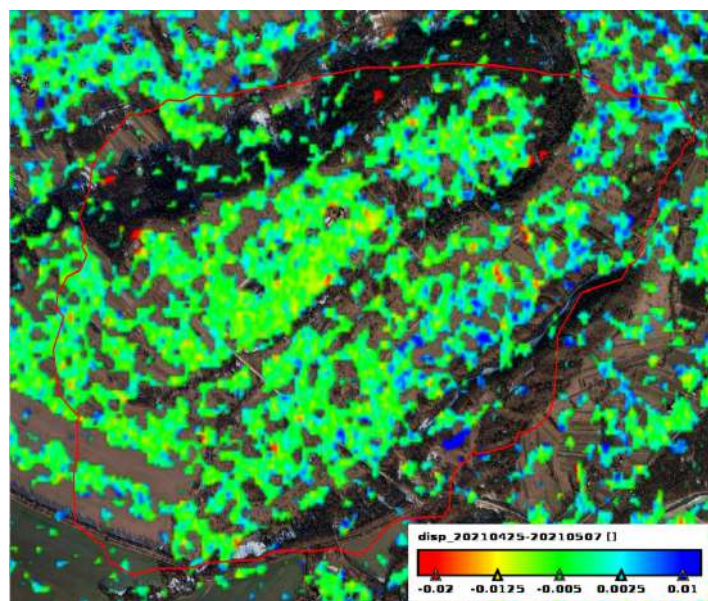


Рис. 2. Карта вертикальних рухів земної поверхні на території газосховища (знімання 25.04.2021 – 07.05.2021): одиниці вимірювання – метри;  
— контур газосховища

За результатами опрацювання кожної пари знімків отримуємо суцільні карти вертикальних рухів земної поверхні. Проте надійність результатів для кожного пікселя карти відрізняється. Вона визначається рівнем когерентності сигналу – відношення прийнятого та відбитого сигналу (0 – найменше значення; 1 – найбільше значення). На рис. 1 і рис. 2 представлено деформаційні карти із значеннями когерентності вище 0,4. Шляхом відсіювання некогерентних точок вдалося виключити з аналізу ненадійні результати. Найбільше значення когерентності досягається при радіолокаційному зніманні територій з будівлями та штучним покриттям, тоді як території з рослинним покривом та лісові масиви мають низький рівень когерентності. Тому, з метою покращення відбиваючої здатності досліджуваної території та пониження шумів відбитого сигналу, рекомендується встановлювати наземні кутові відбивачі на ділянках з рослинним покривом та біля гирл свердловин [14].

### Висновки.

1. Застосування методу диференціальної інтерферометрії, для території Богородчанського підземного сховища газу, показало відсутність швидких вертикальних рухів земної поверхні впродовж річного циклу роботи газосховища.

2. Завдяки застосованому методу, зафіксовано вертикальні рухи (осідання/підняття) гирл експлуатаційних свердловин спричинені циклічним змінам тиску в процесі технічної експлуатації газосховища. Середня величина осідання свердловин в результаті відкачування газу становила 15-19 мм; максимальна величина осідання досягла -26 мм. В період закачування газу до сховища зафіксовано підняття свердловин в середньому на 10-15 мм; максимальна величина підйому досягала +30 мм.

3. Враховуючи малі величини вертикальних рухів покрівлі газосховища та гирл свердловин, вважаємо перспективним використання удосконаленого методу диференціальної інтерферометрії, зокрема метод постійних розсіювачів (Persistent Scatterer Interferometry), що і буде предметом наших подальших досліджень. Важливо доповнювати дані радіолокаційного зондування території результатами наземних вимірів (часові серії ГНСС спостережень, геометричне нівелювання).

4. Для покращення співвідношення сигнал-шум на радіолокаційних знімках для територій підземного сховища газу рекомендуємо встановлювати наземні кутові відбивачі різних конструкцій. Це особливо важливо в місцях розташування гирл свердловин та вздовж основних ліній геометричного нівелювання.

### Список використаних джерел

1. Олесків, Р. Є. Дослідження напружено-деформованого стану свердловин підземних сховищ газу на основі геодезичних вимірів : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.24.01 / Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ : КНУБА, 2017.

2. Rapant, P. Radar Interferometry as a Comprehensive Tool for Monitoring the Fault Activity in the Vicinity of Underground Gas Storage Facilities / P. Rapant, J. Struhárand, M. Lazický // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12, Is. 2. – P. 271. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12020271>.

3. Monitoring Non-Linear Ground Motion above Underground Gas Storage Using GNSS and PS InSAR Based on Sentinel-1 Data. / J. Struhár, P. Rapant, M. Kačmařík, I. Hlaváčová M. Lazický // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, Is. 19. – P. 4898. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14194898>.

4. Гордієнко, О. Метод супутникової радарної інтерферометрії [Електронний ресурс] / О. Гордієнко // GEOTERRACE-2018 : Міжнар. наук.-тех. конф. молод. вчених (м. Львів, 13-15 груд. 2018). – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2018. – Режим доступу: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/24699/1/GeoTerrace-2018.pdf>

5. Perovych, L. Seasonal deformation processes at underground gas storage station. Baltic surveying / L. Perovych, S. Begin // International scientific journal. – 2017. – Vol. 6. – P. 83-86.



