

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

MINISTRY OF EDUCATION  
AND SCIENCE OF UKRAINE

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного  
технічного університету  
«ХПІ». Серія: Нові рішення в  
сучасних технологіях**

**Bulletin of the National  
Technical University  
"KhPI". Series: New solutions in  
modern technology**

№ 2(12)' 2022

No. 2(12)' 2022

Збірник наукових праць

Collection of Scientific papers

Видання засноване у 1961 р.

The edition was founded in 1961

Харків  
НТУ «ХПІ», 2022

Kharkiv  
NTU "KhPI", 2022

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях** = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2022. — № 2(12). — 106 с. — ISSN 2079-5459.

Видання публікує наукові результати та досягнення мультидисциплінарних досліджень молодих науковців широкого профілю у сферах машинобудування, енергетики, технологій органічних і неорганічних речовин, екології, інформаційних технологій і систем управління, техніки та електрофізики високих напруг, а також з фундаментальних аспектів сучасних технологій.

The journal publishes scientific results and accomplishments of multidisciplinary researches of young scientists of a wide profile in the field of machine building, energy, technologies of organic and inorganic substances, ecology, information technologies and control systems, high voltage techniques and electrophysics, as well as on the fundamental aspects of modern technologies.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України КВ № 23776-13616 від 14 лютого 2019 року.

**Мова статей** – українська, англійська.

**Офіційний сайт видання:** <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/>

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях** включено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії», **категорія «Б»** (накази МОН України № 409 від 17.03.2020 р. та №886 від 02.07.2020 р.).

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях» включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща), бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Засновник

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

Founder

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

#### **Редакційна колегія**

*Відповідальний редактор:*

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАНУ, НТУ «ХПІ», Україна

*Члени редколегії:*

Авдєєва О. П., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Байрачний В. Б., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Березка Т. О., НТУ «ХПІ», Україна

Брагіна Л. Л., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Бурлака М. В., SoftInWay Inc., США

Глушко А. В., НТУ «ХПІ», Україна

Гораш Є., проф., Університет Стратклайда, Великобританія

Гринченко Н. Г., доц., ХДУХТ, Україна

Данильченко Д. О., НТУ «ХПІ», Україна

Демидов І. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Єнікєєв О. Ф., доц., ДДМА, Україна

Заковоротний О. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Колодяжна Л. В., ІПМаш НАНУ, Україна

Костик К. О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Куліченко В. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Ларін О. О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Львов Г. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Мазасва В. С., УкрНДІОЖ НАНУ, Україна

Меньшикова С. І., НТУ «ХПІ», Україна

Мінакова К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Моїсєєв В. Ф., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Ноздрачова К. Л., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Носенко Т. Т., проф., НУХТ, Україна

Папченко В. Ю., УкрНДІОЖ НАНУ, Україна

Піментел С. Р., проф., Федеральний Університет Гояс, Бразилія

Пітак І. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Плеснецов С. Ю., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Раскін Л. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Руденко С. С., НДПІКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», Україна

Селін Р. В., ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, Україна

Сучков Г. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Тихомірова Т. С., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Томашевський Р. С., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Філенко О. М., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Хохлов М. А., ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, Україна

Шевченко С. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Шестопапов О. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Шідакова-Каменюка О. Г., доц., ХДУХТ, Україна

#### **Editorial staff**

*Associate editor:*

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of NASU, NTU "KhPI", Ukraine

*Editorial staff members:*

Avdieieva O. P., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Bairachnyi V. B., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Berezka T. O., NTU "KhPI", Ukraine

Bragina L. L., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Burlaka M. V., SoftInWay Inc., United States

Glushko A. V., NTU "KhPI", Ukraine

Gorash Ye., prof., University of Strathclyde, UK

Grynchenko N. G., docent, HDUHT, Ukraine

Danylchenko D. O., NTU "KhPI", Ukraine

Demidov I. N., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Yenikieiev O. F., docent, DSEA, Ukraine

Zakovorotniy A. Yu., prof., NTU "KPI", Ukraine

Kolodyazhnaya L. V., IPMash NASU, Ukraine

Kostyk K. O., prof., NTU "KPI", Ukraine

Kulichenko V. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Larin A. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Lvov G. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Mazaeva V. S., UkrRIOF NASU, Ukraine

Menshikova S. I., NTU "KhPI", Ukraine

Minakova K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Moiseev V. F., prof., NTU "KPI", Ukraine

Nozdrachova K. L., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Nosenko T. T., prof., NUFT, Ukraine

Papchenko V. Yu., UkrRIOF NASU, Ukraine

Pimentel S., prof., Federal University of Goias, Brazil

Pitak I. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Plesnetsov S. Yu., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Raskin L. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Rudenko S. S., RDI "Molniya" NTU "KhPI", Ukraine

Selin R. V., E.O. Paton EWI NASU, Ukraine

Suchkov G. M., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Tykhomyrova T. S., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Tomashevskiy R. S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Filenko O. M., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Khokhlov M. A., E.O. Paton EWI NASU, Ukraine

Shevchenko S. Yu., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Shestopalov A. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Shidakova-Kamenyuka E. G., HDUHT, Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 5 від 01 липня 2022 р.

УДК 621.91.01

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.01

## ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СПЕЦІАЛЬНОГО РІЗЦЕТРИМАЧА З ОРІЄНТОВАНИМ ПОЛОЖЕННЯМ ЦЕНТРА ЖОРСТКОСТІ

**С. В. ВАКУЛЕНКО**

кафедра конструювання машин, навчально-наукового механіко-машинобудівного інституту, КПІ ім. Ігоря Сікорського,  
Київ, УКРАЇНА  
\*e-mail: svakulenko@gmail.com

**АНотація** Дослідження вібростійкості процесу токарної обробки ефективно здійснювати із використанням сучасних засобів математичного моделювання, які характеризуються достатнім ступенем точності взаємозв'язку між вхідними впливами або збуренням та динамічною реакцією верстата. Для дослідження та аналізу динамічних процесів потенційно нестійкої системи супорта токарного верстата при різанні важливим є формування розрахункової схеми процесу обробки та математичної моделі досліджуваної системи. Наведено реалізацію цієї моделі, що визначає вплив пружних та динамічних характеристик спеціального різцетримача з орієнтованим центром жорсткості на характер відносних коливань деталі та різця, та в цілому на головний показник якості динамічної системи верстата - вібростійкість. Наведені аналітичні залежності впливу пружних характеристик різцетримача на статичну характеристику системи різець-супорт, які дозволяють визначити її приведені параметри жорсткості в напрямках головної системи координат. За результатами проведених імітаційних досліджень вібростійкості процесу різання можна визначити найбільш раціональні пружні параметри різцетримача, при яких вібростійкість обробки буде відносно збільшена з урахуванням різних комбінацій пружних характеристик потенційно нестійкої системи супорта верстата при різанні. Встановлено, що використання додаткового різцетримача зменшує загальну жорсткість в напрямку дії зусилля різання та в напрямку нормалі до поверхні деталі та одночасно збільшує вібростійкість процесу різання через зменшення негативного впливу «координатного зв'язку» між вібраційним переміщенням різця та процесом різання.

**Ключові слова:** вібрації; вібростійкість; різцетримач; токарна обробка; динаміка верстатів; центр жорсткості

## THEORETICAL STUDY OF THE EFFICIENCY OF USING A SPECIAL CUTTER TOOL HOLDER WITH AN ORIENTED POSITION OF CENTER OF RIGIDITY

**S. VAKULENKO**

Department of Machine Design of Educational and Research Institute of Mechanical Engineering of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic  
Institute, Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The theoretical study of vibration resistance of the turning process is effectively carried out using modern mathematical modeling tools, which are characterized by sufficient accuracy of the relationship between input actions or disturbances and the dynamic response of the metal-cutting machine tools. To study and analyze the dynamic processes of a potentially unstable lathe support system during turning, it is important to form a calculation scheme for the processing process and a mathematical model of studies system. The implementation of such a model, which determines the influence of the elastic and dynamic characteristics of a special tool holder with an oriented center of rigidity on the relative vibrations of workpiece and cutter, in general on the main indicator of machine tools dynamic system quality - vibration resistance, is presented. The analytical dependences of tool holders elastic characteristics influence on tool-support system static characteristic, which allow determining its reduced stiffness parameters in main coordinate system directions are presented. Based on the simulation studies results of the cutting process vibration resistance is possible to determine the most rational tool holder elastic parameters, in which the vibration resistance of turning will be relatively increased, taking into account various combinations of the potentially unstable system elastic characteristics of the machine tool carriage during turning. The use of an additional tool holder reduces the overall rigidity in the direction of the cutting force vector and in the direction normal to the workpiece's surface, while simultaneously increasing the vibration resistance of cutting process due to the reduction of the "coordinate links" negative influence between cutter vibrational movement and the cutting process.

**Keywords:** vibration; vibrostaticity; tool holder; lathe work; the dynamics of machines; center of rigidity

### Вступ

Задача підвищення продуктивності обробки токарних верстатів при заданій точності обробки безпосередньо пов'язана з питанням покращення

динамічної якості верстатів, особливо їх супортної групи. Динамічна якість МРВ в більшій мірі характеризує стійкість рухів його робочих органів при різанні. Недостатньо висока динамічна стійкість погіршує техніко-економічні показники верстата, а саме, призводить до зниження якості оброблюваної

поверхні та підвищує зношення різального інструмента. Вирішення питання визначення можливих напрямків підвищення вібростійкості оборбки різанням використанням засобів сучасного імітаційного моделювання є дуже актуальним [1-6].

Серед основних відомих напрямків підвищення вібростійкості верстатів під час різання є забезпечення умови відтиснення інструмента від оброблювальної поверхні при збільшенні сили різання та оптимальної орієнтації головних осей жорсткості пружної системи [7]. Іноді в конструкції базового верстата при певних умовах обробки виникає втрата вібростійкості внаслідок наявності ефекту «від’ємної» жорсткості, що викликає занурення інструмента в оброблювальну деталь при збільшенні сили різання. Використання додаткового спеціального різцетримача з орієнтованим центром жорсткості дає можливість змінити статичну характеристику пружної системи різець-супорт на «додатну», та оптимально з точки зору вібростійкості зорієнтувати головні осі жорсткості відносно напрямку сили різання. Для підбору оптимальних параметрів різцетримача пропонується теоретичні дослідження, які дозволяють підібрати пружні характеристики системи різцетримача при яких можливе збільшення вібростійкості токарної обробки.

**Мета роботи**

Ефективне використання спеціалізованого різцетримача з орієнтованим положенням центра жорсткості потребує врахування як динамічних так і особливостей потенційно нестійкої системи супорта токарного верстата в теоретичному дослідженні. В кінцевому результаті проведеного дослідження важливим є отримання інформації яка стосується можливості відносного підвищення вібростійкості токарної обробки, або її продуктивності в порівнянні із відносним зменшенням загальної жорсткості в напрямку нормалі до оброблюваної поверхні між деталлю та різцем. Так інформація дозволить в цілому оцінити необхідність підвищення вібростійкості токарної обробки за рахунок зменшення жорсткості через використання спеціального різцетримача.

**Виклад основного матеріалу**

Пружна система супорта токарного верстата в площині  $yz$  схематично представлена (рис. 1) як система з двома ступенями вільності, що складається з підсистеми супорта та різцетримача. Підсистема супорта складається з самого супорта та частини різцетримача, що жорстко з ним з’єднана. Підсистема різцетримача складається з пружної частини різцетримача та жорстко закріпленому на ньому різця. Кожна з підсистем окремо мають власні пружні

характеристики такі як, показники жорсткості  $c_{11}, c_{12}, c_{21}, c_{22}$ , та відносні положення центрів жорсткості  $O_1, O_2$ , які закладені конструкцією супорта верстата та різцетримача відповідно. Пружне переміщення вершини різця під дією сили різання  $P$  визначається деформаціями по двом головним осям жорсткості  $\eta_{01}$  та  $\eta_{02}$ , що в наближенні формують еліпс жорсткості  $E_0$ , при умові, якщо лінія дії сили проходить через центр жорсткості системи. В іншому випадку, коли сила не проходить через центр жорсткості, виникає додаткове пружне переміщення, що обумовлене поворотом системи навколо центру жорсткості. За спрощеною схемою розрахунків, прийнято знаходити переміщення як деформацію приведеної пружної системи за максимальною жорсткістю  $c_1$  вздовж осі  $\eta_1$ , що проходить через центр жорсткості та мінімальною жорсткістю  $c_2$  по осі  $\eta_2$ .

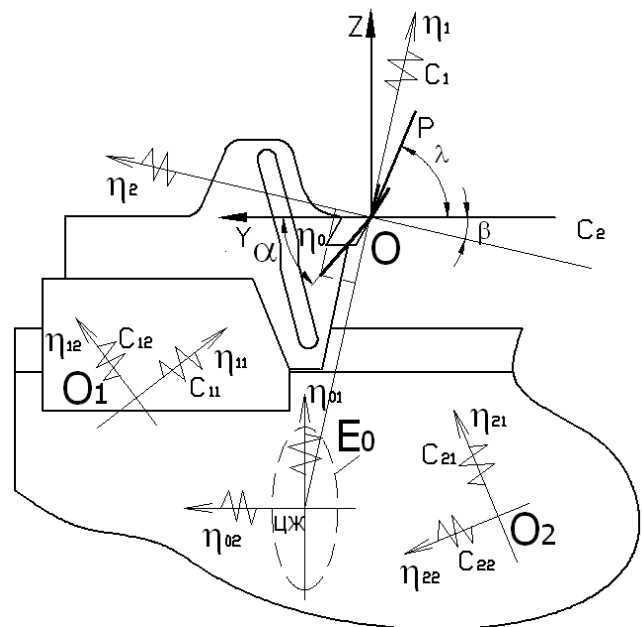


Рис. 1 – Схема пружної системи різець-супорт токарного верстата в площині  $yz$

З урахуванням силових та геометричних параметрів, статичну характеристику пружної системи супорта можна представити у вигляді:

$$K_{ПС} = K_{ПС1} + K_{ПС2} = -\sin(\lambda - \beta)\sin(\beta)/c_1 + \cos(\lambda - \beta)\cos(\beta)/c_2;$$

де  $\lambda$ - кут між напрямком дії сили  $P$  та нормалі до оброблювальної поверхні (вісь  $y$ );  $\beta$ - кут орієнтації головних осей жорсткості пружної системи, що лежить між напрямком осі мінімальної жорсткості та віссю  $y$ ,  $\beta < 0$  якщо нахил головних осей відносно осі  $y$  здійснюється за годинниковою стрілкою, та  $\beta > 0$  якщо проти.

У випадку від’ємного значення статичної характеристики  $K_{ПС}$  можливе занурення різця в

заготовку, з проявом ефекту «від'ємної жорсткості». Результати відомих теоретичних досліджень впливу на величину статичної характеристики пружної системи супорту токарного верстата через зміну значень кута розвороту головних осей жорсткості та співвідношень жорсткостей наведені в першому розділі.

Недоліком відомого експериментального способу «пеленгації» визначення параметрів приведеної жорсткості по осям  $\eta_1$  та  $\eta_2$ , та кута  $\beta$  є те, що він не враховує зміну параметрів пружної системи при зміні положення інструмента під час обробки. Теоретичне знаходження кута  $\beta$  розвороту головних осей жорсткості базується на припущенні того, що коли вектор дії сили  $P$  співпадає з віссю  $\eta_1$  максимальної жорсткості (тобто  $\lambda - \beta = 90^\circ$ ), відсутня деформація супорта від моменту сили різання. У випадку коли вектор дії сили  $P$  співпадає з приведеною віссю мінімальної жорсткості пружні переміщення зумовлені лише дією моменту сили різання, без деформації вздовж осі максимальної жорсткості. Відповідно до схеми рис. 1 цю умову можна представити у вигляді:  $\varphi_1 = -\varphi_2$ , де  $\varphi_1$  - кут повороту супорта під дією крутного моменту  $M_1 = l_1 P_{\eta 12}$ ,  $\varphi_2$  - кут повороту різцетримача під дією крутного моменту  $M_2 = l_2 P_{\eta 22}$ ;  $l_1 = OO_1$  - відстань від точки різання до центру жорсткості системи супорта,  $l_2 = OO_2$  - до центру жорсткості системи різцетримача;  $P_{\eta 12}$ ,  $P_{\eta 22}$  - проекції сили  $P$  на осі  $\eta_{12}$ ,  $\eta_{22}$  відповідно. Визначення положення центру жорсткості  $O_1$ ,  $O_2$  здійснюється експериментальним шляхом, вимірюванням відхилень двох крайніх точок оправки, яка встановлена замість різця, при цьому положення центра жорсткості знаходиться на перетині двох перпендикулярів, проведених з середини відрізків, що визначають вказані відхилення.

Вираз для знаходження кута  $\lambda$  представлено у вигляді рівняння, що розв'язується за допомогою чисельних методів:

$$\cos(\lambda - \beta_1) l_2 C_{22} = -\cos(\lambda - \beta_2) l_1 C_{12};$$

де  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  - кути орієнтації головних осей жорсткості систем супорта та різцетримача відповідно.

Значення параметрів приведеної жорсткості системи можна визначити через формули:

$$C_1 = \left| \frac{P \cdot \sin(\lambda - \beta)}{\eta_0 \cdot \sin(\alpha + \beta)} \right|; \quad C_2 = \left| \frac{P \cdot \cos(\lambda - \beta)}{\eta_0 \cdot \cos(\alpha + \beta)} \right|; \quad (1)$$

де  $\eta_0$  - пружне переміщення різця під дією сили  $P$ ,  $\alpha$  - кут між напрямком переміщення  $\eta_0$  та віссю  $y$ . Повне пружне переміщення системи супорт-різцетримач складається з переміщень систем супорта ( $\eta_{10}$ ) та різцетримача ( $\eta_{20}$ ):

$$\eta_0 = \sqrt{\left[ \frac{\eta_{10} \cos(\alpha_1 - \beta_1) \text{sign}(\cos(\lambda - \beta_1)) + \eta_{20} \cos(\alpha_2 - \beta_2) \text{sign}(\cos(\lambda - \beta_2))}{\eta_{10} \sin(\alpha_1 - \beta_1) \text{sign}(\cos(\lambda - \beta_1)) + \eta_{20} \sin(\alpha_2 - \beta_2) \text{sign}(\cos(\lambda - \beta_2))} \right]^2 + \left[ \frac{\eta_{10} \sin(\alpha_1 - \beta_1) \text{sign}(\cos(\lambda - \beta_1)) + \eta_{20} \sin(\alpha_2 - \beta_2) \text{sign}(\cos(\lambda - \beta_2))}{\eta_{10} \cos(\alpha_1 - \beta_1) \text{sign}(\cos(\lambda - \beta_1)) + \eta_{20} \cos(\alpha_2 - \beta_2) \text{sign}(\cos(\lambda - \beta_2))} \right]^2}; \quad (2)$$

$$\alpha = \arctg \left( \frac{\eta_{10} \sin(\alpha_1 - \beta_1) \text{sign}(\cos(\lambda - \beta_1)) + \eta_{20} \sin(\alpha_2 - \beta_2) \text{sign}(\cos(\lambda - \beta_2))}{\eta_{10} \cos(\alpha_1 - \beta_1) \text{sign}(\cos(\lambda - \beta_1)) + \eta_{20} \cos(\alpha_2 - \beta_2) \text{sign}(\cos(\lambda - \beta_2))} \right); \quad (3)$$

$$\eta_{10} = P \sqrt{\left( -\frac{\sin(\lambda - \beta_1)}{C_{11}} \right)^2 + \left( \frac{\cos(\lambda - \beta_1)}{C_{12}} \right)^2}; \quad (4)$$

$$\eta_{20} = P \sqrt{\left( -\frac{\sin(\lambda - \beta_2)}{C_{21}} \right)^2 + \left( \frac{\cos(\lambda - \beta_2)}{C_{22}} \right)^2}; \quad (5)$$

$$\alpha_1 = \arctg \left( -\text{tg}(\lambda - \beta_1) \frac{C_{12}}{C_{11}} \right); \quad (6)$$

$$\alpha_2 = \arctg \left( -\text{tg}(\lambda - \beta_2) \frac{C_{22}}{C_{21}} \right). \quad (7)$$

Для аналізу впливу характеристик спеціального різцетримача з орієнтованим центром жорсткості на вібростійкість токарної обробки в публікаціях 1 наведені структуру та диференційні рівняння розробленої математичної моделі динамічної системи верстата, в якій враховано статичні та динамічні властивості цього оснащення.