6. Subsidence activity maps derived from DInSAR data: Orihuella case study / M. P. Sanabria, C. Guardiola-Albert, R. Tomás, G. Herrera, A. Prieto, H. Sánchez, S. Tessitore // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2014. – Vol. 14, Is. 5. – P. 1341-1360. Di: <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1341-2014>.
7. Cyntia, C. Subsidence analysis in DKI Jakarta using Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR) Method / C. Cyntia, I. P. Pudja // *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability*. – 2018. – № 2(3). – P. 118-127.
8. Suhadha, A. G. Dynamic Displacement using DInSAR of Sentinel-1 in Sunda Strait / A. G. Suhadha, A. Julzarika // *Trends in Sciences*. – 2022. – № 19 (13). – P. 4623. DOI: <https://doi.org/10.48048/tis.2022.4623>
9. Advanced differential interferometry synthetic aperture radar techniques for deformation monitoring: a review on sensors and recent research development / M. O. Idrees, S. Vahideh, P. Biswajeet, Y. Ahmed // *Geocarto International*. – 2014. – № 29 (5). – P. 536-553.
10. Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel-1 Data to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovičky Landslide, Czech Republic / K. Fárová, J. Jelének, V. Kopačková-Strnadová, P. Kycl // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11, Is. 22. – P. 2670. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11222670>.
11. Pawluszek-Filipiak, K. Integration of DInSAR and SBAS Techniques to Determine Mining-Related Deformations Using Sentinel-1 Data: The Case Study of Rydułtowy Mine in Poland / K. Pawluszek-Filipiak, A. Borkowski // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, № 2. – P. 242. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12020242>.
12. АТ «Укртрансгаз». ГТС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://surl.li/kjlum>, <http://utg.ua/utg/gts/description/>
13. Олесків Р.С. Прогнозна модель вертикальних рухів земної поверхні / Р. С. Олесків, В. М. Сай // *Геодезія, картографія та аерофотознімання*. – 2015. – Вип. 81. – С. 82-89.
14. Кухтар, Д. Застосування наземних кутових відбивачів для супутникового радіолокаційного моніторингу [Електронний ресурс] / Д. Кухтар, В. Яцик // *Геофорум-2023 : матеріали Міжнар. наук.-тех. конф. (м. Львів, 19-21 квіт. 2023)*. – Львів, 2023. – С. 65-66. – Режим доступу: <http://surl.li/kjnfa>

### References

1. Oleskiv, R. Ye. (2017). Investigation of stress-strain state of underground gas storage wells based on geodetic measurement [dissertation on acquisition of PhD scientific degree by specialty 05.24.01 – Kyiv National University of Construction and Architecture. MSE of Ukraine, Kyiv].
2. Rapant, P., Struhar, J. and Lazecky, M. (2020). Radar Interferometry as a Comprehensive Tool for Monitoring the Fault Activity in the Vicinity of Underground Gas Storage Facilities. *Remote Sensing*, 12, 2:271. <https://doi.org/10.3390/rs12020271>.
3. Struhar, J., Rapant, P., Kacmarik, M., Hlavacova, I. and Lazecky, M. (2022). Monitoring Non-Linear Ground Motion above Underground Gas Storage Using GNSS and PS InSAR Based on Sentinel-1 Data. *Remote Sensing* 14, 19:4898. <https://doi.org/10.3390/rs14194898>.
4. Gordienko, A. (2018). Satellite radar interferometry method. *Proceedings of international conference of young scientists GeoTerrace-2018*. December 13–15, 2018, Lviv, Ukraine. Lviv, 2018. P.88-22.
5. Perovych, L., Begin, S. (2017). Seasonal deformation processes at underground gas storage station. Baltic surveying. *International scientific journal*, 6, 83-86.
6. Sanabria, M. P., Guardiola-Albert, C., Tomás, R., Herrera, G., Prieto, A., Sánchez, H. and Tessitore, S. (2014). Subsidence activity maps derived from DInSAR data: Orihuella case study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1341–1360. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1341-2014>.
7. Cyntia, C., & Pudja, I. P. (2018). Subsidence analysis in DKI Jakarta using Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR) Method. *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability*, 2(3), 118-127.
8. Suhadha, A. G. & Julzarika, A. (2022). Dynamic Displacement using DInSAR of Sentinel-1 in Sunda Strait. *Trends in Sciences*, 19(13), 4623. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.4623>

9. Idrees, M. O., Vahideh, S., Biswajeet, P. and Ahmed, Y. (2014). Advanced differential interferometry synthetic aperture radar techniques for deformation monitoring: a review on sensors and recent research development. *Geocarto International*, 29(5), 536-553.

10. Farova, K., Jelenek, J., Kopackova-Strnadova, V. and Kycl, P. (2019). Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel-1 Data to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovicky Landslide, Czech Republic. *Remote Sensing*, 11, 22:2670. <https://doi.org/10.3390/rs11222670>.

11. Pawluszek-Filipiak, K. and Borkowski, A. (2020). Integration of DInSAR and SBAS Techniques to Determine Mining-Related Deformations Using Sentinel-1 Data: The Case Study of Rydułtowy Mine in Poland. *Remote Sensing*, 12, 2:242. <https://doi.org/10.3390/rs12020242>.

12. Ukrtransgaz JSC. (n.d.). <http://utg.ua/utg/gts/description/>

13. Oleskiv, R. Ye., Sai, V.M. (2015) Predictive model of vertical movements of the Earth's surface. *Geodesy, Cartography and Aerial Survey: Interdepartmental scientific and technical collection*, 81, 82-89.

14. Kukhtar, D., Yatsyk, V. (2023). Application of ground corner reflectors for satellite radar monitoring. *Proceedings of 26th International Scientific and Technical Conference «Geoforum – 2023»*. April 19–21, 2023. Lviv, 2023. P. 65-66. <http://surl.li/kjnfa>

### **Denys Kukhtar<sup>1</sup>, Roksolana Oleskiv<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> PhD in Technical Sciences, Department Geodesy and Land Management  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
(Ivano-Frankivsk, Ukraine)

E-mail: [denys.kukhtar@nung.edu.ua](mailto:denys.kukhtar@nung.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2839-4318>

<sup>2</sup> PhD in Technical Sciences, Department Geodesy and Land Management  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
(Ivano-Frankivsk, Ukraine)

E-mail: [roksolanaoleskiv@gmail.com](mailto:roksolanaoleskiv@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0334-3028>

## **DIFFERENTIAL RADAR INTERFEROMETRY METHOD FOR MONITORING THE AREAS OF UNDERGROUND GAS STORAGE STATION**

**Abstract.** A complex system of hydrocarbon storage in depleted fields requires uninterrupted control over the safety of operation of a strategically important energy facility. Since the pressure drops in the gas storage have a cyclical nature (gas is pumped up in the fall, and gas is withdrawn in the spring), the vertical movements of the earth's surface (the roof of the storage) that are recorded on the physical surface of the object are also cyclical in nature. Using the method of differential interferometry, it is possible to remotely track the vertical movement of the topographic surface of the object in order to detect dangerous manifestations to prevent the occurrence of critical situations. The work presents the results of processing 29 satellite radar images acquired by the Sentinel-1A satellite, with a 12-day time interval between acquisitions for the period from June 2020 to May 2021. This period is related to the full cycle of the underground gas storage operation: seasonal pumping and gas extraction. For each consecutive pair of images, a differential interferogram was created and a map of vertical movements of the topographic surface of the gas storage and adjacent territories was developed. Finally 28 deformation maps were obtained, which show the dynamics of vertical movements of the Earth's surface between acquisitions. The application of the differential interferometry method for the territory of the Bogorodchany underground gas storage facility showed the absence of rapid vertical movements of the earth's surface during the annual cycle of the gas storage facility, which indicates the stable operation. The average amount of subsidence of the topographic surface of the gas storage as a result of gas pumping was 15-19 mm; the maximum amount of subsidence reached -26 mm. During the period of gas injection, the ground surface of the facility lifted by 10-15 mm; the maximum lifting value reached +30 mm. Such data agree with results of ground measurements, therefore the applied remote sensing method is effective for the topographic surface monitoring of the underground gas storage.

**Keywords:** underground gas storage; differential interferometry; interferogram; remote sensing; satellite radar images, Sentinel-1.

**Олексій Терещук<sup>1</sup>, Світлана Коваленко<sup>2</sup>, Євгеній Сахно<sup>3</sup>, Юлія Щербак<sup>4</sup>,  
Віктор Мовенко<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> кандидат технічних наук, доцент, директор навчально-наукового інституту архітектури, дизайну та геодезії, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка 95, м. Чернігів, 14035, Україна).  
**E-mail:** [olexter1957@gmail.com](mailto:olexter1957@gmail.com) **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6433-9351>  
**ResearcherID:** H-4540-2016 **Google Scholar:** <https://scholar.google.com/citations?user=vZtF4YIAAAAJ&hl=uk>  
**Index Copernicus** - <http://journals.indexcopernicus.com/+++>, p24781806,3.html

<sup>2</sup> кандидат педагогічних наук, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).  
**E-mail:** [svkova70@gmail.com](mailto:svkova70@gmail.com) **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5829-7132> **Researcher ID:** H-4476-2016

<sup>3</sup> доктор технічних наук, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).  
**E-mail:** [evsakhno@ukr.net](mailto:evsakhno@ukr.net) **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9789-7242>.  
**Researcher ID:** M-3987-2016. **SCOPUS Author ID:** 57190493489

<sup>4</sup> викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка 95, м. Чернігів, 14035, Україна).  
**E-mail:** [Shch.Yu15@gmail.com](mailto:Shch.Yu15@gmail.com) **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-3439-3792>  
**ResearcherID:** H-4199-2016

<sup>5</sup> старший викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Національний університет Чернігівська політехніка (вул. Шевченка 95, м. Чернігів, 14035, Україна).  
**E-mail:** [viktor.movenko@gmail.com](mailto: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=YNglHagAAAAAJ&hl=ru>

**ПРОЕКТ ОЗЕЛЕНЕННЯ ТЕРИТОРІЇ ПАРКОВОЇ ЗОНИ «БЕРЕЗОВИЙ ГАЙ»  
У М. ЧЕРНІГІВ**

*У роботі розглянуті завдання реалізації проекту озеленення території паркової зони «Березовий гай» у м. Чернігів, що передбачають: проведення пропагандистсько-просвітницького заходу «Подих рідного міста», спрямованого на підвищення обізнаності школярів, студентів та інших верств населення м. Чернігова у питаннях створення та збереження новостворених зелених насаджень та має на меті об'єднати різні верстви населення навколо озеленення міста, осучаснення та облаштування міських парків і скверів, формування еко-культури та дбайливого ставлення до навколишнього середовища; роботи з вибору ділянки для посадки дерев, закупівлі саджанців та інформування студентів, школярів і мешканців прилеглих територій про можливість долучення їх до робіт з озеленення території дитячого ігрового майданчика, розташованого на території парку відпочинку «Березовий гай».*

**Ключові слова:** озеленення території, зелені насадження, благоустрій, навколишнє середовище.

*Рис. 5. Бібл.: 9.*

**Актуальність теми дослідження.** Санітарно-гігієнічні і мікрокліматичні умови для життя, виробничої діяльності та відпочинку населення України постійно погіршуються через загазованість і заповиленість повітря, особливо в умовах міської території та наявності промислових об'єктів. Відповідно до нормативів із зонування територій населених пунктів, з метою регулювання містобудівної діяльності, передбачено встановлення структурного складу селітебної території на рівні 50% під всі види зелених насаджень, зокрема на одного міського жителя повинно припадати близько 60 м<sup>2</sup> насаджень (у т. ч. 12-24 м<sup>2</sup> насаджень загального користування). Проте, завдання озеленення міст зводиться не тільки до збільшення площі зелених масивів, але і полягає у їх рівномірному розподілі, враховуючи особливості планування території: містить внутрішньоквартальне і внутрішньодворове озеленення, передбачає реконструкцію існуючих парків, скверів, бульварів, садів тощо. В умовах міського середовища важливо забезпечити максимально комфортні природні умови поблизу житла і місця роботи жителів, утворити єдиний ансамбль міста і природи. Міські зелені насадження – зелені фільтри міста – мають особливе значення при очищенні атмосфери міста від забруднень і знижують рівень шуму. В

одних випадках вони захищають міські об'єкти від шкідливих викидів із суміжних районів, в інших – локалізують і поглинають викиди підприємств і транспорту, створювані ними пил і шум на окремих ділянках [1-5].

Одночасно зелені насадження в місті забезпечують виконання санітарно-гігієнічних і декоративно-естетичних функцій. Висадки поблизу промислових об'єктів і житлової забудови, загороджувальних і попереджувальних зон уздовж пішохідних і транспортних магістралей забезпечують санітарно-гігієнічну дію. Тому висадження дерев в зоні дії об'єкта (дороги, будівлі і т. п.) виконують за стандартними схемами, які розроблено з урахуванням біологічних особливостей рослин, з метою досягнення максимального санітарно-гігієнічного ефекту.