Реалізація математичної моделі [8-10] динамічної системи токарного верстата при різанні у вигляді програми здійснюється з використанням програмного комплексу MATLAB/Simulink. Модуль Simulink є спеціалізованим інструментом системи MATLAB візуального моделювання динамічних систем. Важливим інструментом аналізу динамічних систем є Simulink LTI-Viewer який входить до складу пакету прикладних програм Control System Toolbox. Даний інструмент призначений для аналізу лінійних стаціонарних динамічних систем та дозволяє побудувати частотні характеристики досліджуваної системи таких як амплітудно-фазово-частотна характеристика (АФЧХ). Для оцінки запасу вібростійкості також використовували критерій Найквіста який вказує наскільки далеко знаходиться система від межі її втрати, та вимірюється величинами запасу стійкості за амплітудою  $H$  та запасу стійкості по фазі. Запас стійкості по амплітуді визначають також і в дБ за формулою  $L = 20 \lg(1/H)$ , гранична межа якого прийнята для систем металорізальних верстатів величиною  $L \geq 8-12$  дБ, та по фазі  $\gamma \geq 30^\circ$

Для проведення моделювання та визначення параметрів запасу вібростійкості процесу різання на токарному верстаті значення пружних та демпфіруючих параметрів динамічної системи прийняті в широкому діапазоні серед експериментально визначених значень параметрів типових токарних верстатів. Пружні приведені параметри жорсткості системи супорта прийняті в широкому діапазоні значень співвідношень максимальної та мінімальної приведені жорсткості. Комбінація параметрів жорсткості  $c_{5max}=80$  кН/мкм та  $c_{6min}=47$  кН/мкм формує співвідношення жорсткостей системи супорта  $c_{min}/c_{max}=0,58$  та наближено відображають експериментально визначені пружні властивості верстата 1К62 на базі якому сформований стенд експериментальних досліджень. Реалізовані в моделюванні також комбінації параметрів приведених жорсткостей з більш вираженою направленою жорсткістю пружної системи супорта  $c_{5max}=80$  кН/мкм та  $c_{6min}=28$  кН/мкм з співвідношенням жорсткостей  $c_{min}/c_{max}=0,35$  та найбільш поширена комбінація параметрів коли жорсткість відрізняється несуттєво  $c_{5max}=80$  кН/мкм,  $c_{6min}=60$  кН/мкм та співвідношенням  $c_{min}/c_{max}=0,75$ .

Для дослідження впливу на вібростійкість обробки зі сторони різцетримача вираженої направленої жорсткості та вибору її орієнтації відносно напрямку вектору дії сили різання та напрямків орієнтації осей жорсткості супорта прийняті наступні в широкому діапазоні вибору співвідношення між максимальною та мінімальною приведеною жорсткістю різцетримача. Максимальна приведена жорсткість різцетримача прийнята  $c_{1max}=20$  кН/мкм, а мінімальна приймається за наступними значеннями  $c_{2min}=20$  кН/мкм з співвідношенням жорсткостей  $c_{min}/c_{max}=1$ ;  $c_{2min}=15$  кН/мкм та  $c_{min}/c_{max}=0,75$ ;  $c_{2(min)}=10$  кН/мкм та  $c_{min}/c_{max}=0,5$ ;  $c_{2min}=5$  кН/мкм та  $c_{min}/c_{max}=0,25$ . Реалізація наведених пружних властивостей різцетримача та зміни кута орієнтації максимальної жорсткості можлива шляхом зміщення відносного налаштування або зміною його конструкції. Тому імітаційні дослідження необхідні для визначення значень пружних параметрів, при яких конструкція різцетримача мала спрощений вигляд без втрати універсальності застосування для різних токарних верстатів.

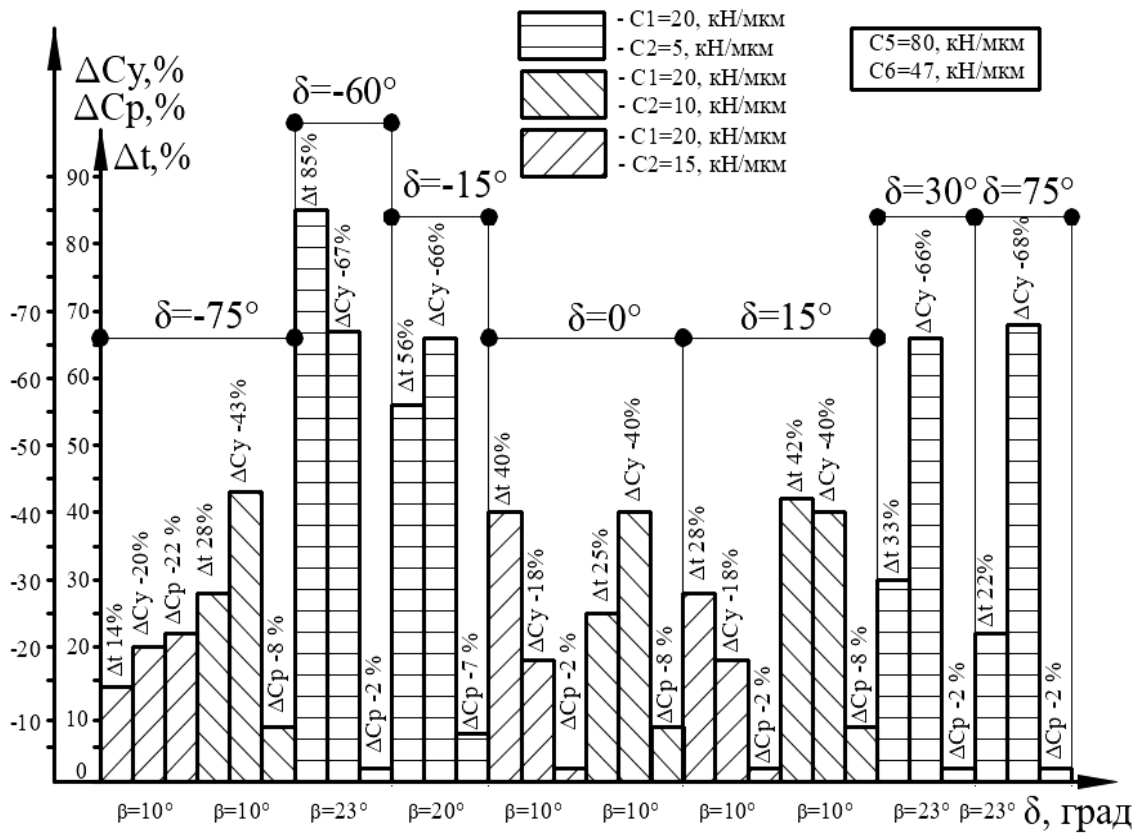


Рис. 2 – Діаграма приросту граничної глибини різання  $t$  та відносного зменшення жорсткості в напрямку дії сили різання  $\Delta C_p$  та вздовж осі  $\Delta C_y$  при використанні різцетримача з орієнтованим центром жорсткості для супорта верстата з пружними параметрами  $c_{5max}=80$  кН/мкм,  $c_{6min}=47$  кН/мкм

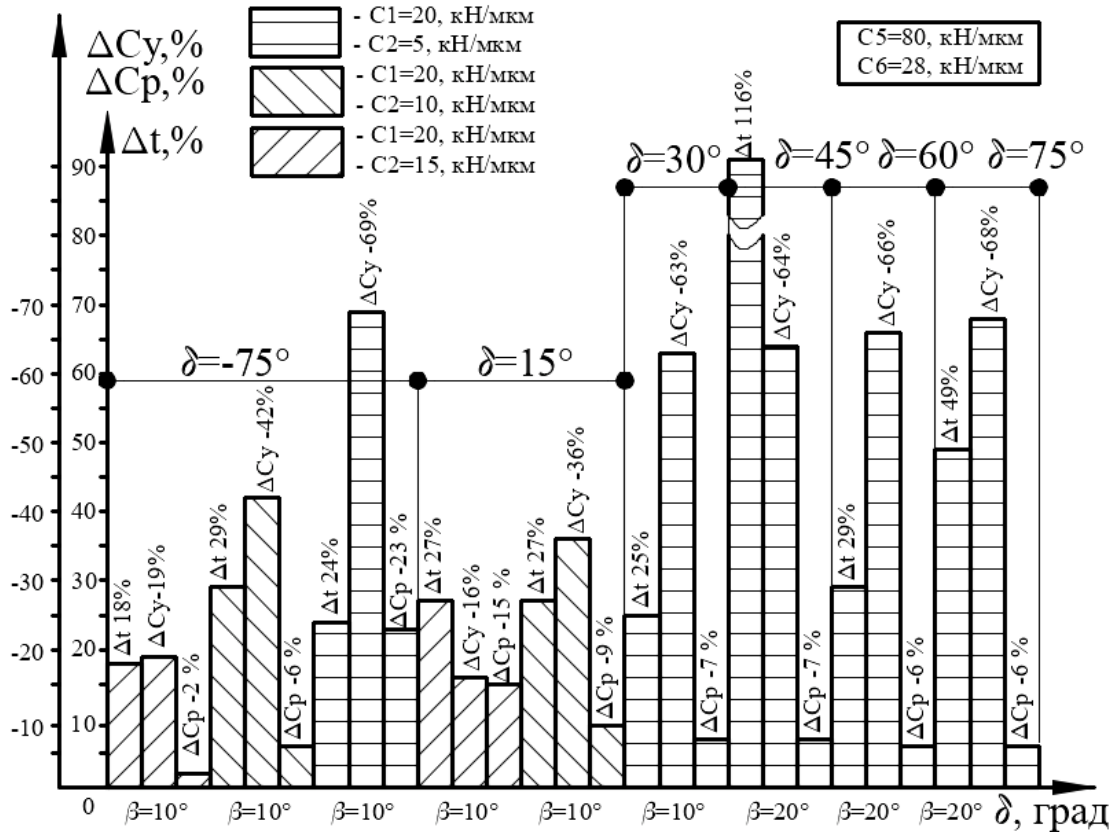


Рис. 3 – Діаграма приросту граничної глибини різання  $t$  та відносного зменшення жорсткості в напрямку дії сили різання  $\Delta C_p$  та вздовж осі  $\Delta C_y$  при використанні різцетримача з орієнтованим центром жорсткості для супорту верстата з пружними параметрами  $c_{5max}=80$  кН/мм,  $c_{6min}=28$  кН/мм

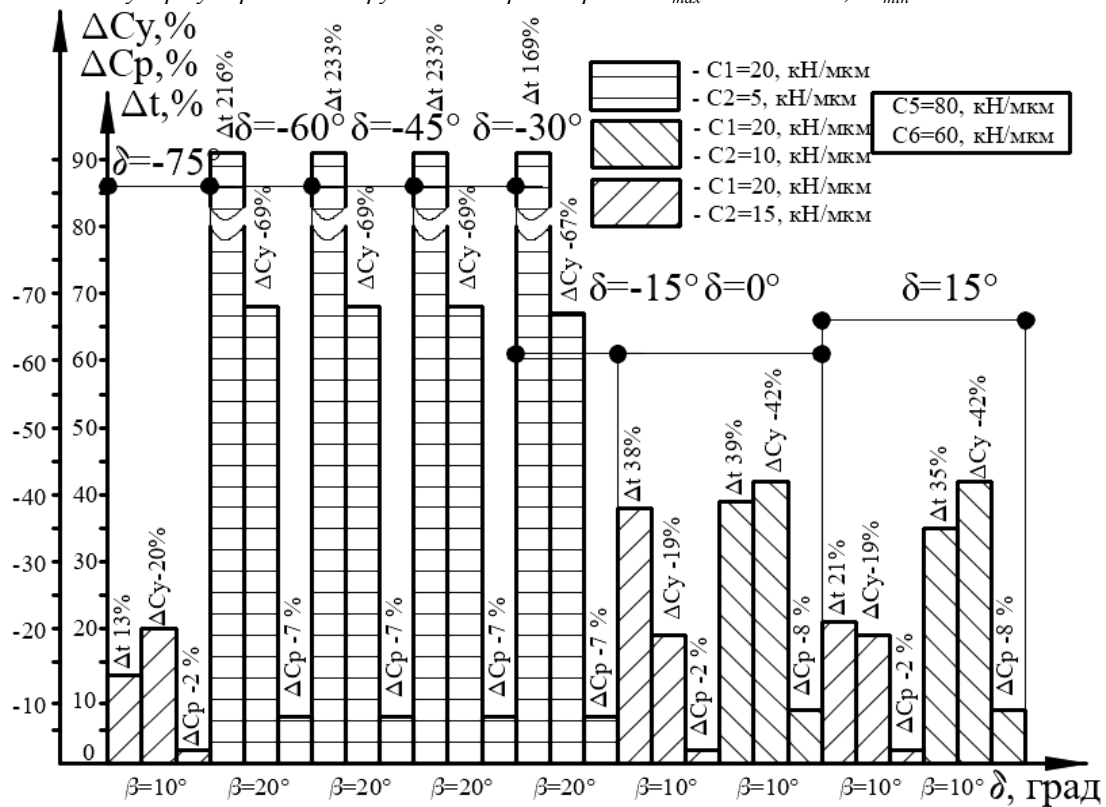


Рис. 4 – Діаграма приросту граничної глибини різання  $t$  та відносного зменшення жорсткості в напрямку дії сили різання  $\Delta C_p$  та вздовж осі  $\Delta C_y$  при використанні різцетримача з орієнтованим центром жорсткості для супорту верстата з пружними параметрами  $c_{5max}=80$  кН/мм,  $c_{6min}=60$  кН/мм

### Обговорення результатів

Для оцінки ефективності використання різцетримача з орієнтованим положенням центра жорсткості з метою підвищення вібростійкості різання на верстатах з різними приведеними пружними параметрами пропонується розрахункові графіки рис. 2, 3, 4. Наведені графіки є кінцевим результатом проведеного дослідження щодо впливу пружних параметрів  $c1_{max}$ ,  $c2_{min}$ ,  $\beta$  різцетримача з орієнтованим центром жорсткості на вібростійкість обробки із визначенням гранично глибини різання  $t$ . В дослідження враховувались різні комбінації пружних приведених параметрів супорта верстата  $c5_{max}$ ,  $c6_{min}$  та кут орієнтації осей жорсткості  $\delta$ .

Для оцінки у відсотковому відношенню на зменшення загального значення приведеної жорсткості пружної системи супорта з встановленим різцетримачем з орієнтованим центром жорсткості  $\Delta C_y$  в напрямку осі  $u$  та  $\Delta C_p$  в напрямку вектору дії сили різання наведені діаграми з інформацією лише у тих випадках, коли спостерігається приріст у відсотковому відношенню граничної глибини різання  $t$  в порівнянні з використанням різцетримача з однаково максимальною жорсткістю. Спостерігається із збільшенням приросту граничної глибини різання значне зменшення жорсткості  $\Delta C_y$ . В деяких випадках використання різцетримача призводить до суттєвого зменшення жорсткості  $\Delta C_y$  при невеликому збільшенні приросту граничної глибини різання.

Оскільки високопродуктивна токарна обробка з підвищеними значеннями сили різання, наприклад на чорнових етапах обробки, а також для важких токарних верстатів обмежується саме недостатністю вібростійкості тому показники жорсткості та геометричної точності не є вагомим фактором в питанні використання подібного різцетримача. Тому використання різцетримачів з орієнтованим положенням центра жорсткості матиме найбільшу ефективність та економічну доцільність для обробки на важких токарних верстатів моделей 1A670, 1M665, 1K670Ф3, 1A665Ф3, 1K675 деталей особливо великих діаметрів (до 2500 мм), які використовуються у вітчизняному виробництві зокрема на ПАО «ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ» та ПрАТ «НКМЗ» при виготовленні лопатевих гідравлічних турбін.

### Висновки

Аналіз отриманої діаграми визначення граничної глибини різання в залежності від пружних параметрів системи супорта та різцетримача дозволяє зробити наступні висновки, що використання різцетримачів з орієнтованим відповідним чином центром жорсткості дозволяє зменшити амплітуди вібрацій при обробці на верстаті з потенційно

нестійкою пружною системою супорта, за рахунок створеного динамічного впливу зі сторони системи оснащення на коливання домінуючої системи супорта із зменшенням негативного впливу координатного зв'язку. Наведені в цій статті результати моделювання можна використовувати в виборі пружних та демпфіруючих параметрів для реалізації їх в конструкції різцетримача з орієнтованим центром жорсткості, для токарних верстатів з різними характеристиками пружної системи супорту.

### Список літератури

1. Emre Özlü, Arash Ebrahimi Araghizad, Erhan Budak. Broaching tool design through force modelling and process simulation. *CIRP Annals*. 2020. V. 69. P. 53–56.
2. Martin Postel, Özşahin O., Altintas Y. High speed tooltip FRF predictions of arbitrary tool-holder combinations based on operational spindle identification. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2017. Vol. 129. P. 48–60.
3. Altintas Y., Aslan D. Integration of virtual and on-line machining process control and monitoring. *CIRP Annals*. 2017. 66 (1). P. 349-352.
4. Ahmadi K., Altintas Y. Identification of machining process damping using output-only modal analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2014. 136 (5), P. 051017. doi: 10.1115/1.4027676.
5. Kilic Z. M., Altintas Y. Generalized mechanics and dynamics of metal cutting operations for unified simulations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2016. 104. P. 1-13.
6. Wen Z., Ding Y., Liu P., Ding H. An Efficient Identification Method for Dynamic Systems with Coupled Hysteresis and Linear Dynamics: Application to Piezoelectric-actuated Nanopositioning Stages. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2019. 24 (1). P. 326-337.
7. Волошин В. Н., Кузнецов Ю. Н., Драчев О. И., Луцив И. В., Шевченко А. В. *Динамика станочно-инструментальной оснастки для высокоэффективной токарной обработки*: монографія. Старий Оскол: ТНТ, 2015. 432 с.
8. Vakulenko S. Analysis of known design solutions of increasing turning vibration stability. *Zbiór artykułów naukowych recenzowanych. "Science, Research, Development Technics and Technology. #29 Gdańsk" Z 40 - Warszawa*, 2020. p. 30-36.
9. Shmagel I., Vakulenko S. Substantiation and choice of mathematical model structure for theoretical study of vibration resistance increasing problem of the lathe dynamic system during turning. *Youth Innovations in Mechanical Engineering: Zbirka prats Mizhnarodnoi nauково-tekhничnoi konferentsii molodykh vchenykh ta studentiv, Igor Sikorsky KPI*, 2021. № 3. P. 179-186. doi: 10.20535/2708-3926.2021.3.23179.
10. Vakulenko S. Theoretical research of the cutting process dynamic characteristics. *Zbiór artykułów naukowych recenzowanych. Konferencji Miedzynarodowej Naukowo-Praktycznej "Science, Research, Development Technics and Technology. #29 Gdańsk" zorganizowanej dla pracowników naukowych uczelni, jednostek naukowo-badawczych oraz badawczych z państw obszaru*



byłego Związku Radzieckiego oraz byłej Jugosławii. (30.05.2020 - 31.05.2020) Z 40 - Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2020. P. 39-44.