**Постановка проблеми.** Вже давно встановлено позитивний вплив зелених насаджень паркових зон на стан здоров'я людини, особливо на дихальну систему. Вони відіграють важливу роль у формуванні навколишнього середовища людини тому, що їм властиво поліпшувати санітарно-гігієнічне становище. Зелені насадження паркових комплексів виступають як середовищеутворюючий природний фактор, що здатний виконувати естетичну, оздоровчу, терморегулюючу функції. Зелені насадження міста Чернігів пройшли тривалий етап формування, переважаючи їх частина насаджувалась у до- та післявоєнний період минулого сторіччя. В центральній частині міста середній вік дерев варіюється в межах 50-70 років, тоді як оптимальний показник складає 40 років, тому подальші зміни вікової структури насаджень носять загрозливий характер. Деревина, на відміну від неживих ресурсів, мають життєвий цикл і час, коли вони здатні найбільш якісно впливати на оточуюче середовище. Крім того, серед деревних насаджень переважають швидкоростучі та недовговічні породи, які з віком втрачають свою декоративність. У близькій перспективі прогнозуються негативні наслідки – значне скорочення кількості зелених насаджень і погіршення безпечності насаджень.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Вирішенню проблеми створення комфортного екологічного середовища в містах України присвячено велика кількість різноманітних нормативно-законодавчих актів, санітарних норм і ДБНів. Крім того, дослідженням даних питань займалися і вітчизняні вчені, такі як Гудак В.А. («Ландшафтний дизайн сучасного природного середовища»), Багацька О.М. («Прийоми та принципи композиції вертикального озеленення в населених пунктах»), Бочаров Ю.П. і Кудрявцев О.К. («Планувальна структура сучасного міста») та ін.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** В сучасному суспільстві накопичено великий досвід із благоустрою та озеленення міст, створений багатий асортимент рослин для озеленення, знайдено специфічні для міст прийоми озеленення, з'ясовано особливості утримання зелених насаджень. Проте, розширення зелених зон міста й надалі залишається надважливою сферою діяльності кожного муніципального утворення, адже саме тут створюються необхідні умови для підвищення рівня життєдіяльності населення, що роблять життя кожної окремої людини комфортним, здоровим, зручним.

**Постановка завдання.** Збільшення кількості транспорту, хаотичні забудови, вплив людської виробничої та рекреаційної діяльності з кожним роком все більше призводить до виникнення малосприятливих умов для життєдіяльності і здоров'я населення міст України. Тому в роботі було поставлено завдання розробити та реалізувати проект озеленення території паркової зони «Березовий гай» у місті Чернігів.

**Виклад основного матеріалу.** Зелені насадження є обов'язковою, невід'ємною і багатофункціональною компонентою урбогенного та техногенного середовища. Вони виконують комплекс захисних, оздоровчих, рекреаційних функцій, стабілізують екологічну рівновагу та відіграють значну роль у вирішенні завдань охорони і поліпшення стану

навколишнього природного середовища. Крім того, зелені насадження не лише покращують естетичний вигляд міста, але знижують інтенсивність негативного впливу сонячної радіації, знижують на 3-5 градусів температуру повітря, а відносну вологість підвищують на 15-40%, виробляють фітонциди – речовини, які зменшують концентрацію оксиду вуглецю на 30%, сірчистого газу – до 70%, оксидів азоту – на 35% [6,7].

Системне планування озеленення населених пунктів здійснюється згідно нормативів, які залежать від адміністративно-територіального статусу, географічного розташування і місцевих умов та містять наступні фактори: кліматичні (температурний режим, напрям і швидкість пануючих вітрів, кількість атмосферних опадів, характер інсоляції), природно-ландшафтні (особливості ґрунтів і рельєфу території, наявність лісових масивів, місце розташування водойм), розміри та народногосподарський профіль, планувальну структуру міст і селищ. При плануванні зелених насаджень загального користування в межах міста, необхідно дотримуватись рівномірного розподілу у окремих районах, пропорційно до щільності населення та на відстані від житла, яка дозволить жителям користуватись ними при мінімальних витратах часу на пересування до таких насаджень.

І хоча Чернігів вважається одним із найзеленіших міст України, стан зеленої зони міста вже давно викликає занепокоєння. Зелені насадження міста пройшли тривалий етап формування, головна частина яких насаджувалась у до- та післявоєнний періоди минулого століття. У центральних частинах міста середній вік деревної рослинності складає приблизно 50-70 років, при оптимальному – 40 років, а подальші зміни у віковій структурі насаджень носять небезпечний характер. Деревя, на відміну від неживих активів, мають обмежений життєвий цикл та час найбільшого впливу на якісні показники стану довкілля. Крім того, серед деревних насаджень переважають швидкозростаючі та недовговічні породи, які з віком втрачають свою декоративність, що у недалекій перспективі призведе до ефекту значного скорочення їх кількості і погіршенню безпечності природно-ландшафтного каркасу.

Аналізуючи проблеми благоустрою паркових зон, які стосуються утримання їх у належному санітарному стані, боротьби зі шкідниками та хворобами рослин, забезпечення висадки нових дерев і кущів та розширення видового різноманіття, виникла необхідність звертання уваги громадськості до даної проблеми. Колективом Національного університету «Чернігівська політехніка» у 2019 році було організовано пропагандистсько-просвітницький захід, який спрямовувався на підвищення рівня обізнаності школярів, студентів та інших верств населення м. Чернігова у питаннях створення та збереження зелених насаджень (проект «Подих рідного міста»). Для реалізації даного проекту та проведення робіт з озеленення, КП «ЗеленБуд» було запропоновано дві ділянки у місті Чернігів [8].

Варіант 1. Озеленення території в м. Чернігів на перетині вулиць Левка Лук'яненка та проспекту Перемоги (земельні ділянки поряд із будівлею за адресою: проспект Перемоги, 184). Відповідно до плану реконструкції міста Чернігів за рішенням міської Ради були виконані роботи з реконструкції та благоустрою автомобільної дороги, тротуарів та прилеглих територій вулиці Левка Лук'яненка та проспекту Перемоги. Тому виникло завдання озеленення територій відповідно до плану розвитку міста. Даний проект передбачає озеленення трьох земельних ділянок які знаходяться поряд із будівлею за адресою пр. Перемоги, 184. На рисунку 1 представлено території для проведення проектних робіт.