#### References (transliterated)

1. Emre Özlü, Arash Ebrahimi Araghizad, Erhan Budak. Broaching tool design through force modelling and process simulation. *CIRP Annals*, 2020, V. 69, pp. 53–56.
2. Martin Postel, Özşahin O., Altintas Y. High speed tooltip FRF predictions of arbitrary tool-holder combinations based on operational spindle identification. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, Vol. 129, pp. 48–60.
3. Altintas Y., Aslan D. Integration of virtual and on-line machining process control and monitoring. *CIRP Annals*, 2017, 66 (1), pp. 349-352.
4. Ahmadi K., Altintas Y. Identification of machining process damping using output-only modal analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, 136 (5), pp. 051017, doi: 10.1115/1.4027676.
5. Kilic Z. M., Altintas Y. Generalized mechanics and dynamics of metal cutting operations for unified simulations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 104, pp. 1-13.
6. Wen Z., Ding Y., Liu P., Ding H. An Efficient Identification Method for Dynamic Systems with Coupled Hysteresis and Linear Dynamics: Application to Piezoelectric-actuated Nanopositioning Stages. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24 (1), pp. 326-337.
7. Voloshyn V. N., Kuznetsov Yu. N., Drachev O. Y., Lutsyv Y. V., Shevchenko A. V. *Динамика станочно-инструментальной оснастки для високоеффективной токарной обработки*. Монографія. Стари Оскол. TNT, 2015. 432 p.
8. Vakulenko S. Analysis of known design solutions of increasing turning vibration stability. *Zbiór artykułów naukowych recenzowanych. "Science, Research, Development Technics and Technology, #29 Gdańsk" Z 40 - Warszawa*, 2020, pp. 30-36.
9. Shmagel I., Vakulenko S. Substantiation and choice of mathematical model structure for theoretical study of vibration resistance increasing problem of the lathe dynamic system during turning. *Youth Innovations in Mechanical Engineering: Zbirka prats Mizhnarodnoi naukovno-tekhnichnoi konferentsii molodykh vchenykh ta studentiv*, Igor Sikorsky KPI, 2021, 3, pp. 179-186, doi: 10.20535/2708-3926.2021.3.23179.
1. Vakulenko S. Theoretical research of the cutting process dynamic characteristics. *Zbiór artykułów naukowych recenzowanych. Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej "Science, Research, Development Technics and Technology, #29 Gdańsk" zorganizowanej dla pracowników naukowych uczelni, jednostek naukowo-badawczych oraz badawczych z państw obszaru byłego Związku Radzieckiego oraz byłej Jugosławii*. (30.05.2020 - 31.05.2020) Z 40 - Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2020, pp. 39-44.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Вакуленко Сергій Валентинович** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», старший викладач кафедри конструювання машин; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-1730-0547; e-mail: svakulenko@gmail.com.

**Vakulenko Serhii** – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Senior lecturer of Department of Machine Design; Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1730-0547; e-mail: svakulenko@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Вакуленко С. В. Теоретичне дослідження ефективності використання спеціального різцетримача з орієнтованим положенням центра жорсткості. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 3-9. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.01.

*Please cite this article as:*

Vakulenko S. Theoretical study of the efficiency of using a special cutter tool holder with an oriented position of center of rigidity. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2(12), pp. 3–9, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.01.

*Надійшла (received) 02.06.2022*

УДК 621.89: 621.762: 621.822

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.02

## ПІДВИЩЕННЯ ОПОРУ ЗНОШУВАННЮ ПРИ ЛЕГУВАННІ МАРГАНЦЕМ ADI

**К. О. ГОГАЕВ<sup>1</sup>, Ю. М. ПОДРЕЗОВ<sup>2</sup>, С. М. ВОЛОЩЕНКО<sup>1</sup>, М. Г. АСКЕРОВ<sup>1\*</sup>,  
М. В. МІНАКОВ<sup>2</sup>, Б. В. ШУРИГІН<sup>2</sup>**<sup>1</sup>відділ № 10, ІПМС НАН України, Київ, УКРАЇНА<sup>2</sup>відділ № 08, ІПМС НАН України, Київ, УКРАЇНА

\*e-mail: mukafatask@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Досліджено вплив вмісту марганцю на зносостійкість ADI, який був ізотермічно загартований при різних температурах. Аналізували зразки ADI з вмістом Mn 0,78% та 0,24%. Структура чавуну створювалася шляхом аустенізуючого нагрівання при 900 °C протягом 30 хвилин. і подальшого ізотермічного гартування в рідкому олові при температурах 310, 330, 350, 380 °C для зразків з високим вмістом марганцю і при 350, 370 °C для зразків з низьким вмістом. Показано, що збільшення вмісту марганцю збільшує кількість залишкового аустеніту за тих же умов загартовування. Це посилює позитивну роль впливу TRIP на процеси зміцнення та опір зношуванню. Дослідження зносостійкості проводили на лабораторному обладнанні, яке моделювало зношення сільськогосподарчої техніки під час оранки. Випробування проводились на зразках 10 x 10 мм<sup>2</sup> в сухому піску при навантаженні 5 кг і швидкості обертання зразків 2,93 м/с. Це приблизно дорівнює швидкості руху техніки при польових роботах. Цикл роботи складав 5 км пробігу. Після кожного циклу зразки зважувались на аналітичних вагах з точністю 0.1 мг. Встановлено, що за всіх умов гартування легування марганцем суттєво підвищує зносостійкість виробів з бейнітного чавуну за рахунок більш інтенсивного протікання деформаційного індукованого мартенситного перетворення в приповерхневих шарах деталей, що піддаються зношуванню. Рентгенівські дослідження показали, що в зразках з підвищеним вмістом марганцю вміст деформаційно індукованого мартенситу в поверхневих шарах збільшується вдвічі. Мікротвердість при поверхневого шару після зсувної деформації при зношуванні збільшується в 1,5 рази в порівнянні з вихідним зразком. Третина відбитків демонструє аномально високу мікротвердість  $H_{\mu, \text{ср}} = 700 - 900$ . Це відповідає твердості мартенситу в чавунах цього класу. Отримані результати лабораторних експериментів є передумовою до широкого практичного використання TRIP – ефекту, як ефективного механізму деформаційного зміцнення поверхневих шарів землеобробної техніки, що працює в режимі зношування.

**Ключові слова:** ADI матеріали; легування марганцем; ізотермічне гартування; TRIP ефект; залишковий аустеніт; мартенсит; опір зношуванню; мікротвердість

INCREASE IN WEAR RESISTANCE DUE TO MANGANESE ALLOYING  
OF ADI CAST IRON**K. GOGAYEV<sup>1</sup>, Yu. PODREZOV<sup>2</sup>, S. VOLOSHCHENKO<sup>1</sup>, M. ASKEROV<sup>1\*</sup>, M. MINAKOV<sup>2</sup>,  
B. SHURIGIN<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Department № 10, IPMS NAS of Ukraine, Kyiv, UKRAINE<sup>2</sup>Department № 08, IPMS NAS of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The effect of manganese content on the wear resistance was studied on ADI materials, that are isothermally quenched at different temperatures. ADI samples with Mn content of 0.78% and 0.24% were analyzed. The final structure of the cast iron was created by austenitizing heating at 900 °C for 30 minutes. and subsequent isothermal quenching in liquid tin at temperatures of 310, 330, 350, 380 °C for samples with high manganese content and at 350, 370 °C for samples with low content. It is shown that increasing the manganese content increases the amount of residual austenite under the same quenching conditions. This enhances the positive role of the TRIP effect on the strengthening of the subsurface layer and wear resistance. Wear resistance studies were performed on laboratory equipment that simulated the wear of agricultural machinery during plowing. Wear resistance tests were performed on samples of 10 x 10 mm<sup>2</sup> in dry sand at a load of 5 kg at speed of 2.93 m/s which is approximately equal to the speed of machinery during agricultural work. The duration of the cycle corresponded to 5 km distance. After each cycle, the samples were weighed on analytical balances with an accuracy of 0.1 mg. It was found that under all conditions of quenching manganese alloying significantly increases wear resistance due to more intensive deformation-induced martensitic transformation in the near-surface layers. X-ray studies have shown that increasing the of manganese concentration doubles the content of deformation-induced martensite in the surface layers. The microhardness of the surface layer after shear deformation during wear increases by 1.5 times compared to the sample without wear. One third of the hardness impressions show abnormally high microhardness  $H_{\mu} = 700 - 900$ . These values correspond to the microhardness of martensite in cast irons of this class. The obtained results of laboratory experiments are a prerequisite for the wide practical use of TRIP - effect as an effective mechanism of deformation strengthening of the surface layers of agricultural machinery operating in the mode of wear.

**Keywords:** ADI materials; manganese alloying; isothermal quenching; TRIP effect; retained austenite; martensite; wear resistance; microhardness

## Вступ

Бейнітний чавун є одним з найважливіших конструкційних матеріалів, який поєднує

технологічність з високими фізико-механічними і експлуатаційними характеристиками. Його аномальне зміцнення пов'язане з реалізацією механізму

мартенситного перетворення індукованого пластичною деформацією (TRIP – ефект). Стандартні схеми об'ємного або поверхневого деформування бейнітного чавуна, значно підвищують параметри деформаційного зміцнення [1], але їх практичне застосування обмежено через значні технологічні ускладнення масового виробництва ливарних виробів. В наших попередніх роботах особлива увага приділена інтенсивному пластичному деформуванню поверхневих шарів виробів, які експлуатуються в режимі зношування [2-4].

З механіки деформування відомо [5], що зсувна компонента деформації (рис. 1) дозволяє накопичувати велику деформацію практично без зміни макроскопічних розмірів. Зокрема, чистий зсув зразка на  $45^\circ$  еквівалентний практично триразовому зменшенню товщини зразка при прокатці. Цей ефект широко використовується в сучасних схемах інтенсивної деформації [6,7], схемах поверхневого зміцнення шляхом протягування або накопчування [8,9].

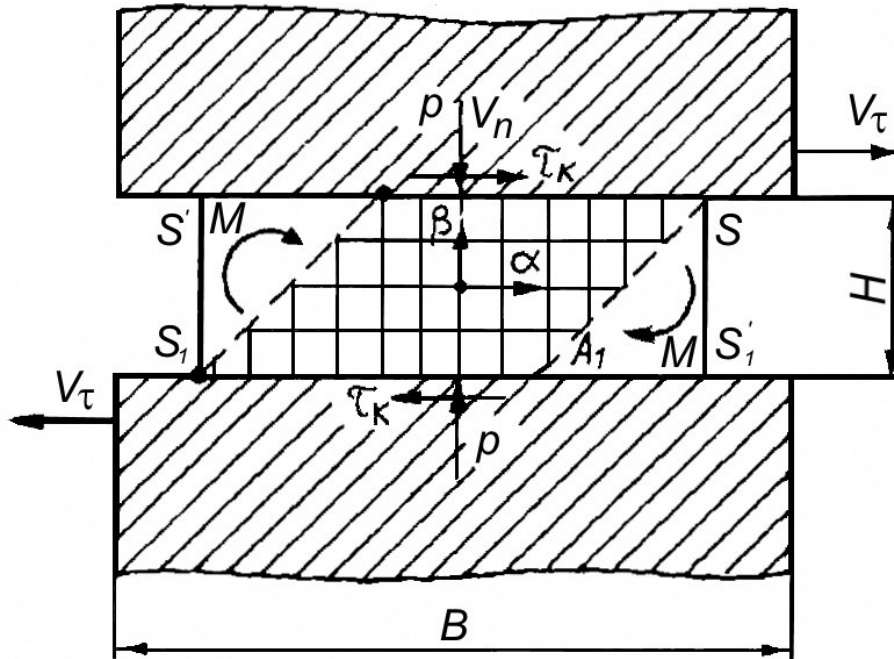


Рис. 1 – Схема зсувної деформації

Структурні зміни в поверхневому шарі після інтенсивного протягування були продемонстровані в роботах О.А. Розенберга з співр. [9] з використанням оптичної металографії. Результати досліджень наочно демонструють велику зсувну деформацію в

поверхневих шарах, де кут нахилу зерен значно перевищує  $45^\circ$  (рис. 2). Наступні електронно-мікроскопічні дослідження [8] показали, що в цих шарах формується деформаційна наноструктура, яка притаманна сильно деформованим матеріалам.

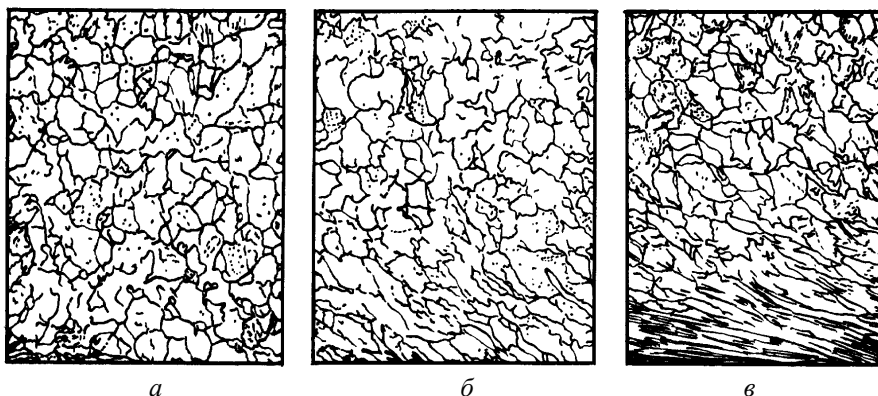


Рис. 2 – Інтенсивний зсув в приповерхневих шарах:  
а – вихідна структура, б – після 10 циклів, в- після 40 циклів [9]

Подібні деформаційні процеси відбувають в при поверхневих шарах при терті. В цьому випадку інтенсивна пластична деформація сприяє реалізації TRIP ефекту з утворенням великої кількості мартенситу, наявність якого призводить до різкого збільшення твердості в при поверхневих шарах. Важливо, що за межами деформованої зони структура матеріалу залишається незмінною (рис. 2). При цьому, розмір (глибина) деформованого шару пропорційний зусиллю в робочій зоні та залежить від сили тертя.

Розглянуті вище особливості впливу структури на комплекс механічних характеристик слід враховувати при розробці оптимальних складів та режимів обробки сільськогосподарських виробів. Зокрема, при розробці принципів раціонального мікро легування доцільно звернути увагу на позитивний вплив легування марганцем на реалізацію деформаційно індукованого мартенситного перетворення [10]. Саме марганець найкраще серед металів знижує температуру мартенситного перетворення. В нашій роботі [11] ми показали, що додаткове легування марганцем ADI – чавунів дозволяє підвищити вміст залишкового аустеніту та значно збільшити швидкість деформаційного зміцнення. Отриманий результат було пояснено збільшенням впливу TRIP-ефекту на формування механічних властивостей. Проте, залишилось не вирішеним важливе практичне питання про вплив легування марганцем на зносостійкість.



а



б

а – в зборі; б – складові частини

Рис. 3 – Установка для моделювання зносу металу при роботі на різних ґрунтах

За допомогою рентгенівського аналізу на ДРОН 3М було визначено вміст залишкового аустеніту на вихідних зразках, отриманих за різних режимів термообробки, та після експериментів на зносостійкість в приповерхневому шарі біля області тертя. Випробування мікротвердості проводили на приладі ПМТ-3 з зусиллям на індентор 20 та 100 г,

щоб оцінити глибину мартенситного прошарку за методикою, описаною в роботі [2].

### Результати експериментів

На рис. 4 наведені рентенограми для зразків ADI з різним вмістом Mn, які загартовані при 350 °С протягом 90 хв.

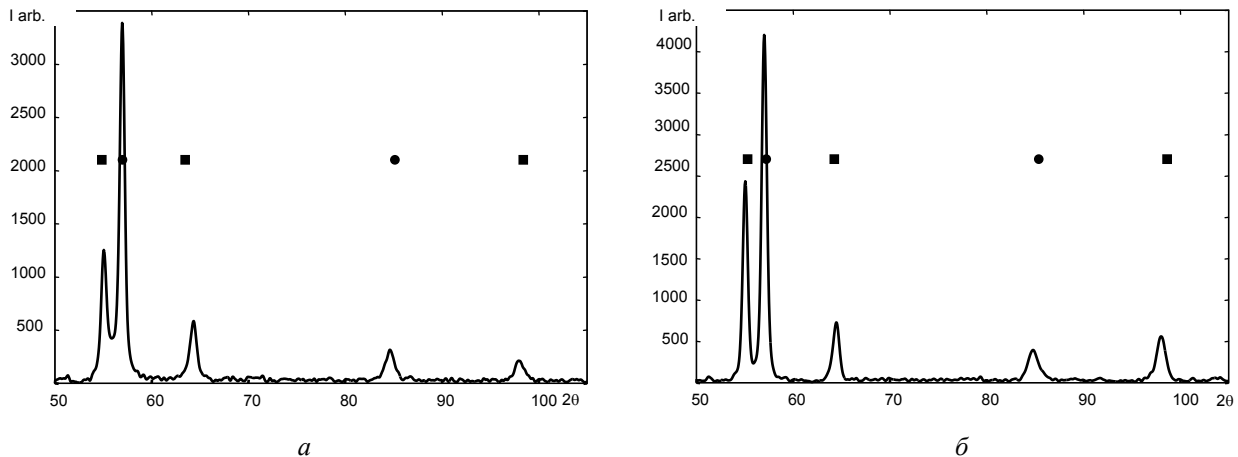


Рис. 4 – Рентгенограми зразків ADI з вмістом Mn: 0,24 % (а) та 0,78% (б) які загартовані при 350 °С з витримкою протягом 90 хв. ■ – лінії аустеніту, ● – лінії фериту [11]

Наведені в таблиці результати рентгенівського аналізу показують, що за однакових умов гартування при збільшенні вмісту марганцю кількість залишкового аустеніту підвищується. В усіх досліджених випадках підвищенням температури гартування веде до збільшення вмісту залишкового аустеніту.

Границя плинності та твердість збільшується з температурою зменшуються з температурою

гартування, тоді, як пластичність ударна в'язкість – збільшуються. З табл. 1 видно, що такі закономірності зберігаються незалежно від складу, але кількісні значення цих характеристик в великій мірі залежать від вмісту Mn. В усіх випадках збільшення вмісту марганцю веде до збільшення твердості, але зменшує ударну в'язкість.

Таблиця – Фазовий склад, механічні властивості та параметри зношування ADI з різним вмістом Mn

T <sub>із</sub> втр., °С	Mn	Аустеніт вихідний	Аустеніт після тертя	Мартенсит після тертя	Середня трата ваги на км	НВ	КС
	% ваг	% об.	% об.	% об.	г		
330	0,78	42,7	24,4	18,3	7,55	365	45
350	0,78	43,9	27,8	16,1	15,0	347	55
380	0,78	46,6	31,2	15,4	16,9	323	90
330	0,24	34,6	20,7	13,9	16,2	345	67
350	0,24	37,5	28,4	9,1	25,3	327	85
370	0,24	38,7	30,7	8,0	26,4	312	125

Проведений в роботі [11] аналіз діаграм навантаження зразків, які випробувані на одновісний розтяг, показав, що при всіх деформаціях, де працює TRIP ефект, швидкість зміцнення в зразках з великим вмістом марганцю збільшується приблизно вдвічі. Прискорення утворення деформаційно індукованого мартенситу в зразках з підвищеним вмістом марганцю відбувається як за рахунок більшого вмісту залишкового аустеніту так і через зниження температури мартенситного перетворення. Це прискорює зміцнення поверхневого шару при терті і підвищує його зносостійкість. З наведених в таблиці даних випливає, що при всіх умовах гартування

зразки з більшим вмістом Mn зношуються вдвічі повільніше.

Провести кількісний аналіз структурних змін при терті достатньо складно через малу товщину деформованого поверхневого шару, в якому відбулось мартенситні перетворення. При відносно малому навантаженні на інструмент, яке для культиваторів та плугів сягає 2-8 МПа глибина деформованого шару складає 2-5 мкм [2]. Це унеможливає використання звичайних для металографічного аналізу процедур: шліфування – через внесення додаткових деформаційних дефектів; полірування та травлення – через часткове видалення матеріалу поверхневих шарів. Аналіз отриманих в роботі результатів з

використанням рентгенівського аналізу та вимірювання мікротвердості також потребує їх адаптації до умов експерименту.

Наведені в таблиці дані рентгенівського аналізу демонструють значний вміст мартенситу в при поверхневому шарі. Його кількість збільшується в сплавах з підвищеним вмістом марганцю, що підтверджує гіпотезу про позитивний вміст марганцю на TRIP – ефект. Кількість перетвореного мартенситу значно вища, ніж спостерігалось нами [2,3] та іншими авторами [12] при об'ємних схемах деформування. Наприклад, при стисненні на 25% зразка, загартованого при 330 °С, вміст мартенситу складав 5%. Згідно теорії Коена Олсона [13] кількість утвореного мартенситу пропорційна ступеню деформації. Отже, зсувна деформація поверхневого шарі досягає великих значень. Але рентгенівські дані, на жаль, дають дещо занижені значення вмісту мартенситу в поверхневому шарі, оскільки, як відомо, рентгенівські промені здатні проникати на глибину до 20 мкм, де зсувна деформація відсутня. Крім того, така специфіка рентгенівських досліджень ускладнює аналіз градієнтного характеру деформації та зміну вмісту мартенситу по глибині.

В роботах [2,14] нами було запропоновано аналізувати градієнтні зміни структури та властивостей в тонкому приповерхневому шарі з використанням схем мікро та наноіндентування. Основна ідея полягає в тому, що глибина занурення індентора є співставною з глибиною зміцненого шару. При збільшенні прикладеного зусилля індентор потрапляє в недеформований шар і виміряне значення твердості зменшується. Запропонована в роботі [2] спрощена двошарова схема градієнтної структури дозволяє по результатам вимірювання твердості визначати товщину зміцненого шару. Цей метод був успішно використаний нами при оцінці товщини шару в деформованому ADI – чавуні і в незмінному вигляді планувався для використання в даній роботі. Проте, дослідження мікротвердості, виконані на зразках з великим вмістом марганцю, продемонстрували великий розбіг значень через притаманну цьому елементу значну неоднорідність розподілу по структурі. Тому в основу експерименту було покладено порівняльний статистичний аналіз достатньо великих масивів даних вимірювання твердості поверхневих шарів.

Вимірювання твердості проводили на зразку з підвищеним вмістом марганцю, який був загартований при температурі 330 °С. Згідно даним наведеним в таблиці цей зразок після тертя продемонстрував найменше зношування та найбільший вміст мартенситу в при поверхневому шарі. Величина твердості розраховувалась, як усереднення від експериментальних значень, отриманих на 40 відбитках. Експерименти проводили на поверхні, яка не піддавалась зношуванню та на поверхні того ж зразка після в зношування за режимом, що описаний в методичному розділі.

Індентування проводили зусиллями 20 та 100 г. Оскільки розкид значень детермінований хімічною та структурною неоднорідністю по перерізу, окрема увага приділялась розподілу твердості в отриманому ансамблі значень.

Експерименти показали, що для вихідного зразка середнє значення мікротвердості складає  $H_{\mu\text{сер}} = 489$ . Розкид значень змінюється в діапазоні 390 – 620. Після зношування середнє значення значно підвищується до  $H_{\mu\text{сер}} = 692$ , розкид складає 460 – 977. Важливо, що у третині відбитків твердість на поверхні зношування вища, ніж найбільше значення твердості вихідного зразка. Тобто, ці відбитки отримані з областей структури, в яких відбулось деформаційно індукване мартенситне перетворення. Такі великі значення мікротвердості є характерними для мартенситу, який утворюється в бейнітному чавуні. Кількість місць, де мартенсит визначається за високими значеннями твердості, дещо більша, ніж об'ємний вміст мартенситу, отриманий з рентгенівських вимірювань.

Збільшення навантаження на індентор до 100 г практично не вплинуло на значення твердості вихідного зразка  $H_{\mu\text{сер}} = 480$ , але дещо знизило виміряні параметри твердості зразка, що піддавався експериментам на зношування  $H_{\mu\text{сер}} = 590$ . Це свідчить про наявність градієнта структурних змін в приповерхневому шарі під час зношування.

## Висновки

Легування марганцем дозволяє суттєво підвищити зносостійкість виробів з бейнітного чавуну за рахунок більш інтенсивного протікання деформаційного індукваного мартенситного перетворення в при поверхневих шарах деталей, що піддаються зношуванню.

Реалізація інтенсивної пластичної деформації в приповерхневих шарах дозволяє за оптимальних умов дозволяє перетворити більшу частину аустеніт в мартенсит. При цьому твердість поверхневого шару зростає вдвічі і відповідним чином зростає зносостійкість.

Зміцнення за рахунок мартенситного перетворення має градієнтний характер, твердість поступово зменшується від максимальних значень на поверхні до значень, характерних для структури вихідного чавуну за межами деформованого шару.

Отримані результати лабораторних експериментів є передумовою до широкого практичного використання TRIP – ефекту, як ефективного механізму деформаційного зміцнення поверхневих шарів землеобробної техніки.

## Список літератури

1. Adel Nofal. Advances in the Metallurgy and Applications of ADI. *Journal of Metallurgical Engineering (ME)*. 2013. Vol. 2. Issue 1. P. 1-18.

- Гогаєв К. О., Подрезов Ю. М., Волощенко С. М. *Новые области использования высокопрочных чугунок*. Наука про матеріали: досягнення та перспективи. Т.1. К.: Академпер., 2018. 652 с.
- Гогаєв К. О., Подрезов Ю. М., Волощенко С. М., Аскеров М. Г., Мінаков М. В., Луговський Ю. Ф. Аналіз деформаційного зміцнення АДИ при температурах ізотермічного загартування. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 1 (3). С. 3-8. doi: 10.20998/2413-4295.2020.03.01.
- Волощенко С. М. Бейнітний високоміцний чавун для ґрунтообробної техніки. *Агроперспектива*. 2006. № 7. С. 50-51.
- Segal V. M. Materials processing by simple shear. *Materials Sci. Eng. A*. 2002. 197. P. 157-164.
- Kopilov V. I. Application of ECAP — Technology for Producing Nano- and Microcrystalline Materials. *In: Investigation and Application of Severe Plastic Deformation. Proc. of NATO ARW. 1999*. Moscow, Russia, 2-7 August 1999. P. 23-27. doi: 10.1007/978-94-011-4062-1.
- Beygelzimmer Y., Varyukhin V., Orlov D. On Ultrafine Grained Materials: Properties and Structure. *In: Proceedings of the Second Int. Symp., Los Alamos Nat. Lab. Edition, 2002*. P. 234-238.
- Розенберг О. А., Цеханов Ю. А., Шейкин С. Е. *Технологическая механика деформирующего протягивания*. Гос. технол. акад. Воронеж, 2001. 203 с.
- Розенберг О. А., Новиков Н. В., Шейкин С. Е., Фирстов С. А., Подрезов Ю. Н., Даниленко Н. В. Формирование градиентной наноструктуры на поверхности деталей методом пластического деформирования. *Металлофиз. новейшие технол.* 2004. 26. № 11. С. 1493-1500.
- Suh D. W., Ryu J. H., Joa M. S., Yang H. S., Lee K. Y., Bhadeshia H. K. D. H. Medium alloy manganese rich transformation induced plasticity steels. *Metall. Mater. Trans. A*. 2013. 46. P. 286- 293. doi: 10.1007/s11661-012-1402-3.
- Гогаєв К. О., Подрезов Ю. М., Волощенко С. М., Аскеров М. Г., Мінаков М. В. Вплив вмісту Mn на фазовий склад та механічні властивості бейнітного чавуну (ADI). *Металознавство та обробка металів*. 2021. № 27(100). С. 3-15. doi: 10.15407/mom2021.04.003.
- Li X. H., Saal P., Gan W. M., Hoelzel M., Volk W., Petry W., and Hofmann M. Strain-Induced Martensitic Transformation Kinetic in Austempered Ductile Iron (ADI). *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017. V. 49(8). P. 94-104. doi: 10.1007/s11661-017-4420-3.
- Olson G. B., Cohen M. Kinetics of strain - induced martensitic nucleation. *Metall Trans A*. 1975. 6. 791. doi: 10.1007/BF02672301.
- Danylenko M., Gorban V., Podrezov Yu., Firstov S. A., Rosenberg O., Shejkin S., Morito F., Yamabe-Mitarai Yoko. Gradient Structure Formation by Severe Plastic Deformation. *Materials Science Forum*. 2006. Vol. 503-504. P. 787–792. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.503-504.787.

## References (transliterated)

- Adel Nofal. Advances in the Metallurgy and Applications of ADI. *Journal of Metallurgical Engineering (ME)*, 2013, Vol. 2, Issue 1, pp. 1-18.
- Gogaev K. O., Podrezov Yu. M., Voloshchenko S. M. *Novye oblasti ispol'zovaniya vysokoprochnykh chugunok*. Nauka pro materiali: dosyagnennyya ta perspektivi. V.1. K. Akademp., 2018. 652 p.
- Gogaev K., Podrezov Y., Voloshchenko S., Askerov M., Minakov N., Lugovskoy Y. Analysis of strain hardening of ADI at isothermal hardening temperatures. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 1 (3), pp. 3–8, doi: 10.20998/2413-4295.2020.03.01.
- Voloshchenko S. M. Bejnitnij visokomicnij chavun dlya gruntoobrobnoj tekhniki. *Agrooperspektiva*, 2006, 7, pp. 50-51.
- Segal V. M. Materials processing by simple shear. *Materials Sci. Eng. A*, 2002, 197, pp. 157-164.
- Kopilov V. I. Application of ECAP — Technology for Producing Nano- and Microcrystalline Materials. *In: Investigation and Application of Severe Plastic Deformation. Proc. of NATO ARW, 1999*. Moscow, Russia, 2-7 August 1999, pp. 23-27, doi: 10.1007/978-94-011-4062-1.
- Beygelzimmer Y., Varyukhin V., Orlov D. On Ultrafine Grained Materials :Properties and Structure. *In: Proceedings of the Second Int. Symp., Los Alamos Nat. Lab. Edition, 2002*, pp. 234-238.
- Rozenberg O. A., Cekhanov Yu. A., Shejkin S. E. *Tekhnologicheskaya mekhanika deformiruyushchego protyagivaniya*. Gos. tekhnol. akad. Voronezh, 2001. 203 p.
- Rozenberg O. A., Novikov N. V., Shejkin S. E., Firstov S. A., Podrezov Yu. N., Danilenko N. V. Formirovanie gradientnoj nanostrukturny na poverhnosti detalej metodom plasticheskogo deformirovaniya. *Metallofiz. noveishie tekhnol.*, 2004, 26, 11, pp. 1493-1500.
- Suh D. W., Ryu J. H., Joa M. S., Yang H. S., Lee K. Y., Bhadeshia H. K. D. H. Medium alloy manganese rich transformation induced plasticity steels. *Metall. Mater. Trans. A*, 2013, 46, pp. 286- 293, doi: 10.1007/s11661-012-1402-3.
- Gogaev K. O., Podrezov Yu. M., Voloshchenko S. M., Askerov M. G., Minakov M. V. Sensitivity to Mn content mechanical properties of phase composition of ADI. *Metalozn. obrobka met.*, 2021, 27(100), pp. 3-15, doi: 10.15407/mom2021.04.003.
- Li X. H., Saal P., Gan W. M., Hoelzel M., Volk W., Petry W., and Hofmann M. Strain-Induced Martensitic Transformation Kinetic in Austempered Ductile Iron (ADI). *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, V. 49(8), pp. 94-104, doi: 10.1007/s11661-017-4420-3.
- Olson G. B., Cohen M. Kinetics of strain - induced martensitic nucleation. *Metall Trans A*, 1975, 6, 791, doi: 10.1007/BF02672301.
- Danylenko M., Gorban V., Podrezov Yu., Firstov S. A., Rosenberg O., Shejkin S., Morito F., Yamabe-Mitarai Yoko. Gradient Structure Formation by Severe Plastic Deformation. *Materials Science Forum*, 2006, Vol. 503-504, pp. 787–792, doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.503-504.787.

**Відомості про авторів (About authors)**

**Гогаєв Казбек Олександрович** - доктор технічних наук, чл. кор. НАН України, професор, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, зав. відділом № 10 ІПМ НАН України, м. Київ, Україна; e-mail: gogaev@ipms.kiev.ua.

**Kazbek Gogaev** - doctor of technical, professor, Institute of Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, head of Department №10 of IPM of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: gogaev@ipms.kiev.ua.

**Подрезов Юрій Миколайович** - доктор фізико-математичних наук, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, зав. відділом № 08 ІПМ НАН України, м. Київ, Україна; e-mail: yupodrezov@ukr.net.

**Yuriy Podrezov** - Doctor of Physics and Mathematics, Institute of Materials Science, NAS of Ukraine, Head of Department № 08 of the IPM NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: yupodrezov@ukr.net.

**Волощенко Сергій Михайлович** - доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, старший науковий співробітник відділу №10 ІПМ НАН України, м. Київ, Україна; e-mail: volosch@ipms.kiev.ua.

**Sergey Voloshchenko** - doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, Senior Researcher, Department №10 of IPM of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: volosch@ipms.kiev.ua.

**Аскеров Мукафат Гейбат оглы** - кандидат технічних наук, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, старший науковий співробітник відділу № 10 ІПМ НАН України, м. Київ, Україна; e-mail: mukafatask@gmail.com.

**Askerov Mukafat Geibat ogly** - candidate of technical sciences, Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, senior researcher of the department №10 of IPM of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: mukafatask@gmail.com.

**Мінаков Миколай Веніамінович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, відділ № 08 ІПМ НАН України, м. Київ, Україна; e-mail: vbyfrjd86@gmail.com

**Nikolay Minakov** – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, Department № 08 of IPM of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: vbyfrjd86@gmail.com.

**Шуригін Борис Вікторович** - науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, відділ №08 ІПМ НАН України, м. Київ, Україна; e-mail: vbyfrjd86@gmail.com.

**Boris Shurigin** - Researcher, Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, Department № 08 of IPM of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: bvsch@i.ua

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Гогаєв К. О., Подрезов Ю. М., Волощенко С. М., Аскеров М. Г., Мінаков М. В., Шуригін Б. В. Підвищення опору зношуванню при легуванні марганцем ADI. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 10-16. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.02.

*Please cite this article as:*

Gogaev K., Podrezov Y., Voloshchenko S., Askerov M., Minakov N., Shurigin B. Increase in wear resistance due to manganese alloying of ADI cast iron. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2(12), pp. 10–16, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.02.

*Надійшла (received) 05.06.2022*



UDC 62-50:621.924

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.03

## SIMULATION MODELING OF 2.5D MILLING DYNAMICS BY END MILLS

Y. PETRAKOV\*, M. SIKAILO

Department of Machine Building Technology, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, UKRAINE

\*e-mail: ypetrakov.86@gmail.com

**ABSTRACT** A mathematical model for simulation modeling of 2.5D end milling is presented. The model takes into account the loop closed of the cutting process in the elastic machining system through the feedback in the form of elastic shifts along the coordinate axes. The dynamics of the system are represented by a single-mass model with two degrees of freedom. A block diagram of the milling process using transfer functions, which reflects the cross-links of the real machining system. It is shown that the main cause of regenerative oscillations is cutting along the trail from the previous pass. The mathematical model is compiled in state variables, which allows the use of numerical methods for simulation modeling. The linearization coefficients relate the cutting force to the feed per tooth of the mill and the cutting depth. An application program has been created that uses a time-frequency approach to modeling the 2.5D milling process. Therefore, it is possible to observe dynamic processes both in the form of transient characteristics in time and in the form of amplitude-frequency characteristics in the form of a Nyquist diagram. An application program has been created, which makes it possible to observe processes in time in an interactive mode, thanks to the built-in virtual oscilloscope. It provides the possibility of a simulation experiment to determine the influence of all the initial data of the system on the dynamics of its behavior. The results of the influence of the cutting mode for determining the boundary of stability in the coordinates of the cutting speed – feedrate are presented. It is shown that a modified stability criterion according to the parameters of the Nyquist diagram on the complex plane can be used to estimate the stability of the machining system. The created application program allows to determine the chatter-free cutting mode and in practice is an important tool for the programmer-technologist when assigning the cutting mode to the control program 2.5D milling on CNC machine.

**Keywords:** simulation modeling; milling dynamics; stability diagram; chatter-free cutting mode

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ 2.5D ФРЕЗЕРУВАННЯ КІНЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ

Ю. В. ПЕТРАКОВ, М. О. СІКАЙЛО

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Київ, УКРАЇНА

**АНОТАЦІЯ** Представлено математичну модель для імітаційного моделювання 2.5D фрезерування кінцевими фрезами. Модель враховує замкненість процесу різання в пружній обробній системі через зворотні зв'язки у вигляді пружних зсувів за осями координат. Динаміка системи представлена одномасовою моделлю з двома ступенями свободи. Складено структурну схему процесу фрезерування з використанням передатних функцій, що відображає перехресні зв'язки реальної обробної системи. Показано, що основною причиною виникнення регенеративних коливань є оброблення за слідом. Математична модель складена у змінних станах, що дозволяє застосовувати чисельні методи для імітаційного моделювання. Коефіцієнти лінеаризації пов'язують силу різання з подачею на зуб фрези та з глибиною різання. Створено прикладну програму, яка використовує часово-частотний підхід до моделювання процесу 2.5D фрезерування. Тому є можливість спостерігати динаміку обробної системи при різанні як у перехідних процесах у часі, так і у вигляді амплітудно-частотних характеристик діаграми Найквіста. Створено прикладну програму, яка дає можливість спостерігати в інтерактивному режимі процесу в часі, завдяки вбудованому віртуальному осцилографу. Вона забезпечує можливість імітаційного експерименту визначення впливу всіх вихідних даних системи на динаміку її поведінки. Наведено результати впливу режиму різання для визначення межі стійкості в координатах швидкість різання – подача. Показано, що з оцінки стійкості обробної системи можна використовувати модифікований критерій стійкості за параметрами діаграми Найквіста на комплексній площині. Створена прикладна програма дозволяє визначити безвібраційний режим різання і на практиці є важливим інструментом програміста-технолога при призначенні режиму різання в управляючу програму 2.5D фрезерування на верстаті з ЧПК.