Рис. 1. Території для благоустрою: а) перехрестя вулиць Левка Лук'яненка та проспекту Перемоги; б) загальний вигляд території; в), г), д) – відповідно ділянки 1-3

Виконавцями проекту було проведено моніторинг щодо наявності підземних комунікацій на території у відповідності з рис.2, що унеможливило реалізацію проекту «Подиридне місто» на вказаних ділянках.

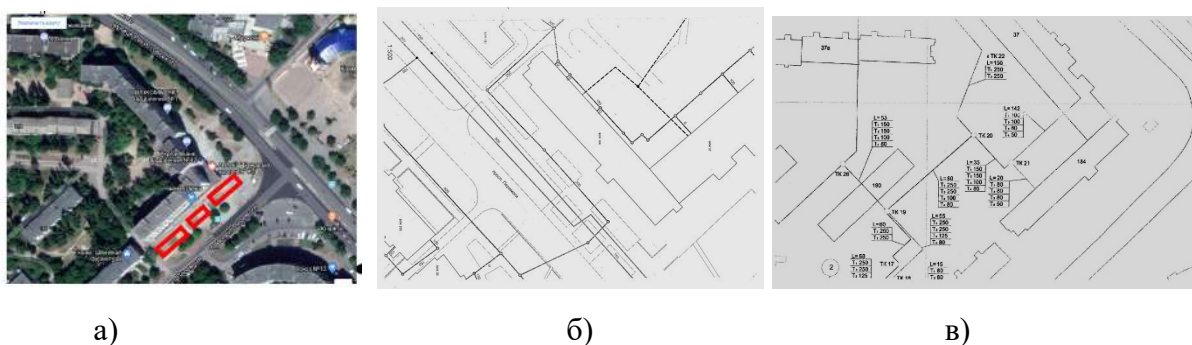


Рис. 2. а) супутниковий знімок; б) мережа каналізації на ділянках; в) тепла мережа на ділянках

Варіант 2. Озеленення території паркової зони «Березовий гай» в м. Чернігів. Березовий Гай – зелена (паркова) зона в межах міста, що розташована у Деснянському районі на схід від перехрестя вулиць Пухова та Доценка і упорядкована для відпочинку містян (рис. 3). Парк розділено на північну і південну частини кільцевою дорогою після реконструкції на початку 2010-х років, на замовлення управління ЖКГ Чернігівської міськради.

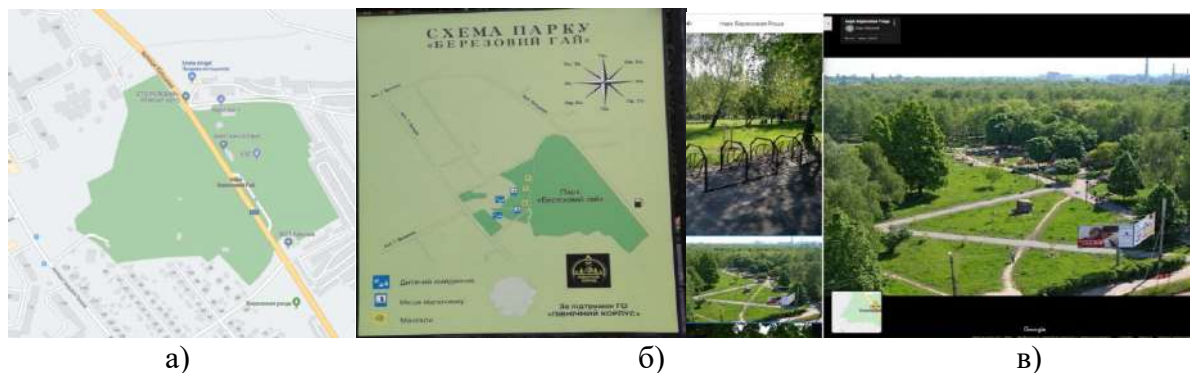


Рис. 3. а) карта паркової зони «Березовий гай»; б) схема паркової зони; в) загальний вигляд паркової зони

На даній території відсутні інженерні мережі та комунікації, крім того дана територія отримала згоду на озеленення від КП «ЗеленБуд» та громадської організації «Екомісто» м. Чернігова. Тому для реалізації проекту була обрана саме ця територія. Сьогодні «Березовий гай» одне з улюблених місць сімейного відпочинку жителів нашого міста. Вздовж свіжоасфальтованих доріжок тут розташовані зручні дерев'яні лавочки. Дитячі ігрові майданчики обнесені веселим парканом, на зелених галявинах з'явилися нові зони відпочинку. Також в парку висадили цілу алею бузку, а в майбутньому тут планують посадити й десятки інших дерев. Власне, для затінення дитячого ігрового майданчику в парковій зоні «Березовий гай» було обрано 10 дерев породи ясен (рис. 4, а) вузьколистий (*Fraxinus angustifolia* Vahl) – вид рослин родини Маслинові (*Oleaceae*) [9]. Дерево може сягати висоти близько 20-30 метрів зі стовбуром у діаметрі до 1,5 м. Кора блідо-сіра і гладка на молодих деревах, з часом на старих деревах – темно-сіра з горбками і тріщинами. Бруньки світло-коричневі, що відрізняється від ясена звичайного (чорні бруньки), навіть у зимовий період. Листки дерев – 15-20 см завдовжки, непарноперисті й складаються з 7-13 тонких листочків, які мають довжину 3-8 см із шириною 1-2 см. Квіти у суцвіттях рослин можуть бути чоловічі, гермафродити або змішані. Квітне на початку весни, а дорослі сформовані плоди сягають у довжину 3-4 см, насіння 1,5-2 см з блідо-коричневими крилами довжиною 1,5-2 см. Схема посадки дерев представлено на рис. 4, б. Проект був реалізований викладачами та студентами НУ «Чернігівська політехніка», учителями та учнями 2-го класу загальноосвітньої школи І-го ступеня № 25 та старшокласниками ЗОШ №12. Процес озеленення дитячого майданчику паркової зони «Березовий гай» відображено на рис. 5.