**Ключові слова:** імітаційне моделювання; динаміка фрезерування; діаграма сталості; безвібраційний режим різання

### Introduction

The manufacture of parts in modern mechanical engineering is mainly carried out by subtractive methods by removing the allowance during the cutting process on CNC machines. A large number of operations are carried out by milling, and control programs for CNC machines

are designed in CAM systems. Achievement of the main goal – maximum productivity under the conditions of processing in terms of accuracy and quality – is implemented by such systems by the method of control by a priori information. With the complication of the geometry of machined surfaces, the increase in requirements for the quality of processing, and the

increase in cutting speeds, the problem of assigning a vibration-free machining process is becoming increasingly important [1]. It is clear that with such a control method for solving such problems, in particular, the choice of cutting mode and some other process parameters, there is no alternative to a preliminary computer simulation of the process. This approach allows reproduce the behavior of real systems in virtual reality systems and predicts processing without significant material costs [2]. Therefore, the creation of an adequate digital model of the milling process and the development of methods for its computer simulation is an urgent scientific and technical problem.

### Problem status analysis

An adequate model of the milling process can quickly and accurately predict the vibration limits, which are set by analytical dependencies that relate the vibration limit to the cutting mode. These dependencies form a Stability Lobes Diagram (SLD) in the feed–cutting speed coordinates [3]. However, the proposed analytical method does not allow the use of more complex models that predetermine the use of numerical modeling methods. To ensure the adequacy of the model, it is necessary to take into account four main characteristics of the milling process: the coefficients of the linearized dependence of the cutting force, the dynamic parameters of the system, the cutting mode, and the tool geometry [4].

It is proposed to use the time-frequency method to obtain the SLD for the milling process, and then optimize the cutting process. Among the reasons causing chatter during cutting, the main one is trace machining, which should be represented in the model by a function of a delay argument. In this case, the only possible method of modeling in the time domain should be the numerical method, which leads to adequate solutions [5]. The proposed approaches to modeling the milling process make it possible to outline ways and means of eliminating chatter by both passive and active methods.

To simulate the milling process, taking into account the machining along the trace, it is necessary to determine the geometry of the machined surface, both taking into account the formation of micro rough nesses during the interaction of the cutter edge with the workpiece, and the vibrations of the technological machining system. It is clear that these two processes occur simultaneously and form a layer of allowance for the next cutter tooth. In works [6,7], devoted to chatter during milling, one can find an image of such a surface, presented graphically without taking into account the interaction of these two processes. In addition, it should be noted that the formation of the surface in each section of the cutter is performed by one tooth, i.e. its peak, which is also insufficiently represented in the modeling of the process [8]. It should be noted that the relief of the machined surface is schematically depicted in various machining schemes in the form of a wavy line, but is not presented as a result of a computer simulation of the

milling process. Therefore, the adequacy of such a representation is also questionable.

Chatter is a type of self-excited vibration, and the two most widely used theories to explain vibration in milling are the regenerative effect and the mode coupling effect. Ignoring this relationship leads to a large difference between the results of stability prediction using the classical model and the experimental results [9]. These two mechanisms are shown to coexist during the actual milling process, and the generally ignored effect of structural mode coupling has a large impact on the stability lobe diagram in many practical milling applications. Therefore, the development of a model that takes into account cross-related terms will significantly increase its adequacy.

If the tool can vibrate in two directions, then this leads to self-excited vibrations [10]. It is proposed, at a given spindle speed, to predict the depth of cut at which self-excited vibrations become unstable. This is called the vibration stability boundary, and the relationship between RPM and the depth of cut is called the stability lobe diagram. Therefore, it is important to have a tool for predicting the stability margin.

### The aim and objectives of the study

To develop a mathematical model for simulating the 2.5D milling process, taking into account the cross-links of the structure of a closed machining system, using numerical methods in the time and frequency domain to determine the chatter-free cutting mode with the Stability Lobes Diagram.

To achieve this objective, it is necessary to solve the following tasks:

1. Compile a mathematical model of 2.5D milling, taking into account a single-mass model with two degrees of freedom.
2. In the model, provide a representation of the cutting process in a closed elastic machining system and cutting along the trace.
3. Develop an application program for modeling dynamic processes in the time and frequency domains using the modified Nyquist stability criterion.

### Statement of the main material

The main disturbing influence is the cutting force, which, when milling with end mills, can be determined by the empirical dependence:

$$F = C_p a^k b, \quad (1)$$

where  $a$  is the thickness,  $b$  is the cutting width,  $C_p$ ,  $k$  are the empirical coefficient and exponent.

The cutting force acts in an elastic machining system and can be decomposed into normal  $F_n$  and tangential  $F_t$  components (Fig. 1).

In [11], it is proposed to determine the components of the cutting force by empirical dependencies:

$$F_t = k_{tc}bf_t\sin\varphi + k_{te}b, \quad F_n = k_{nc}bf_t\sin\varphi + k_{ne}b, \quad (2)$$

where  $k_{tc}$ ,  $k_{te}$ ,  $k_{nc}$ ,  $k_{ne}$  are empirical coefficients,  $f_t$  is the feed per tooth,  $\varphi$  is the cutting angle.

The experimental data obtained in [12] for the machining of an aluminum alloy show that the coefficients for the milling width are several orders of magnitude smaller than the coefficients for the first term. Similar data are for the machining of other alloys. Therefore, with a high degree of adequacy, only the first of the terms in formulas (2) can be taken into account.

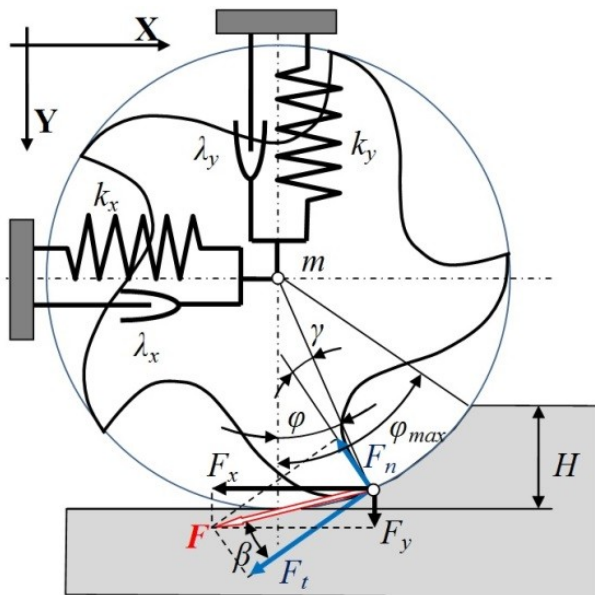


Fig. 1 – Scheme of end milling

In [11], it is proposed to determine the components of the cutting force by empirical dependencies:

$$F_t = k_{tc}bf_t\sin\varphi + k_{te}b, \quad F_n = k_{nc}bf_t\sin\varphi + k_{ne}b, \quad (2)$$

where  $k_{tc}$ ,  $k_{te}$ ,  $k_{nc}$ ,  $k_{ne}$  are empirical coefficients,  $f_t$  is the feed per tooth,  $\varphi$  is the cutting angle.

The experimental data obtained in [12] for the machining of an aluminum alloy show that the coefficients for the milling width are several orders of magnitude smaller than the coefficients for the first term. Similar data are for the machining of other alloys. Therefore, with a high degree of adequacy, only the first of the terms in formulas (2) can be taken into account.

Thus, from the geometric relationships of the diagram in Fig. 1, the cutting force is:

$$F = bf_t\sin\varphi\sqrt{k_{tc}^2 + k_{nc}^2}. \quad (3)$$

Taking into account that the tangential component acts along the normal to the front surface of the cutting wedge of the cutter tooth, it is possible to determine the components of the cutting force along the coordinate axes:

$$F_x = F\cos(\varphi - \gamma - \beta), \quad F_y = F\sin(\varphi - \gamma - \beta) \quad (4)$$

where  $\gamma$  – rake angle  $\sim 10$  degrees, and angle  $\beta = \arctan(F_n/F_t) = \arctan(k_{nc}/k_{tc}) = \arctan(0.5) = 26.5$  degrees.

The maximum value of the cutting angle  $\varphi$  is determined from the geometric relations of the scheme in Fig. 1:

$$\varphi_{\max} = \arccos \frac{R_m - H}{R_m}, \quad (5)$$

where  $R_m$  – radius of mill,  $H$  – cutting depth.

From formula (1), taking into account (5), it follows that the cutting force is determined by two components of the cutting mode: the feed  $f_t$  per cutter tooth and the cutting depth  $H$ . Such a dependence is non-linear and can be linearized with a sufficient degree of accuracy as a function of the cutting mode:

$$F = k_f f_t + k_H H, \quad (6)$$

where  $k_f$ ,  $k_H$  – linearization coefficients.

The linearization coefficients are determined according to general rules as partial derivatives of the cutting force (1) undercutting conditions at the linearization point. To determine them, it is necessary to obtain the dependence of the cutting force on the components of the mode – the feed  $f_t$  per tooth and the depth  $H$  of cutting. The cutting thickness for cylindrical milling is  $a = f_t \sin\varphi$  and to express the cutting angle through the depth  $H$ , it can use the formula (5) and the trigonometric relationship:

$$\sin\varphi = \sin\left(\arccos \frac{R_m - H}{R_m}\right) = \frac{\sqrt{2R_m H - H^2}}{R_m}. \quad (7)$$

Substituting (7) into (3), it obtains a cutting force formula convenient for differentiation:

$$F = C_p \left(\frac{f_t}{R_m}\right)^k \left(2R_m H - H^2\right)^{\frac{k}{2}}. \quad (8)$$

Now there is a possibility to find the required linearization coefficients. Dependence of cutting force on feed:

$$k_f = C_p k(f_t)_0^{k-1} \left( \frac{2R_m H_0 - H_0^2}{R^m} \right)^k. \quad (9)$$

The dependence of the cutting force on the depth of cut is determined by the coefficient:

$$k_H = C_p (f_t)_0^k k (2R_m H_0 - H_0^2)^{k-1} (2R_m - 2H_0). \quad (10)$$

The dynamic system is represented as a single-mass system with two degrees of freedom with elastic constraints with stiffnesses  $k_x$  and  $k_y$  and damping  $\lambda_x$  and  $\lambda_y$  in the direction of the XY axes of the coordinate system. The equations of motion are:

$$\begin{cases} \frac{s^2 x}{\omega_x^2} + \frac{sx}{\omega_x} + x = \frac{1}{k_x} F_x \\ \frac{s^2 y}{\omega_y^2} + \frac{sy}{\omega_y} + y = \frac{1}{k_y} F_y \end{cases}, \quad (11)$$

where  $\omega_x, \omega_y$  are the frequencies of natural vibrations,  $x, y$  are elastic displacements along the corresponding coordinate axes,  $s$  is the Laplace operator.

The frequencies of natural vibrations of the system along the coordinate axes are determined experimentally according to the method presented in [13]. From the analysis of the amplitude-frequency characteristic, the main harmonic of the experimental spectrum is taken as the frequency of natural oscillations.

To simulate the milling process, it is convenient to present it in the form of a block diagram shown in Fig.2. In accordance with (11), the elastic technological system

is presented as a single-mass system with two degrees of freedom with rigidities  $k_x$  and  $k_y$ , periods of natural vibrations  $T_x = 2\pi/\omega_x$  and  $T_y = 2\pi/\omega_y$ , and oscillation damping coefficient  $\zeta$ . This is how the representation of the cross-links present in the actual machining system is provided. The closure of the elastic technological system is ensured by the introduction of feedback for each coordinate by their elastic displacements:

$$f_{ta} = f_{t1} - \delta f, \quad H_a = H_1 - \delta h. \quad (12)$$

Machining along the traces is represented by two links of the delay argument  $e^{-\tau s}$ , where  $\tau$  is the time of cutting the allowance between the passes of two adjacent cutter teeth. The components  $F_x$  and  $F_y$  of the cutting force, in accordance with the diagram in Fig. 1, depending on the cutting angle:

$$k_{Fx} = \text{Cos}(\varphi_m - \gamma - \beta), \quad k_{Fy} = \text{Sin}(\varphi_m - \gamma - \beta), \quad (13)$$

where  $\varphi_m$  – middle cutting angle ( $\varphi_{max}/2$ ).

According to this scheme, it is possible to obtain a mathematical model of the process, which determines both time and frequency characteristics. It can be seen that the process can be characterized by four transfer functions:

$$\begin{aligned} W_1(s) &= \frac{\delta f(s)}{f_r(s)}, \quad W_2(s) = \frac{\delta f(s)}{H(s)}, \\ W_3(s) &= \frac{\delta h(s)}{f_r(s)}, \quad W_4(s) = \frac{\delta h(s)}{H(s)}. \end{aligned} \quad (14)$$

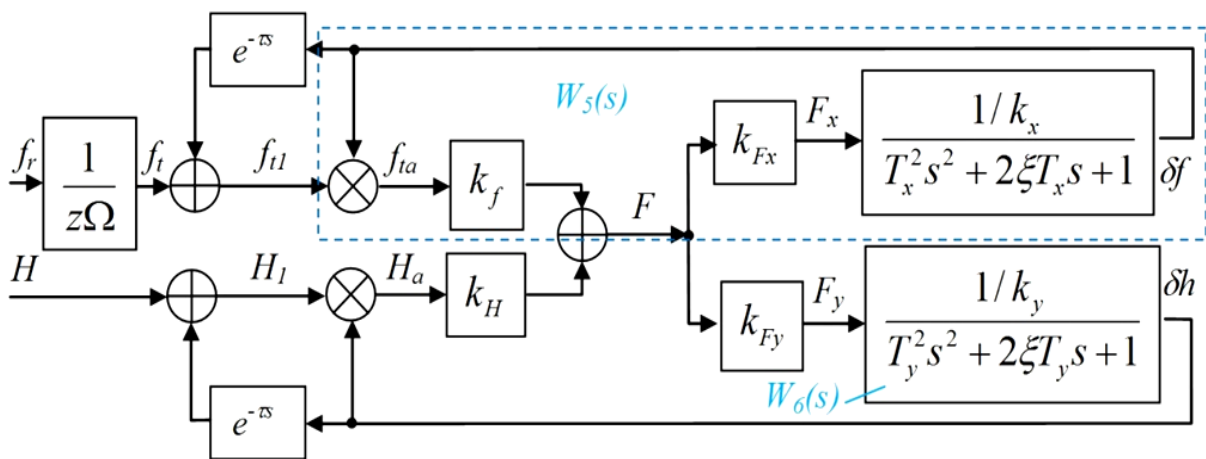


Fig. 2 – Block diagram

The transfer functions  $W_2(s)$  and  $W_4(s)$  have the greatest influence on the formation of the relief of the machined surface. The expression of such transfer functions can be obtained from the functional

diagram using the transformation rules. To obtain the transfer function  $W_4(s)$ , it is necessary to take  $f_r=0$ . Then the block diagram takes the form shown in Fig. 3.

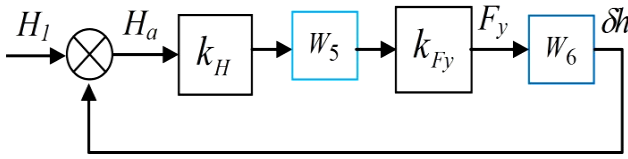


Fig. 3 – Transformed block diagram at  $f_r=0$

The contour constituting the blocks of the transfer function  $W_5(s)$  is closed (see Fig. 2), therefore, its transfer function, according to the rules for transforming block diagrams, has the form:

$$W_5(s) = \frac{1}{1 + \frac{k_{Fx}}{k_x(T_x^2 s^2 + 2\xi T_x s + 1)} k_f} \quad (15)$$

Then, the transfer function of the entire system on the input  $H$ :

$$W_H(s) = \frac{k_H W_5(s) k_{Fy} \frac{1}{k_y(T_y^2 s^2 + 2\xi T_y s + 1)}}{1 + k_H W_5(s) k_{Fy} \frac{1}{k_y(T_y^2 s^2 + 2\xi T_y s + 1)}} \quad (16)$$

Substituting into (16) the expression of the transfer function from (15) and performing simple transformations, these finally obtain:

$$W_H(s) = \frac{T_{02}^2 s^2 + T_{12} s + k_1}{T_{03}^4 s^4 + T_{13}^3 s^3 + T_{23}^2 s^2 + T_{33} s + 1} \quad (17)$$

where  $T_{02}^2 = T_x^2 k_x k_H k_{Fy} / k_2$ ,

$$T_{12} = 2\xi T_x k_x k_H k_{Fy} / k_2, \quad k_1 = k_x / k_2,$$

$$k_2 = k_y k_x + k_y k_{Fx} k_f + k_H k_{Fy} k_x, \quad T_{03}^4 = T_x^2 T_y^2 k_x k_y / k_2,$$

$$T_{13}^3 = k_x k_y 2\xi (T_x T_y^2 + T_y T_x^2) / k_2,$$

$$T_{23}^2 = (k_x k_y (T_x^2 + 4\xi^2 T_x T_y + T_y^2) + k_y k_{Fx} k_f T_y^2 + k_x k_{Fy} k_H T_x^2) / k_2,$$

$$T_{33} = (k_x k_y 2\xi (T_x + T_y) + k_y k_{Fx} k_f 2\xi T_y + k_x k_{Fy} k_H 2\xi T_x) / k_2.$$

The equation of motion of the system with concerning the input  $H$  can be represented in state variables in the form of a matrix, which is convenient for the numerical integration procedure:

$$\begin{cases} sU[1] = -A_1 U[1] + U[2] \\ sU[2] = -A_2 U[1] + A_5 H + U[3] \\ sU[3] = -A_3 U[1] + A_6 H + U[4] \\ sU[4] = -A_4 U[1] + A_7 H \end{cases} \quad (18)$$

where  $A_1 = T_{13}^3 / T_{03}^4$ ,  $A_2 = T_{23}^2 / T_{03}^4$ ,  $A_3 = T_{33} / T_{03}^4$ ,

$$A_4 = 1 / T_{03}^4, \quad A_5 = T_{02}^2 / T_{03}^4, \quad A_6 = T_{12} / T_{03}^4, \quad A_7 = k_1 / T_{03}^4.$$

Since the resulting model has a fourth order, the integration in the simulation program is performed by the fourth-order Runge-Kutta numerical method. The implementation of the lagging argument function is performed according to the recurrence relation:

$$H_j = H_0 + (\delta h)_{j-1}, \quad (19)$$

where  $(\delta h)_{j-1}$  – elastic displacement of the system in the direction of the cutting depth on the previous pass of the cutter edge.

Similarly, one can obtain the transfer function of the entire system from the input  $f_i$ :

$$W_f(s) = \frac{T_{04}^2 s^2 + T_{14} s + k_3}{T_{05}^4 s^4 + T_{15}^3 s^3 + T_{25}^2 s^2 + T_{35} s + 1} \quad (20)$$

where  $T_{04}^2 = T_y^2 k_y k_f k_{Fx} / k_4$ ,

$$T_{14} = 2\xi T_y k_y k_f k_{Fx} / k_4, \quad k_3 = k_y / k_4,$$

$$k_4 = k_y k_x + k_x k_{Fy} k_H + k_f k_{Fx} k_y, \quad T_{05}^4 = T_x^2 T_y^2 k_x k_y / k_4,$$

$$T_{15}^3 = k_x k_y 2\xi (T_x T_y^2 + T_y T_x^2) / k_4,$$

$$T_{25}^2 = (k_x k_y (T_x^2 + 4\xi^2 T_x T_y + T_y^2) + k_x k_{Fy} k_H T_x^2 + k_y k_{Fx} k_f T_y^2) / k_4,$$

$$T_{35} = (k_x k_y 2\xi (T_x + T_y) + k_x k_{Fy} k_H 2\xi T_x + k_y k_{Fx} k_f 2\xi T_y) / k_4.$$

### Simulation

An application program was created to simulate the 2.5D milling process to evaluate its dynamic quality. The application program allows you to simulate the behavior of the processing system in the form of displacements along the coordinate axes in time and frequency characteristics in the form of a Nyquist diagram. The simulation is performed by numerical methods using models (17) and (20) with a step of 0.000005 s, which makes it possible to observe the fast dynamic processes of a real system. The frequency characteristics of the system, taking into account the function of the delay argument, are also modeled by a numerical method in a given frequency range.