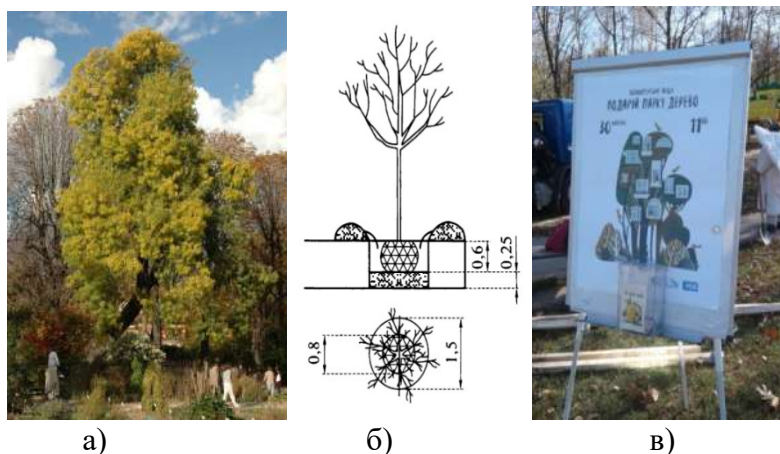


Рис. 4. а) ясен вузьколистий; б) схема посадки дерев; в) презентація проекту

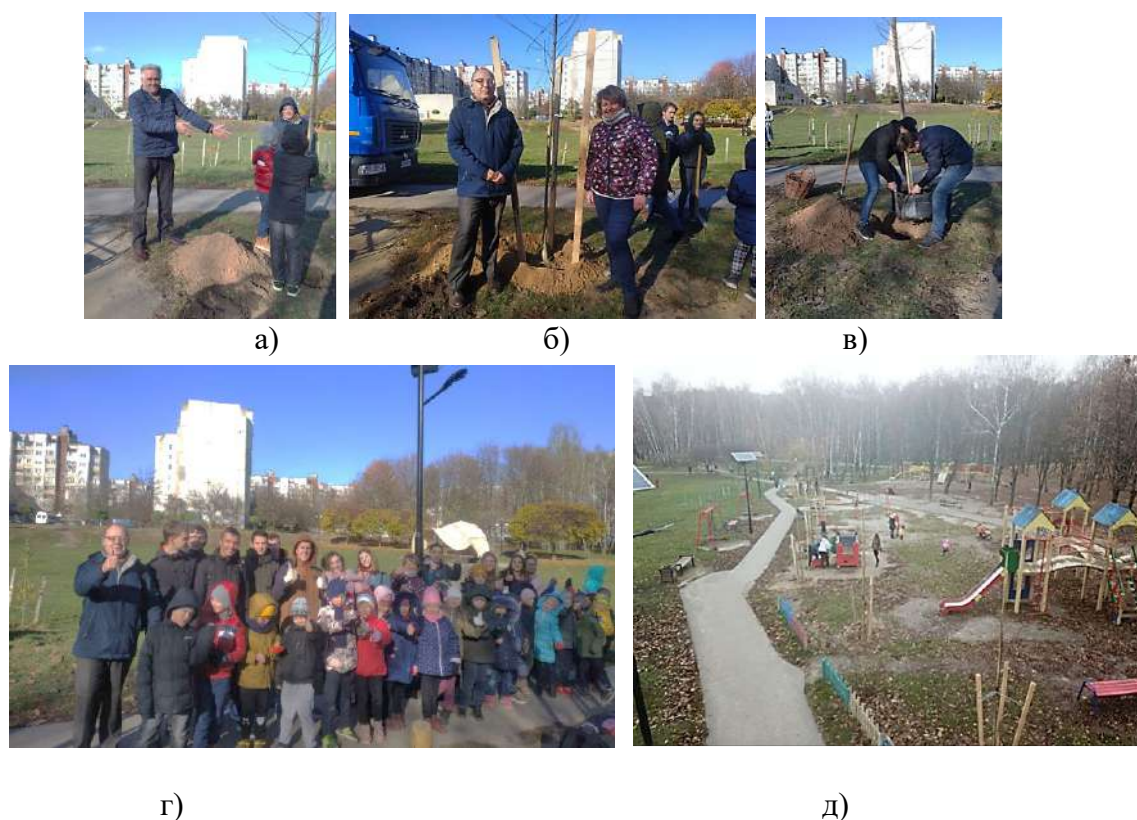


Рис. 5. Озеленення дитячого майданчику викладачами, студентами НУ «Чернігівська політехніка» та школярами: а), б), в), г) – виконання робіт; д) – новостворена ясенева алея

Крім головної акції проекту «Подих рідного міста» – висадки дерев, класним керівником учнів 2-го класу ЗОШ I ступеня та професорсько-викладацьким складом кафедри геодезії, картографії та землеустрою НУ «Чернігівська політехніка», серед школярів було проведено широку інформаційно-роз'яснювальну роботу щодо важливості збереження та примноження біорізноманіття нашого краю, його екологічного і рекреаційного потенціалу. В стінах НУ «Чернігівська політехніка» були проведені лекції для студентів про значення зелених насаджень у життєдіяльності і формуванні навколишнього середовища людини та необхідність створення сприятливих умов для їх раціонального використання, охорони, утримання та відновлення. Адже лісові насадження, сквери, парки тощо насичують атмосферу Землі киснем у результаті фотосинтезу, забезпечують населення цінною деревиною для різних потреб, виконують захисну функцію від вітру для сільськогосподарських угідь, мають рекреаційне та оздоровче значення. Безпосередня участь у проекті «Подих рідного міста» учнівської молоді – запорука подальшого бережливого ставлення учасників заходу до природи та й не дадуть іншим занедбати вирощене власними руками зелене багатство. Подібна акція є дуже важливою і актуальною, адже крім практичного значення, поширює наукові знання, має просвітницьку складову, формує свідомість молоді. Діти, які власноруч посадили дерево, ніколи не завдадуть йому шкоди. Всі учасники акції отримали позитивні емоції та задоволення через причетність та особисту участь в історії озеленення рідного міста. Дана акція широко висвітлювалася у відкритих засобах масової інформації та на обласних телеканалах.



**Висновки.**

Пропагандистсько-просвітницький захід «Подих рідного міста» був спрямований на підвищення рівня обізнаності і свідомості учнівської молоді, студентів та інших верств населення м. Чернігова у питаннях створення, утримання і збереження зелених насаджень. Головною метою стало об'єднання різних верств населення навколо озеленення міста, облаштування та осучаснення міських зелених масивів, формування дбайливого ставлення до природного навколишнього середовища, розвиток та поширення еко-культури.

Для дітей і молоді проект «Подих рідного міста» забезпечить:

- реалізацію державної політики в області патріотичного, екологічного виховання;
- поліпшення екологічної обстановки в мікрорайоні через благоустрій та озеленення парку відпочинку;
- формування екологічної культури та духовно-морального розвитку особистості на основі спільної трудової діяльності учнів, педагогів, батьків, жителів мікрорайону «Березового гаю».

Для населення пропагандистсько-просвітницький захід може стати поштовхом для:

- підвищення соціальної активності та рівня загальної культури населення мікрорайону в питаннях захисту і збереження природного середовища;
- формування екологічної свідомості та відповідальності;
- вироблення практичних навичок природокористування;
- поліпшення екологічного стану та естетичного вигляду території;
- створення сприятливих умов для збереження і зміцнення здоров'я;
- забезпечення спільного дозвілля дітей і дорослих, їх духовного зближення.

Для міста в цілому, проведений захід поліпшить естетичний вигляд території, покращить санітарно-гігієнічну та екологічну обстановку.

**Список використаних джерел**

1. Закон України Про благоустрій населених пунктів від 6 вересня 2005 року № 2807-IV // Відомості Верховної Ради України. – 2005. – № 49. – Ст. 517.
2. Безлюбченко, О. С. Планування і благоустрій міст : навч. посіб. для студ усіх форм навчання та слухачів другої вищої освіти за напрямом підготовки 0921 (6.060101) – «Будівництво» / О. С. Безлюбченко, О. В. Завальний, Т. О. Черносова. – Харків : ХНАМГ, 2011. – 191 с.
3. Планування та забудова міст, селищ і функціональних територій Благоустрій територій. ДБН Б.2.2-5:2011. – Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2012. – 64 с.
4. Державні санітарні норми і правила утримання територій населених місць [Електронний ресурс] / затв. наказом МОЗ України від 17. 03. 11 № 145 № 457/19195. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0457-11#Text>
5. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів. [Електронний ресурс] / затв. наказом МОЗ України від 19. 06. 1996 р. №173. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96#Text>
6. Правила утримання зелених насаджень у населених пунктах України [Електронний ресурс] / затв. наказом Мін. будівництва, архітектури та ЖКГ України 10. 04. 2006 № 105. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0880-06>.
7. Паспорт об'єкта благоустрою зеленого господарства [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://search.ligazakon.ua/l\\_doc2.nsf/link1/TF006269.html](http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/TF006269.html).
8. Комунальне підприємство Чернігівської міської ради «ЗеленБуд» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zelenbud.cn.ua>.
9. Ясень вузьколистий [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D1%81%D0%B5%D0%BD\\_%D0%B2%D1%83%D0%B7%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%B9](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D1%81%D0%B5%D0%BD_%D0%B2%D1%83%D0%B7%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%B9)

### References

1. The Law of Ukraine on the Improvement of Settlements (2005). Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR), 49, Article 517.
2. Bezliubchenko, O.S., Zavalnyi, O.V., Chernonosova, T.O. (2011). Planning and development of cities: educational manual for students of all forms of education and students of the second higher education in the field of training 0921 (6.060101) - "Construction". Kharkiv: KHNAMH.
3. DBN B.2.2-5:2011 "Planning and construction of cities, towns and functional territories. Territorial improvement". (2011).
4. Ministry of Justice of Ukraine. (2011). State sanitary norms and rules for maintaining the territories of populated areas dated 17.03.11 No. 145, registered in the on 5.04.11 under No. 457/19195.
5. State sanitary rules for planning and development of settlements. SP 173.
6. Rules for the maintenance of green spaces in populated areas of Ukraine. (2006). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0880-06>.
7. Passport of the object of improvement of the green economy. (2009). [http://search.liga-zakon.ua/l\\_doc2.nsf/link1/TF006269.html](http://search.liga-zakon.ua/l_doc2.nsf/link1/TF006269.html).
8. Municipal enterprise of the Chernihiv City Council "ZelenBud". (n.d.). <http://zelenbud.cn.ua/>.
9. Narrow-leaved ash. (n.d.). [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D1%81%D0%B5%D0%BD\\_%D0%B2%D1%83%D0%B7%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%B9](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D1%81%D0%B5%D0%BD_%D0%B2%D1%83%D0%B7%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%B9).

Отримано 08.09.2023

UDC 712.4

**Oleksiy Tereshchuk<sup>1</sup>, Svitlana Kovalenko<sup>2</sup>, Yevgeny Sakhno<sup>3</sup>, Yulia Shcherbak<sup>4</sup>, Viktor Movenko<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Director of Education and Research Institute of Construction, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, National University «Chernihiv Polytechnic» (95 Shevchenko Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** [olexter1957@gmail.com](mailto:olexter1957@gmail.com) **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6433-9351>

**ResearcherID:** H-4540-2016 **Google Scholar:** <https://scholar.google.com/citations?user=vZtF4YIAAAAJ&hl=uk>

**Index Copernicus -** <http://journals.indexcopernicus.com/+++>, p24781806,3.html

<sup>2</sup> PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor of Department of Geodesy, Cartography and Land Planning, National University «Chernihiv Polytechnic» (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [svkoval70@gmail.com](mailto:svkoval70@gmail.com) **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5829-7132> **Researcher ID:** H-4476-2016

<sup>3</sup> Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, National University «Chernihiv Polytechnic» (95, Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** [evsakhno@ukr.net](mailto:evsakhno@ukr.net) **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9789-7242>

**Researcher ID:** M-3987-2016. **SCOPUS Author ID:** 57190493489

<sup>4</sup> lecturer of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, National University «Chernihiv Polytechnic» (95, Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** [Shch.Yu15@gmail.com](mailto:Shch.Yu15@gmail.com) **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-3439-3792>

**ResearcherID:** H-4199-2016

<sup>5</sup> senior lecturer of Department of Geodesy, Cartography and Land Management, National University «Chernihiv Polytechnic» (95, Shevchenka Str., 14035, Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** [viktor.movenko@gmail.com](mailto: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=YNgIHagAAAAJ&hl=ru>

### IMPLEMENTATION OF THE PROJECT OF LANDSCAPING OF TERRITORY OF THE PARK ZONE "BEREZOVYY HAY" IN CHERNIHIV

**Relevance of the research topic.** The urban environment with its dusty and polluted air, temperature regime worsens the sanitary and microclimatic conditions in which life, production activities and recreation of the population of Ukraine take place. According to the normative indicators, up to 50% of the residential territory of our cities and other settlements is under all types of plantations. There should be up to 60 m<sup>2</sup> of plantations per inhabitant (including 12-24 m<sup>2</sup> of public plantations). However, the task of urban landscaping is not only to increase the area of greenery, but also the uniform distribution of greenery throughout the territory, extensive indoor and courtyard landscaping, reconstruction of existing parks, gardens,

boulevards and squares. Therefore, it is necessary to bring human habitation as close as possible to the conditions of nature, to ensure normal recreation near the home and place of work, to create a single ensemble of the city and nature.