The initial data for modeling correspond to the real parameters of the 2.5D milling process: stiffness along the X axis 8000 H/mm, natural frequency 2400 Hz, stiffness along the Y axis 7000 H/mm, natural frequency 2100 Hz. The frequencies of natural oscillations and the damping coefficient of oscillations were determined from experimental data under the procedure presented in [13]. The tool chosen was a Ø20 mm end mill with 5 tooth.

The created application program allows executing virtual experiments to assess the stability limit of the milling process, which is usually represented as an SLD in the coordinates of the cutting speed – feed rate [3, 4]. The influence of the cutting mode on stability can be assessed both by transient processes in the form of elastic displacements  $\delta h$  (in the direction of the Y axis) and  $\delta f$  (in

the direction of the Y axis) in time and by frequency characteristics in the form of Nyquist diagrams on the complex plane. For example, from the oscillograms of the virtual oscilloscope built into the application program, one can see that the system at a cutting speed of 60 m/min and a feed of 5000 mm/min has a divergent transient, which indicates its instability (Fig. 4, a). Changing the cutting speed to 57 m/min leads the system to stable processes – the oscillograms of elastic displacements decay over time (Fig. 4, b).

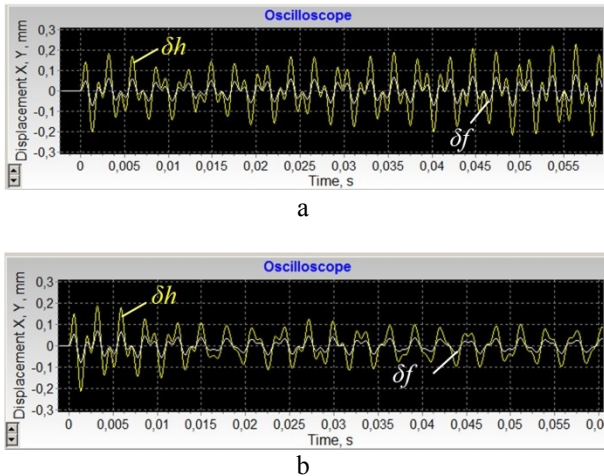


Fig. 4 – Transition process: a – cutting speed is 60m/min, feedrate is 5000 mm/min; b – cutting speed is 57 m/min, feedrate is 5000 mm/min

It is known that, according to the Nyquist stability criterion, the system is stable if the graph of its amplitude-frequency characteristic in the open state does not cover points with coordinates  $[-1,0]$  on the complex plane. Since in this case the delay link is connected with the output of a closed processing elastic system and creates a second feedback loop, the stability criterion changes somewhat. Comparing the graphs of transients and amplitude-frequency characteristics, it can be seen that when the graph covers a point with coordinates  $[-1,0]$ , the system has a stable process, and when it covers a point with coordinates  $[1,0]$ , it is unstable. This correspondence is not random but is repeated each time the simulation is performed for different cutting conditions.

When designing a control program for the end milling process on CNC machines, along with other technological tasks, it is important to assign a cutting mode that ensures chatter-free machining. Therefore, the prediction of this mode will allow you to choose the most productive machining without chatter. Usually, such a task is solved by the SLD representation.

Which are obtained based on algebraic transformations of the frequency response function (FRF) of the dynamic model in the form of a single-mass system with two degrees of freedom. Simulation modeling makes it possible to study the influence of the cutting mode on the stability of the cutting process in a more complex

system and obtain the boundary of the region of stable values of the cutting mode (Fig. 6).

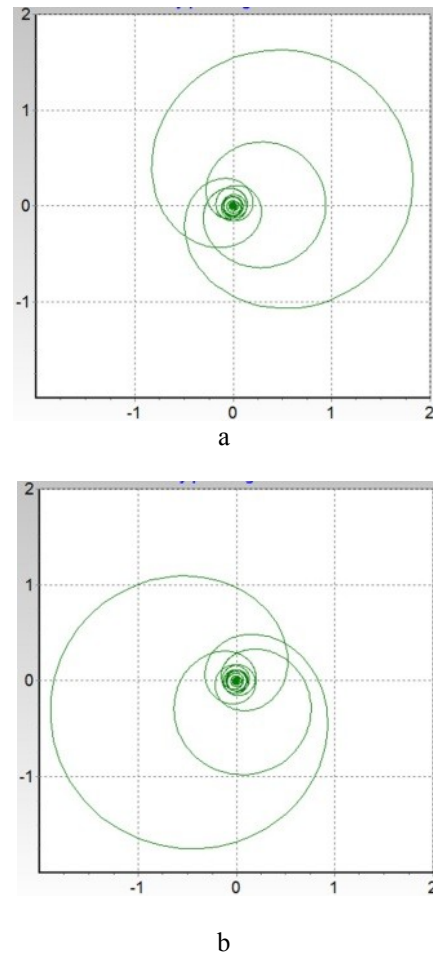


Fig. 5 – Nyquist diagrams: a – cutting speed is 60 m/min, feedrate is 5000 mm/min; b – cutting speed is 57 m/min, feedrate is 5000 mm/min

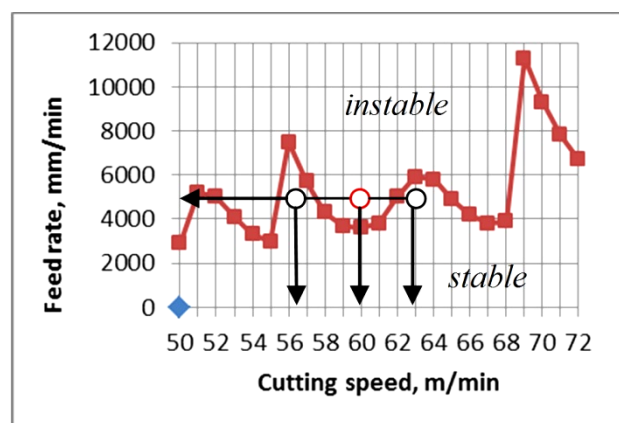


Fig. 6 – Stability diagram

Such virtual experiments can be used to select chatter-free cutting conditions. For example, it follows from the diagram that it is enough to change the cutting

speed from 60 m/min at a feed of 5000 mm/min to the larger (63 m/min) or smaller (57 m/min) side and the cutting process is performed without chatter.

### Discussion of 2.5D milling dynamic

A mathematical model of the 2.5D milling machining by end mills has been developed using a systematic approach, which makes it possible to represent the system in the form of separate blocks indicating the relationships between them (Fig. 2). The model represents the dynamics of the system as one-mass with two degrees of freedom, which implements the cross-links existing in the real system. The possibility of using a linear model of the dependence of the cutting force on the geometric engagement between the mill and the workpiece is shown.

The chosen representation form makes it possible to build a mathematical model using the concepts of transfer functions and the equation of motion in the form of variable states (18). This makes it possible to successfully use numerical methods to determine the behavior of the system in terms of elastic displacements in the direction of two axes at once.

The created application soft makes it possible to observe processes in an interactive mode in time, thanks to the built-in virtual oscilloscope. It provides the possibility of a simulation experiment to determine the influence of all the initial data of the system on the dynamics of its behavior. The results of the influence of the cutting mode for determining the stability limit in the coordinates of the cutting speed – feedrate are presented (Fig. 4).

The possibility of showing the dynamic characteristics of the system, with a time-frequency approach is presented. On the soft interface a graph of the amplitude-frequency characteristic to assess the stability of the system using the Nyquist stability criterion. Comparing the results of the process in time with the frequency response function leads to the modifications of this criterion (Fig. 5). Such features can be associated with taking into account in the model a closed-loop structure with feedback and a function of a delay argument that determines machining along the trail.

The adequacy of all new results obtained will be significantly improved by confirmation by numerous experiments. The created program with the inclusion of such experimental results can serve as a decision-making tool when assigning a cutting mode to 2.5D end milling on CNC machine.

### Conclusions

The developed mathematical model takes into account the loop closed of the cutting process in the representation of a single-mass structure with feedback on elastic displacements and two degrees of freedom in the direction of the coordinate axes.

The main reason for the occurrence of regenerative vibrations should be considered processing along the trace in combination with cross kinematic links, which are

closed through the cutting process. Such a structure is taken into account in the mathematical model by two links with a delay argument.

The created application simulation program allows building an area of stable solutions in the "cutting speed – feed rate" diagram, which can serve as a decision-making tool for the technologist-programmer when assigning a cutting mode to the CNC machine.

The possibility of assessing the stability of the machining system simultaneously by the transient and frequency response leads to the need to formulate a modified criterion for the stability of closed systems with a second loop through a link with a delay argument.

### Список літератури

1. Altintas Y. *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. Cambridge University Press, New York, NY 10013-2473. USA 2012. 366 p. doi:10.1115/1.1399383.
2. Soori M., Arezoo B. Virtual machining system for CNC milling and turning machine tools: A Review. *International Journal of Engineering and Future Technology*, 2021. Vol. 18. Iss. 1. P. 56–104.
3. Budak E., Altintas Y. *Analytical Prediction of Chatter Stability in Milling—Part II: Application of the General*. doi: 10.1115/1.2801318.
4. Caixu YUE, Haining GAO, Xianli LIU, et al. A review of chatter vibration research in milling. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019. 32(2). P. 215–242. doi: 10.1016/j.cja.2018.11.007.
5. Petrakov Y. V. Chatter suppression technologies for metal cutting. *Mechanics and Advanced Technologies*. № 2 (86). 2019. P. 51-60. doi: 10.20535/2521-1943.2019.86.185849.
6. Zhao M.X., Balachandran B. Dynamics and stability of milling process. *International Journal of Solids and Structures*. 2001. Vol. 38. Iss. 10–13. P. 2233–2248 doi: 10.1016/S0020-7683(00)00164-5.
7. Xinhua Long, Song Ren, Pingxu Zheng Delayed State Feedback Control for Milling Process. *Procedia IUTAM* 22. 2017. P. 115–122. doi: 10.1016/j.piutam.2017.08.015.
8. Altintas Y., Shamoto E., Lee P., Budak E. Analytical Prediction of Stability Lobes in Ball End Milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1999. Vol. 121. P. 586–592. doi: 10.1115/1.2833064.
9. Xiao Zhang, Cai Xiong, Ye Ding et al. Milling stability analysis with simultaneously considering the structural mode coupling effect and regenerative effect. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2012. № 53. P. 127–140. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2011.10.004.
10. Sims N. D., Manson G., Mann B. P. Fuzzy stability analysis of regenerative chatter in milling. *Journal of Sound and Vibration*, 2009. 329 (8). P. 1025–1041. doi: 10.1016/j.jsv.2009.10.024.
11. Tlustý J. *Manufacturing Processes and Equipment*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 1st edition. 2000. 928 p. doi: 10.1080/10940340008945713.
12. Duncan G. S. Milling Dynamics Prediction and Uncertainty Analysis Using Receptance Coupling Substructure Analysis. *Ph.D. Dissertation, University of Florida, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Gainesville, FL, USA*. 2006. 129 p.
13. Petrakov Y., Danylchenko M., Petryshyn A. Prediction of chatter stability in turning. Eastern-European. *Journal of*

*Enterprise Technologies*. 2019. № 5/1 (101). P. 58–64. doi: 10.15587/1729-4061.2019.

#### References:

- Altintas Y. *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. Cambridge University Press, New York, NY 10013-2473. USA 2012. 366 p. doi:10.1115/1.1399383.
- Soori M., Arezoo B. Virtual machining system for CNC milling and turning machine tools: A Review. *International Journal of Engineering and Future Technology*, 2021, Vol. 18, Iss. 1, pp. 56–104.
- Budak E., Altintas Y. *Analytical Prediction of Chatter Stability in Milling—Part II: Application of the General*, doi: 10.1115/1.2801318.
- Caixu YUE, Haining GAO, Xianli LIU, et al. A review of chatter vibration research in milling. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(2), pp. 215–242, doi: 10.1016/j.cja.2018.11.007.
- Petrakov Y. V. Chatter suppression technologies for metal cutting. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2 (86), 2019, pp. 51-60, doi: 10.20535/2521-1943.2019.86.185849.
- Zhao M.X., Balachandran B. Dynamics and stability of milling process. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, Vol. 38, Iss. 10–13, pp. 2233–2248, doi: 10.1016/S0020-7683(00)00164-5.
- Xinhua Long, Song Ren, Pingxu Zheng Delayed State Feedback Control for Milling Process. *Procedia IUTAM* 22, 2017, pp. 115–122, doi: 10.1016/j.piutam.2017.08.015.
- Altintas Y., Shamoto E., Lee P., Budak E. Analytical Prediction of Stability Lobes in Ball End Milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1999, Vol. 121, pp. 586–592, doi: 10.1115/1.2833064.
- Xiao Zhang, Cai Xiong, Ye Ding et al. Milling stability analysis with simultaneously considering the structural mode coupling effect and regenerative effect. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, 53, pp. 127–140, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2011.10.004.
- Sims N. D., Manson G., Mann B. P. Fuzzy stability analysis of regenerative chatter in milling. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 329 (8), pp. 1025–1041, doi: 10.1016/j.jsv.2009.10.024.
- Thusty J. *Manufacturing Processes and Equipment*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 1st edition. 2000, 928 p. doi: 10.1080/10940340008945713.
- Duncan G. S. Milling Dynamics Prediction and Uncertainty Analysis Using Receptance Coupling Substructure Analysis. *Ph.D. Dissertation, University of Florida, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Gainesville, FL, USA*. 2006. 129 p.
- Petrakov Y., Danylchenko M., Petryshyn A. Prediction of chatter stability in turning. Eastern-European. *Journal of Enterprise Technologies*, 2019, 5/1 (101), pp. 58–64, doi: 10.15587/1729-4061.2019.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Yuriy Petrakov** – doctor of science, professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine, professor of Department of Machine Building Technology; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0525-4769>; e-mail: [ypetrakov.86@gmail.com](mailto:ypetrakov.86@gmail.com)

**Петраков Юрій Володимирович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри технології машинобудування; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0525-4769>; e-mail: [ypetrakov.86@gmail.com](mailto:ypetrakov.86@gmail.com)

**Maxim Sikailo** – postgraduate student National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine, postgraduate student of department technology manufacturing; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3819-5926>; e-mail: [zzshaiya@gmail.com](mailto:zzshaiya@gmail.com)

**Сікайло Максим Олександрович** – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», аспірант кафедри технології машинобудування; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3819-5926>; e-mail: [zzshaiya@gmail.com](mailto:zzshaiya@gmail.com)

Please cite this article as:

Petrakov Y., Sikailo M. Simulation modeling of 2.5D milling dynamic by end mills. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2(12), pp. 17-24, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.03.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Петраков Ю. В., Сікайло М. О. Імітаційне моделювання динаміки 2.5D фрезерування кінцевими фрезами. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 17-24. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.03.

Received 06.05.2022



УДК 621.923

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.04

## ВИБІР РЕЖИМІВ ЕФЕКТИВНОГО ШЛІФУВАННЯ ВАЛІВ ПРИ КЕРУВАННІ МІЖОСЬОВОЮ ВІДСТАННЮ ВЕРСТАТА

А. В. РУДИК<sup>1</sup>, В. А. РУДИК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації ОВТ, Чернігів, УКРАЇНА

<sup>2</sup> фірма ТАН, Чернігів, УКРАЇНА

\* e-mail: andrei.rudik@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Вали та інші відповідальні деталі сучасних автомобілів обмежені поверхнями обертання. Такі деталі звичайно мають ступінчасту форму. Кінцевою обробкою поверхонь валів є шліфування через жорсткі вимоги щодо якості та високу твердість. Процес потребує значних енергетичних витрат, які супроводжуються тепловими виділеннями. Використані переваги нових способів шліфування. Ефективне шліфування поверхонь обертання торцем абразивного інструмента конічної форми шляхом раціонального вибору режимних параметрів при керуванні міжосьовою відстанню верстата є кінцевою метою. Для досягнення мети визначена форма абразивного інструмента та обмеження режимів шліфування за рахунок кінематичних факторів; знайдені розміри налашки верстату та залежності кутів орієнтації верстатних ланок на підведення припуску при глибокому шліфуванні; проведений аналіз впливу відносного положення та розмірів області контакту між інструментом та деталлю. Матеріали теоретичних досліджень доводять можливість раціонального вибору режимів ефективного шліфування поверхонь обертання торцем круга конічної форми шляхом керування міжосьовою відстанню. Покращення якості обумовлене багатопрохідною обробкою зі слідами шорсткості у вигляді сітки; меншим впливом коливань та теплової напруженості. Глибине шліфування вирівнює навантаження вздовж профілю, ділянки якого працюють в майже однакових умовах. Продуктивність шліфування обумовлена раціональним вибором кінематики, збільшенням розмірів контакту та підведенням припуску. Система нерівностей дозволяє визначити технологічні режимні параметри при доведенні локального навантаження інструмента до рівня різальної здатності вздовж профілю. Знайдені залежності по керуванню кутом конусу деталі, зв'язують ширину та довжину області контакту. Зменшення кута конусу дозволяє визначити подачу на оберт, покращити якість та шорсткість, що викликана більшою кількістю проходів. Раціональні розміри області контакту дозволяють зменшити теплові навантаження та покращити умови охолодження деталі, працювати із меншою глибиною різання на прохід. Це призводить до малих витрат абразивного матеріалу.

**Ключові слова:** шліфування; ефективність; міжосьова відстань; керування; конус; режим; кут

## THE REGIME CHOICE WITH EFFECTIVE GRINDING BY THE WAY CONTROL INTER-AXIS DISTANCE MACHINE TOOLS

A. RUDYK<sup>1\*</sup>, V. RUDYK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment, Chernihiv, UKRAINE

<sup>2</sup> TAN company, Chernihiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The problem of effective grinding of rotating surfaces is to improve the quality and increase productivity, while reducing costs. The problem can be solved by controlling the distance  $H$  between of the rotation tool axes with the part on CNC machines and rational choosing of a shape tool. The purpose of the article is to increase the grinding efficiency of the rotation surfaces with the end face of the conical abrasive tool by rational choice of mode parameters when controlling the inter-axis distance machine tools. To achieve this goal, the following research objectives should be solved. Determine the modes of grinding by limiting the kinematic factors. To find the influence of the dependence of the angular spatial orientation of the contact line of the tool and the part on the angle of small taper of its formed fragment by choosing the dimensions of the machine adjustment. To analyze the influence of the relative position and size of the contact area depending on the kinematics and technical requirements for processing. For the first time, the kinematic constraints of the limit value of the projection of the speed of relative motion in the normal direction, which is used as the grinding intensity, taking into account the rotational and translational motions of the feed. The spatial angular position of the contact line of the tool with the part is determined taking into account the dimensions of the machine adjustment, namely, the wheelbase and the angle of the circle profile. The algorithm of definition of modes of deep grinding is established. The graphical dependences of the angles of orientation of the contact line on the angle of editing of the circle and the wheelbase of the machine are obtained. The dependences of the reduction of the radial dimensions of the conical surface of the part during grinding in the direction opposite to the axial feed of the wheel are described. The dimensions of the contact area determine the quality: the length along the axis of the part, the number of passes, and the width - the conditions of heat release and cooling.

**Keywords:** grinding; efficiency; inter-axis distance; control; taper; mode; angle

### Вступ

Проблемою ефективного шліфування поверхонь обертання – є покращення якості та підвищення продуктивності обробки, при

одночасному зниженні витрат [1,2]. Проблема може бути вирішеною за рахунок керування відстанню  $H$  між осями обертання інструмента з деталлю на верстатах з ЧПК та вибором інструмента раціональної форми.

Вали та інші відповідальні деталі сучасних автомобілів, у тому числі подвійного використання, обмежені поверхнями обертання та зазвичай мають ступінчасту форму. Вони можуть бути встановленими у робочому просторі більшості верстатів. До поверхонь валів надають жорсткі вимоги щодо точності та якості. Через високу твердість ці деталі погано піддаються обробці лезвийним інструментом. Тому, кінцевою обробкою, звичайно, є шліфування, яке потребує значно більших енергетичних витрат, які супроводжуються тепловими виділеннями.

Доведено [1,2], що енергетичні витрати процесу шліфування зростають при збільшенні діаметральних розмірів круга, вимог до точності та шорсткості обробки. При використанні шліфування інструментом з робочою поверхнею конічної форми виникає можливість керувати положенням лінії контакту (ЛК) при перерозподілі навантажень на ділянку профілю інструменту. Круг працює у режимі глибинного багатого прохідного шліфування, яке забезпечує значні розміри контакту та більше завантаження профілю. Обробку проводять за один робочий хід.

У роботі [3] доведено, що кутова орієнтація інструмента здатна підвищити продуктивність та якість обробки. За рахунок відносного положення можна обробляти різноманітні форми поверхні при простих відносних рухах.

У дослідженні [4] було запропоновано використовувати відносну кутову орієнтацію за рахунок зміни кута перехрещення. Наладка є складною, та потребує значних конструктивних змін. Дану задачу запропоновано вирішати для шліфування крупно габаритних валків з монотонною зміною геометрії. Кінцеві залежності для наладки верстату не отримані.

В роботі [5] для інтенсифікації режимів знаходження оптимальної кутової орієнтації запропоновано використовувати індикатриси інструменту та деталі. Ці характеристики не знайшли широкого використання.

Роботи [6,7] присвячені питанням моделювання процесів обробки, включаючи шліфування. Абразивний інструмент під час обробки втрачає правильну геометричну форму та розміри. Він потребує додаткової корекції відносного положення та виправлення форми.

Спеціалістами фірми Юнкер [8] створено оригінальне обладнання, інструмент та спосіб «Quickpoint» для шліфування валів периферією та торцем круга. Форму отримують захищеною точкою периферії інструмента з кутовою орієнтацією. Практикою доведено підвищення коефіцієнта шліфування, коли одиниця об'єму абразиву зрізує значний об'єм металу.

Використання способу потребує спеціального збалансованого інструмента значних діаметральних розмірів. Такий інструмент призводить до збільшення витрат електричної енергії. Значні

розміри контакту обмежені вздовж осі деталі. Це викликає інтенсивні теплові виділення та потребує значних витрат охолоджувальної рідини (можуть досягати до 200 л/хвилину).

Розроблені нові захищені патентами України способи шліфування за рахунок керування міжосьовою відстанню, яка призводить до зміни кута перехрещення [9]. Такі способи можуть бути використаними для обробки ступінчастих поверхонь обертання. Спосіб шліфування може бути реалізований на існуючому обладнанні при проведенні незначної модернізації.

Складена схема шліфування заправленим конічним торцем на верстаті з ЧПК мод.В3208Ф3 (рис. 1). Схема шліфування потребує забезпечення наступних відносних рухів: обертання інструмента  $\omega$  та деталі  $\omega_d$ , відносних поздовжньої  $S_0$ , поперечної  $S_R$  та вертикальної  $S_Y$  подач.

Кут профілю круга  $\alpha$  вимірюють між площиною обертання та дотичною. Таким чином, під час наладки верстату кут між осями обертання деталі та інструмент та встановлюють рівним  $\pi/2 - \alpha$ .

Вертикальна подача  $S_Y$  визначає зміну локальної ейлерової кривизни контакту. Нею можна керувати за рахунок відстані  $H$  між осями обертання.

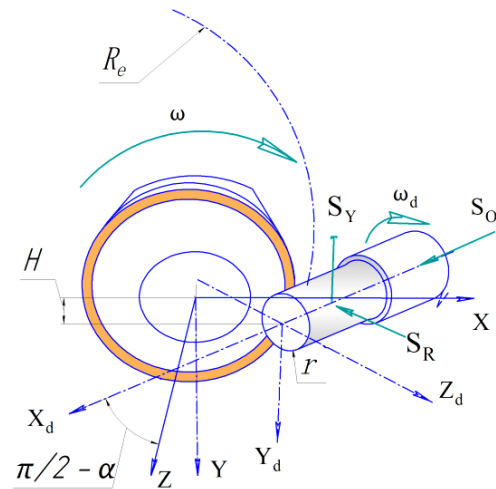


Рис. 1 – Схема шліфування торцем конічної форми при керуванні відстанню  $H$  між осями

Переваги нових способів порівняно до традиційних наведені на рис. 2.

Покращення якості (блок 1, рис. 2) забезпечується напрямком слідів шорсткості, збільшенням кількості проходів, отримання кінцевої якості лише однією захищеною ділянкою у околі базової точки в межах подачі на рядок. Під базовою точкою розуміють місце контакту номінальних поверхонь деталі та інструмента. За рахунок наближення радіусів кривизни у напрямку осьової подачі деталі можливо збільшити довжину контакту, а звідси кількість проходів.



Рис. 2 – Переваги нових способів

Шорсткість обробленої поверхні отримують зі слідами мікро-нерівностей у вигляді сітки (п. 1.2, рис. 2). Це пояснюється зміною напрямку швидкості різання по відношенню до осі деталі за часом проходження області контакту.

Динаміка процесу покращується (п. 1.3, рис. 2) за рахунок зменшення ваги круга через менші діаметральні розміри. Інструмент з робочим профілем конічної форми, кутовим розміром  $\alpha$  від площини обертання, має великі значення ейлеревих радіусів кривизни  $R_e$  для локального місця контакту. Робоча конічна поверхня торця чашкового круга на рис. 1 виділена заливкою.

Використання абразивного інструменту невеликого діаметру призводить до зменшення маси, збільшення частоти власних коливань. Зростання розмірів контакту при тих самих умовах викликає підвищення коефіцієнту демпфування, що сприяє зменшенню коливань. Самі коливання спрямовані під кутом до оброблюваної поверхні, це знижує їх вплив.

На відміну від обробки по методу Юнкер [5], для нового способу розміри області контакту мають значну протяжність вздовж осі деталі. Ширина контакту у площині обертання деталі незначна, що сприяє кращому охолодженню та знижує теплову напруженість.

Однак, вибір режимів обробки та залежності розмірів контакту, а саме ширини та довжини, у функції від розмірів наладки верстату не були раніше розглянутими в науковій літературі.

Для нових способів доведено [9], що розміри контакту в напрямках як обертання деталі, так і осьової подачі (Ейлереві перерізи) є значно більшими, а закон підведення припуску є більш раціональним.

Порівняємо локальні робочі навантаження для різних методів обробки.

Раціональне навантаження робочої поверхні інструмента [9] до рівня різальної здатності  $V_{n,max}$  (п. 2.2, рис. 1) викликане зміною характеру залежності проекції швидкості відносного руху на напрям нормалі.

Для поздовжнього шліфування (лінія 1 на рис. 3) показано стрімке зростання нормальної швидкості при збільшенні розмірів контакту. Це обумовлює підвищене зношення інструменту для чорнових режимів. В області контакту з'являється лише крайня найбільш навантажена вузька смужка (при  $V_n < V_{n,max}^0 \approx 10$  мм/с). Граничне значення проекції швидкості відносної подачі на напрям нормалі [10].

Для способу «Quickpoint» навантаження лишаються практично не змінними (лінія 2).

Нові способи (лінія 3 на рис. 3) забезпечують високе значення коефіцієнта шліфування [9]. При наближенні до границі контакту відбувається зменшення навантаження для раціонального значення добутку нормальної швидкості.

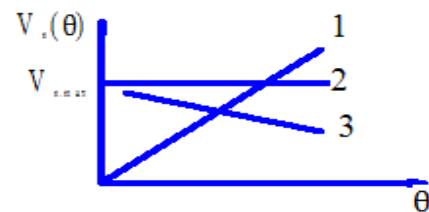


Рис. 3 – Інтенсивність підведення припуску  $V_n$ :  
1 – поздовжнє шліфування, 2 – метод «Quick point»,  
3 – торцем конічного круга

Кут  $\theta$  вимірюють в площині обертання круга між дотичною до лінії контакту та радіальним напрямком. Вибір параметрів наладки верстату є багатоваріантною поки не вирішеною задачею. Точність отримання діаметральних розмірів забезпечують як вибором верстату, так і інструменту.

Рівняння для нормальної відносної швидкості  $V_n$  було отримано у явному функціональному вигляді при врахуванні зміни відстані між осями. Проведений аналіз навантажень вздовж профілю інструмента доводить раціональний характер зміни  $V_n$ .

У роботі [10] був запропонований локальний показник інтенсивності шліфування проекція швидкості  $V_n$  відносного руху подачі на нормаль замість інтегрального показника питомої продуктивності. Доведено, що локальний показник нормальної відносної швидкості  $V_n$  можна вважати більш зручним для оцінки інтенсивності процесу шліфування. Він має чіткий змістовний сенс, пов'язаний з товщиною зрізу. Цей показник враховує усі кінематичні складові. Використання швидкості подачі відносного руху у якості показника інтенсивності дозволяє розрізнити попутну від зустрічної обробки та враховувати вплив осьової подачі, чим звичайно нехтують.

Як відомо [10], підвищення продуктивності (блок 2 на рис. 2) чорнового шліфування визначають об'ємом  $Q$  знятого матеріалу, тобто збільшенням розмірів площі контакту  $F$  та швидкістю  $V_n$

відносного руху у напрямку нормалі  $\mathbf{n}$  на кожній локальній ділянці  $dF$ :  $Q = \iint_F V_n \cdot dF$ .

Для чистового багато-прохідного шліфування кут між круговою  $S_w = \omega_d \cdot r$  та поздовжньою  $S_0 = \omega_d \cdot p$  подачами близький до прямого, де  $\omega_d$  – кутова швидкість обертання деталі;  $p$  – параметр гвинтового руху поздовжньої подачі.

Довжина ЛК є значно більшою від подачі на оберт,  $S_0 = 2\pi \cdot p$ .

Продуктивність чистового шліфування  $Q_f$  визначають обробленою площею за одиницю часу, або добутком подач:

$$Q_f = S_0 \cdot S_w = \omega_d^2 \cdot p \cdot r. \quad (1)$$

Тобто продуктивність чистового шліфування пропорційна квадрату кутової швидкості обертання заготовки та гвинтового параметру поздовжнього руху.

Доведено [8,10], що подібну залежність має стійкість абразивного інструмента.

Зниження витрат (блок 3 на рис. 2) на електричну енергію та інструмент пояснюється зменшенням діаметральних розмірів та часу обробки. Підвищення коефіцієнта шліфування [8], яке на думку авторів, викликане зменшенням показника  $V_n < V_{n,max}$ , призводить до зниження витрат абразивного матеріалу. Зменшення машинного часу викликане збільшенням осьової хвилинної подачі та зниженням кількості потрібних проходів до одного при скороченні довжини холостого ходу. Знижуються накладні витрати при зменшенні розмірів верстату.

Задача вибору розмірів наладки, згідно літературних джерел, поки є багатоваріантною остаточно невизначеною, без єдиного алгоритму знаходження режимних параметрів. Огляд публікацій не дозволяє здійснити наладку верстатів, використовуючи переваги нових способів шліфування.

Основними питаннями є обґрунтування:

1) на які технологічні показники ефективності обробки впливають форма, ширина та довжина області контакту, кут профілю конічної робочої поверхні інструмента; 2) як впливають відстань між осями обертання інструмента та деталі шліфувального верстата та співвідношення між швидкостями рухів подач на вибір режимних параметрів.

### Мета роботи

Мета дослідження полягає у підвищенні ефективності шліфування поверхонь обертання торцем абразивного інструмента конічної форми шляхом раціонального вибору режимних параметрів при керуванні міжосьовою відстанню верстата.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі.

Задача 1. Визначити обмеження режимів шліфування за рахунок кінематичних факторів,

Задача 2. Вибором розмірів наладки слід знайти залежності кутів орієнтації ЛК  $\theta(\alpha, H)$ ;  $\chi(\alpha, H)$  на кут конусу, що відповідає за підведення припуску при глибинному шліфуванні для утвореного фрагменту деталі  $\varphi(\alpha, H)$ .

Задача 3. Провести аналіз впливу відносного положення та розмірів області контакту на показники ефективності шліфування.

### Виклад основного матеріалу

1. Покажемо взаємний зв'язок між подачею на оберт та глибиною різання для кута  $\varphi$ , який характеризує конус для рівномірного підведення припуску на поверхні деталі.

Інтенсивність підведення припуску  $V_n$  для глибинного шліфування, в тому числі для нового способу, визначають проекцією швидкості відносного руху подачі на напрям нормалі до поверхні деталі.

Із урахуванням кругової та поздовжньої подач [10], як складових рухів:

$$V_{n,max} = n_d \cdot \left[ 2\pi \sqrt{2r \cdot (t_0 + p \cdot \varphi) \cdot \left(1 + \frac{r}{R_e}\right)} + (t_0 + p \cdot \varphi) \right]$$

Враховуючи співвідношення між діаметрами деталі та ейлеревим робочої конічної поверхні круга  $d \ll De$  (рис.1), вираз (2) можна спростити. Нехтуючи малим впливом на проекцію  $V_n$ , отримують:

$$V_{n,max} \approx n_d \cdot \left[ 2\pi \sqrt{r \cdot (t_0 + p \cdot \varphi)} + (t_0 + p \cdot \varphi) \right] \leq V_{n,max}^0 \quad (2)$$

де  $t_0$  – глибина різання на оберт (прохід), враховує підведення припуску у площині обертання деталі за час оберту за рахунок кругової та поздовжньої подач. Доданок  $r\varphi$  враховує додаткову глибину поступального гвинтового руху.

Кут  $\varphi$  забезпечує рівномірне підведення припуску до ділянок профілю інструмента. Цей конус здійснює перерозподіл теплових та силових навантажень [9]. Його знаходження показано нижче.

Кінематичну умову (2) слід розглядати сумісно з рівнянням (1) досягнення максимуму продуктивності чистового шліфування. Умова максимуму кутової швидкості  $\omega_d \rightarrow \max$  є раціональною: вона визначає продуктивність (1) та стійкість інструмента, як було доведено [8,10].

Кут  $\varphi$  нахилу ділянки профілю деталі (рис.4) до осі обертання знаходять, використовуючи вектор  $\vec{r}_{oi}$ .

Функція формоутворення [9] визначає форму, положення та радіальні розміри ЛК для фрагмента в

СК деталі. Рівняння ЛК зв'язує між собою параметри конічної поверхні інструмента  $\theta(\rho)$ . Дане рівняння може бути представленим у вигляді залежності  $\theta(H, \alpha, \rho, z)$

$$r_{di}(\rho, \theta(\rho)) = \begin{bmatrix} X_{di} \\ Y_{di} \\ Z_{di} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 - \rho \cdot \sin^2 \alpha + R(\rho) \cdot \cos \theta(\rho) \cdot \cos \alpha \\ R(\rho) \cdot \sin \theta(\rho) + H \\ Z + R(\rho) \cdot \cos \theta(\rho) \cdot \sin \alpha + \rho \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де  $\theta(\rho)$  – значення кутового параметра точки ЛК робочої поверхні круга конічної форми, що відповідає заданому радіальному параметру  $\rho$ ; кутовий параметр  $\theta$  вимірюють в межах ширини контакту в площині обертання круга від положення осі X:

$$\frac{r}{R_e} \cdot \varphi; \quad (4)$$

де  $\rho$  – лінійний параметр, спрямований вздовж твірної конічної поверхні заправленого круга, в напрямку від найбільшого радіуса периферії  $R_{max}$ ;  $2\pi\rho$  – крок гвинтового руху поздовжньої подачі;  $H$  – відстань між осями обертання,  $\alpha$  – кутова орієнтація інструмента, встановленого на верстаті, який в такому положенні, проходить правку (рис. 1);  $R_{max}$  – максимальний радіальний розмір круга;  $z$  – відстань від базової точки ЛК до осі деталі, характеризує діаметральний розмір (рис. 1 та рис. 4).

Вектор  $D_E(\rho)$ , дотичний до характеристики E у деякій (базовій) точці, знаходять диференціюванням ФФ за радіальним параметром  $\rho$ :

$$D_E(\rho) = \frac{\partial r_{di}(\rho, \theta(\rho))}{\partial \rho} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot \cos \alpha - tg \chi \cdot \sin \theta \\ tg \chi \cdot \cos \theta + \sin \theta \cdot \cos \alpha \\ -\sin \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

де  $tg \chi = \theta' \cdot R$  - тангенс кута повороту ЛК при зміні відстані  $H$  між осями обертання. Кут  $\chi$  вимірюють на конічній поверхні круга між радіальним напрямком та дотичною до ЛК.

Саме керування міжосьовою відстанню  $H$  призводить до повороту ЛК (змінює кут  $\chi$ ), а тому й радіус кривизни інструмента.

Довжину вектора  $D_E(\rho)$  дотичної знаходять:

$$|D_E(\rho)| = \sqrt{1 + (\theta' \cdot R)^2} = \sqrt{1 + tg^2 \chi} = \frac{1}{\cos \chi} \quad (6)$$

Отже, сумісно вирішуючи рівняння (4-6), отримують кут конусу ділянки профілю, який залежить від розмірів наладки верстату

$$\cos \varphi(H, \alpha) = \cos \alpha \cdot \cos \theta(H, \alpha) \cdot \cos \chi(H, \alpha) - \sin \theta(H, \alpha) \sin \chi(H, \alpha) \quad (7)$$

$$\text{де } \cos \chi = \frac{1}{\sqrt{(\theta' \cdot R)^2 + 1}}, \quad \sin \chi = \frac{\theta' \cdot R}{\sqrt{(\theta' \cdot R)^2 + 1}}, \quad \theta'_{\rho} =$$

$d\theta/d\rho$  - відношення приросту кута  $d\theta$  до малої зміни радіального положення  $d\rho$  для точок ЛК.