**Problem statement.** The positive effect of green areas on the human condition, especially on the respiratory system, has long been established. They play a significant role in shaping the human environment because they have the ability to improve the sanitary and hygienic situation. Green plantings of park complexes act as an environment-forming natural factor that is able to perform aesthetic, health, thermoregulatory functions. The green plantations of the Chernihiv city went through a long stage of formation, the main part of which was planted and formed in the pre-and post-war period. Thus, the average age of trees, especially in the central part of the city, is 50-70 years, with the optimal - 40 years, and changes in the age structure of plantations are critical. Unlike inanimate assets, trees have a living resource and a time when they have the highest quality performance impact on the environment. In addition, among the tree plantations fast-growing and short-lived species, which lose their decorativeness with age, dominate. In the short term, these facts will have the effect of significantly reducing the number of trees and deteriorating the safety of plantations.

**Analysis of recent research and publications.** The paper discusses recent publications on this topic, which are presented in the public domain, including scientific journals, textbooks and data from the Internet.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** Modern society has accumulated extensive experience in landscaping and greening of cities, created a wide range of plants for landscaping, found specific techniques for landscaping, clarified the features of the maintenance of greenery. However, landscaping remains the most important area of municipal activity. It is here that the necessary conditions for a high standard of living are created. Thus, conditions are created that make the life of each individual healthy, comfortable, convenient, regardless of residence place.

**The research objective.** The increase in the number of vehicles, chaotic buildings, the impact of human production and recreational activities every year increasingly leads to unfavorable conditions for life and health of the population of Ukrainian cities. Therefore, the task was to develop and implement a project of landscaping of the park zone "Berezovyy hay" in Chernihiv.

**The statement of basic materials.** The project of landscaping the park area provides for a propagating educational event "Breath of the hometown", which aims to raise awareness of schoolchildren, students and other segments of the Chernihiv population towards the creation and preservation of newly created greenery and aims to unite different segments of the Chernihiv population around landscaping the city, modernization and arrangement of city parks and squares, the formation of eco-culture and care for the environment.

In the process of project implementation, work was carried out to select a site for planting trees, purchase seedlings and inform students, schoolchildren and residents of the surrounding areas about the possibility of involving them in a children's playground landscaping located in the recreation park "Berezovyy hay".

**Conclusions.** The project "Breath of the hometown" will implement the state policy in the field of patriotic environmental education; improve the environmental situation in the district through landscaping and gardening amusement park; to form ecological culture of students and pupils on the basis of labor, spiritual and moral development of the person through joint activity of pupils, teachers, parents, inhabitants of the residential district in improvement of the Berezovyy hay. For the population, the propaganda and educational event can be an impetus for increasing social activity and the level of general culture of the population in the protection and preservation of the environment, the formation of environmental awareness and responsibility and the development of practical skills. For the city as a whole, the event will improve the aesthetic appearance of the territory; will improve sanitary and hygienic and create a more favorable environmental conditions.

**Keywords:** landscaping, green spaces, landscaping, environment..

**Fig.:** 5. **References:** 9.

## ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»

### Шановні дописувачі!

Для подання статті необхідно спочатку надіслати статтю та інформацію про автора, з яким контактувати щодо публікації статті, оформлені за встановленими вимогами, для попереднього розгляду редакційною колегією журналу «Технічні науки та технології». За умови відповідності статті спеціальностям, за якими акредитовано журнал, відповідності нормам академічної доброчесності за результатами перевірки на плагіат, позитивної незалежної рецензії від призначеного редакційною колегією рецензента, стаття розміщується в макеті журналу.

Редакційна колегія забезпечує розгляд та незалежне рецензування поданих до публікації матеріалів вченими, які мають науковий ступінь та здійснюють дослідження за спеціальністю, що відповідає тематиці поданого для публікації матеріалу, і є авторами (спів-авторами) загальною кількістю не менше трьох публікацій у наукових виданнях, включених до категорії «А» та/або категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, та/або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus за відповідною спеціальністю, оприлюднених упродовж останніх п'яти років.

Опублікування наукових статей у журналі «Технічні науки та технології» є платним. Вартість публікації наукової статті становить:

- **60 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам потрібна паперова версія журналу);
- **40 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам достатньо електронної версії журналу).

Остаточна вартість публікації формується після готовності електронного макету журналу та повідомляється автору, відповідальному за публікацію статті. Оплата підтверджується квитанцією.

**УМОВИ ПУБЛІКАЦІЇ, ВИМОГИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ, РЕКВІЗИТИ ОПЛАТИ ТА ОСТАННІ НОМЕРИ НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ» РОЗМІЩЕНО НА САЙТІ»: <http://tst.stu.cn.ua/>**

### Контактна інформація:

Мороз Наталія Вікторівна

Тел. моб.: (0462) 665-225

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 як згоду дописувача (ів) щодо передачі авторського права на використання твору (тиражування, розповсюдження тощо).*

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

# ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

*НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ*

*№ 3(33)*

Відповідальний за випуск  
Технічний редактор, відповідальна за випуск  
Комп'ютерна верстка  
Авторське редагування

С. П. Сапон  
Н. В. Мороз  
О.П. Журко

Підписано до друку 25.09.2023. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 31,5.  
Тираж 100 пр. Замовлення № 25/23.

---

Редакційно-видавничий відділ Національного університету «Чернігівська політехніка»  
14035, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції серія ДК № 7128 від 18.08.2020 р.