Косинус кута  $\varphi$  визначають через скалярний добуток ортів дотичної до характеристики  $D_E$  та спрямованого вздовж осі деталі  $i$  (рис. 4):

$$\cos \varphi(H) = \frac{\overline{D_E \cdot i}}{|D_E|}. \quad (8)$$

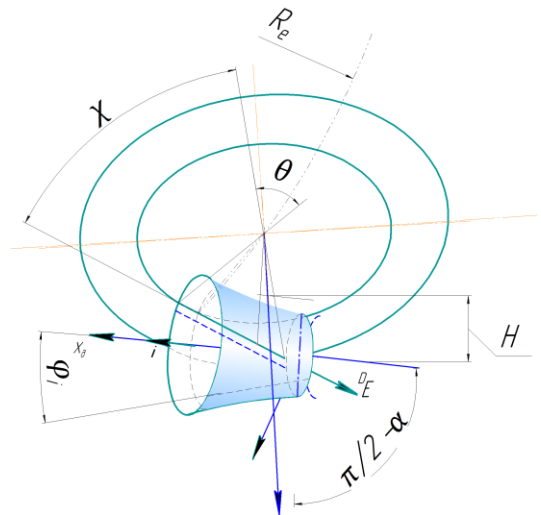


Рис. 4 – Визначення утвореного конусу  $\varphi$  фрагменту профілю деталі

## 2. Керування кутом забірного конусу $\varphi$ .

Розрахунки ЛК довели, що кут  $\varphi$  визначають через загальний припуск  $t_{\Sigma}$  та проекцію довжини області контакту на ось деталі  $L_K$ :

$$\varphi = \frac{t_{\Sigma}}{L_K} \quad (9)$$

Кут  $\varphi$  конусу фрагмента деталі знаходять через відношення за час одного оберту глибини  $t_0$  (рис.6) та подачі  $S_0$  [11]:

$$\varphi \approx tg \varphi = \frac{t_0}{0} = \frac{t_0}{2\pi \cdot p} \quad (10)$$

Кути  $\theta(\alpha, H)$ ,  $\chi(H, \alpha) = arctg(\theta' \cdot R)$  та  $\varphi(\alpha, H)$  (рис.4) залежать від однієї функції  $C(\alpha, H)$  та можуть бути через ті ж самі коефіцієнти регресії вираженими спрощеними залежностями [9].

**Обговорення результатів**

Отримані графічні залежності орієнтації лінії контакту (рис. 5) залежно від кута правки та міжосьової відстані: для площини обертання  $\theta(\alpha, H)$ , між лінією контакту та радіальним напрямком  $\chi(\alpha, H)$ , відносно осі обертання деталі  $\varphi(\alpha, H)$ . Графіки  $\theta(\alpha, H)$ ;  $\chi(\alpha, H)$ ;  $\varphi(\alpha, H)$  доводять, що данні розміри впливають немонотонно. Тому доцільно, з точки зору аналізу, умовно поділити область визначення на чотири частини.

При зростанні залежності  $\theta(\alpha, H)$ ;  $\chi(\alpha, H)$  зменшуються, а  $\varphi(\alpha, H)$  – зростає. Кут  $\alpha$  впливає неоднозначно.

Згідно із графіком (рис.5,в) кут  $\varphi$  зростає зі збільшенням значення міжосьової відстані  $H$  та кута  $\alpha$  профілю інструмента. Це призведе до укорочення довжини контакту, локалізації навантажень та підвищення температури, в тому числі через умови охолодження деталі.

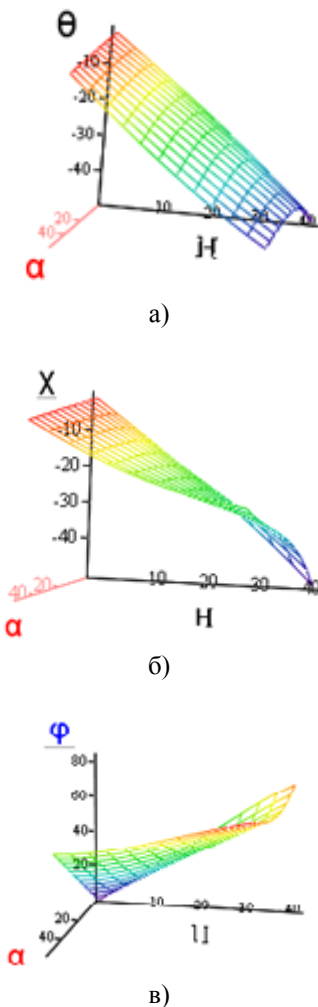


Рис. 5 – Графічні залежності зміни кутів у функції від розмірів наладки а)  $\theta(\alpha, H)$ ; б)  $\chi(\alpha, H)$ ; в)  $\varphi(\alpha, H)$

Графіки можуть бути лише частково реалізованими через зв'язок між обертанням деталі та осьовою подачею, реальним значенням кута профілю круга, шириною конічного пояса інструмента.

3. Проведемо аналіз впливу відносного положення та розмірів області контакту.

Радіальні розміри деталі у деякій точці ЛК визначають, враховуючи відстань між осями  $H$  та від базової точки до положення осі деталі:

$$R_d(H, z) = \sqrt{Y_{di}^2 + Z_{di}^2}. \quad (11)$$

Профіль ділянки згідно (7) визначають за радіальними  $R_d$  та осьовими  $X_d$  координатами. Зміщуючи на відстань осьового кроку отриманий профіль у напрямку подачі, знаходять припуск (рис. 6). Радіальним розміром деталі при обробці можна керувати (7) відстанню  $z$  до її осі від поверхні круга, або між осями  $H$ .

Довжина області контакту повинна знаходитись в межах ширини конічного пояса інструмента  $L_k < B / \cos \chi$ . На рис.1 (конічний поясок виділений заливкою).

При ширині робочої поверхні торця круга 5 мм та деякій відстані  $H$  між осями, довжина ЛК може значно перебільшувати цей розмір.

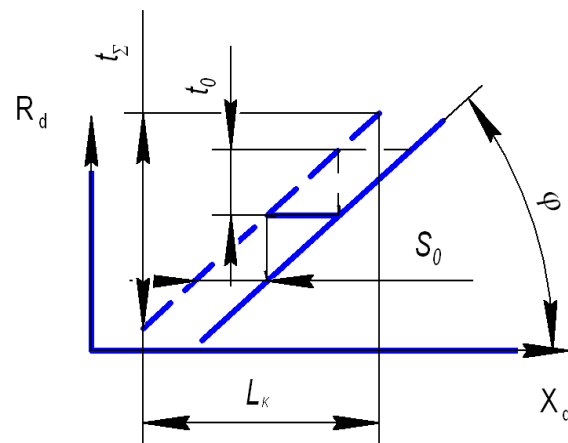


Рис. 6 – Зміна послідовних положень лінії контакту відносно перерізу деталі (а) та динаміка по проходах (обертах)

Кількість обертів (проходів) інструмента над деякою точкою деталі, визначає шорсткість обробленої поверхні. Враховуючи співвідношення між довжиною ЛК та подачею на оберт отримують:

$$K = n_d \cdot \tau \approx n \cdot \frac{L_k}{S_0}, \quad (12)$$

де  $\tau$  - час проходження довжини контакту ЛК.

У межах останньої формотворної ділянки деталь повинна здійснити декілька обертів (проходів) для покращення шорсткості. Це залежить від кута  $\varphi$  на деталі, який визначає силову (рис. 3,4) та теплове навантаження через ширину області контакту та умови охолодження. Малі значення кута  $\varphi$  дозволяють знизити температуру, через покращення охолодження та меншу локалізацію навантажень в області формотворної точки деталі.

Ступінчатий профіль деталі отримують комбінацією подач: радіальної, при обробці торця, та поздовжньої для циліндричної ступені. Якість торців ступенів, як і під час шліфування тарілчастими кругами, виходить краще, без припалів, порівняно із обробкою торцем круга.

### Висновки

Матеріали теоретичних досліджень доводять можливість раціонального вибору режимів ефективного шліфування поверхонь обертання торцем круга конічної форми з кутом  $\alpha$ . шляхом керування міжосьовою відстанню Н.

Покращення якості обумовлене багато-прохідною обробкою. зі слідами шорсткості у вигляді сітки; меншим впливом коливань та теплової напруженості. Продуктивність шліфування обумовлена збільшенням розмірів контакту та раціональним підведенням припуску.

Задачі методики досягнуті.

Система нерівностей (1, 2) дозволяє визначити технологічні режимні параметри при доведенні локального навантаження інструмента до рівня різальної здатності вздовж усього профілю.

2. Знайдені залежності по керуванню кутом  $\varphi$  конусу фрагмента деталі, зв'язують розміри інструмента, ширину та довжину області контакту.

3. Зменшення кута конусу  $\varphi$  дозволяє визначити подачу на оберт, покращити якість через зменшення шорсткості, яка викликана більшою кількістю проходів.

Раціональні розміри області контакту дозволяють зменшити теплові навантаження та покращити умови охолодження деталі. Доцільніше працювати із меншою глибиною різання на прохід.

Рівномірне глибинне шліфування вирівнює навантаження вздовж усього профілю: всі точки працюють у однакових умовах ефективного шліфування. Це може забезпечити значну продуктивність шліфування, малі витрати абразивного матеріалу.

Методика не накладає значних обмежень по використанню. Тому загальні вирази та положення можуть бути прийнятними для інших способів обробки. Перспективним напрямком є дослідження інструмента іншої форми профілю.

### Список літератури

1. Sareh S. C., Esmaceli M. J., Mayer R. R. CNC table based compensation of inter-axis and line an axis scale gain errors for a five-axis machine tool from symbolic variation kinematics. *CIRP Annals*. Vol. 70. Iss. 1. 2021. P. 439–442. doi: 10.1016/j.cirp.2021.04.042.
2. Aurich I. C., Biermann A. D., Blum E. H. Modeling and simulation of process machine iteration in grinding. *Production Engineering Research and Development*. 2017. P. 111–120. doi: 10.1007/s11740-008-0137-x.
3. Okhrimenko O., Vovk V., Maidaniuk S., Lashyna Y. (2021). Determining the width of a layer cut with saws with multidirectional teeth. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 3(1 (111)). P. 14–20. doi: 10.15587/1729-4061.2021.231779.
4. Kalchenko V., Yeroshenko A., Boyko S., Sira N. Determination of cutting forces in grinding with crossed axes of tool and workpiece. *Actamechanica et automatica*. 2017. Vol. 11 (1). P. 58–63. doi: 10.1515/ama-2017-0009.
5. Radzevich S. *Gear Cutting Tools: Fundamentals of Design and Computation*. 2010. P. 115–135. doi: 10.1201/9781439819685.
6. Boess V., Chatti S., Laperrière L., Reinhart G., Tolio T. Geometric Modeling of Machining. *The International Academy for Production (eds) CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2018. doi: 10.1007/978-3-642-35950-7\_6696-4.
7. Chen M., Li X., Yang, P. Study on surface grinding hardening of SKD11 hardened steel. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*. 2007. 12(1). P. 236–245. doi: 10.1504/IJMTM.2007.014152.
8. Quickpoint. All in one fix. Prosp. «Junkermaschinen» company on machines «Quickpoint 1000», «Quickpoint3000», «Quickpoint 4000». ErwinJunker: MaschinenfabricGmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. Nordrash, Germany. 2003. URL: <https://www.junker-group.com/ru/shlifovalnye-stanki/products/quickpoint/>
9. Рудик А. В., Рудик В. А. Формоутворення поверхонь обертання торцем круга чашкової форми. *Вісник Херсонського національного технічного університету: Збірник*. – Херсон: ХНТУ. 2016. № 1(56). С. 77–83.
10. Rudyk A. V., Chupryna V. M., Pasov G. V., Venzhega V. I. Methods for determining the efficiency of the grinding process. *Науковий вісник НГУ*. 2020. № 5 (179). P. 95–101. doi: 10.33271/nvngu/2020-5/095.
11. Denkena B., Tönshoff H. K. Modeling and simulation. Basics of Cutting and Abrasive processes. *Lecture notes in production engineering*. Springer-Verlag Berlin. 2018.

### References (transliterated)

1. Sareh S.C., Esmaceli M. J., Mayer R. R. CNC table based compensation of inter-axis and line an axis scale gain errors for a five-axis machine tool from symbolic variation kinematics. *CIRP Annals*, 2021, Vol. 70, Iss. 1, pp. 439-442, doi: 10.1016/j.cirp.2021.04.042.
2. Aurich I. C., Biermann A. D., Blum E. H. Modeling and simulation of process machine iteration in grinding. *Production Engineering Research and Development*, 2017, pp. 111–120, doi: 10.1007/s11740-008-0137-x.

3. Okhrimenko O., Vovk V., Maidaniuk S., Lashyna Y. Determining the width of a layer cut with saws with multidirectional teeth. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 3(1 (111)), pp. 14–20, doi: 10.15587/1729-4061.2021.231779.
4. Kalchenko V., Yeroshenko A., Boyko S., Sira N. Determination of cutting forces in grinding with crossed axes of tool and workpiece. *Actamechanica et automatica*, 2017, 11 (1), pp. 58–63, doi: 10.1515/ama-2017-0009.
5. Radzevich S. *Gear Cutting Tools: Fundamentals of Design and Computation*, 2010, pp. 115–135, doi: 10.1201/9781439819685.
6. Boess V., Chatti S., Laperrière L., Reinhart G., Tolio T. Geometric Modeling of Machining. *The International Academy for Production (eds) CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2018, doi: 10.1007/978-3-642-35950-7\_6696-4.
7. Chen M., Li X., Yang, P. Study on surface grinding hardening of SKD11 hardened steel. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 2007, Vol. 12, pp. 236–245, doi: 10.1504/IJMTM.2007.014152.
8. Quickpoint. All in one fix: [Prosp. «Junkermaschinen» company on machines «Quickpoint 1000», «Quickpoint3000», «Quickpoint 4000»] ErwinJunker: MaschinenfabricGmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. Nordrash, Germany, Available at: <https://www.junker-group.com/ru/shlifovalnye-stanki/products/quickpoint/>
9. Rudyk A. V., Rudyk V. A. Formoutvorennya poverkhon' obertannya tortsem kruha chashkovoyi formy [Forming of surfaces of rotation by the end of a cup-shaped circle]. *Visnyk Khersons'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu: Zbirnyk. – Kherson: KHNTU*, 2016, no. 1(56), pp. 77–83.
10. Rudyk A. V., Chupryna V. M., Pasov G. V., Venzhega V. I. Methods for determining the efficiency of the grinding process. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020, no. 5 (179), pp. 95–101, doi: 10.33271/nvngu/2020-5/095.
11. Denkena B., Tönshoff H. K. Modeling and simulation. Basics of Cutting and Abrasive processes. *Lecture notes in production engineering*. Springer-Verlag Berlin, 2018.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Рудик Андрій Васильович** – кандидат технічних наук, Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, старший науковий співробітник; м. Чернігів, Україна; ORCID: 0000-0002-3582-9279; e-mail: andrei.rudik@gmail.com.

**Rudyk Andrei** – Ph. D., Research Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment, Chernihiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3582-9279; e-mail: andrei.rudik@gmail.com.

**Рудик Владислав Андрійович** – науковий співробітник, фірма ТАН, інженер, м. Чернігів, Україна; ORCID: 0000-0001-6233-4872 e-mail: Var\_911-91@mail.ru.

**Rudyk Vladislav** – TAN company, researcher, engineer, Chernihiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6233-4872 e-mail: Var\_911-91@mail.ru

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Рудик А. В., Рудик В. А. Вибір режимів ефективного шліфування валів при керуванні міжосьовою відстанню верстата. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 25–32. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.04.

*Please cite this article as:*

Rudyk A., Rudyk V. The regime choice with effective grinding by the way control inter-axis distance machine tools. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2 (12), pp. 25–32, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.04.

*Надійшла (received) 02.06.2022*



УДК 622.24.051.55

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.05

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКРАЩЕНОГО З'ЄДНАННЯ «ЗУБОК-ШАРОШКА» ШЛЯХОМ ВВЕДЕННЯ ДОДАТКОВОГО ЕЛЕМЕНТА ДЛЯ БУРОВИХ ДОЛІТ

А. М. СЛІПЧУК<sup>1\*</sup>, Р. С. ЯКИМ<sup>2</sup>, А. М. КУК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>кафедра робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА

<sup>2</sup>кафедра технологічної та професійної освіти, Дрогобицький державний педагогічний університет ім. І. Франка, м. Дрогобич, УКРАЇНА

\*e-mail: andsl@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Розроблено нову конструкцію породоруйнівної вставки, що дала змогу підвищити надійність з'єднання зубка з тілом шарошки долота. Це дозволило забезпечити сприятливі умови для раціонального розподілу контактних напружень у спряжених поверхнях «твердосплавний зубок – втулка – тіло шарошки долота». Поставлене завдання вирішувалось за рахунок вдосконалення обґрунтованого вибраного прототипу, яким є конструкція породоруйнівної вставки бурового долота. Конструкція включає твердосплавний зубок, який виконаний із двоступеневим хвостовиком із рівними по висоті ступенями. Розроблена конструкція породоруйнівної вставки створює можливості для підвищення міцності з'єднання «породоруйнівний зубок – тіло шарошки долота» завдяки надійному приляганню спряжених контактуючих поверхонь та унеможливує випадання твердосплавного зубка з втулки, підвищення опірності крихкому руйнуванню твердосплавного зубка в небезпечному перерізі. Запропоноване з'єднання дозволяє покращити щільність прилягання спряжених поверхонь «хвостовик зубка – втулка» при технологічних операціях складання породоруйнівної вставки. Отримані результати моделювання напруженого стану свідчать про те, що як і очікувалось при однакових зусиллях, які діють на зубок від 50кН до 68кН, найбільш напруженим місцем на шарошці буде «комірець» біля зубка. Напруження у цьому місці для шарошок з серійним породоруйнівним оснащенням буде складати до 1070МПа. У той час для шарошок із розробленим породоруйнівним оснащенням таке напруження буде складати до 912МПа, що є менше на 17%. Отже, розроблена конструкція породоруйнівної вставки відкриває нові можливості не тільки для підвищення міцності з'єднання з тілом шарошки, а й забезпечення умов протидії розтріскуванню твердосплавних зубків при різкому зростанні напружень в пресовому з'єднанні при перевантаженні під час руйнування гірських порід підвищеної міцності. Встановлено, що параметри конструкції породоруйнівної вставки, за рахунок балансу в спряженнях і застосуванні проміжної втулки, дають змогу якісно змінити жорсткість кріплення твердосплавного зубка, що забезпечує запобігання руйнуванню твердосплавного зубка при перевантаженні під час руйнування гірських порід підвищеної міцності. Також створюються можливості для застосування твердих сплавів з вищими показниками міцності та запобігання утворенню тріщин в тілі шарошки під час пресування вставок та в процесі руйнування породи. Розроблена конструкція породоруйнівної вставки дає змогу не тільки організовувати селективне складання, а й успішно усувати брак допущений при формуванні отворів.

**Ключові слова:** породоруйнівний елемент; зубок; шарошка; вставка; моделювання; тришарошкове бурове долото; конструкція зубка

## INVESTIGATION OF THE IMPROVED “INSERT CUTTER – CONE” CONNECTION BY INTRODUCING AN ADDITIONAL ELEMENT FOR ROLLER CONE BITS

А. М. СЛІПЧУК<sup>1</sup>, Р. С. ЯКИМ<sup>2</sup>, А. М. КУК<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Robotics and Integrated Mechanical Engineering Technologies, Lviv Polytechnic National University, L'viv, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Technological and Professional Education, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, Drohobych, UKRAINE

**ABSTRACT** A new design of the rock-destroying insert has been developed, which has made it possible to increase the reliability of the connection between the tungsten carbide inset cutter and the body of the cone. This allows providing favorable conditions for the rational distribution of contact stresses in the conjugate surfaces "tungsten carbide inset cutter – bush – a body of the cone". The task was solved by improving the well-founded selected prototype, which is the design of the rock-destroying insert of the drill bit. The construction includes a carbide inset cutter, which is made with a two-stage shank with equal steps in height. The developed design of the rock-destructive insert creates opportunities to increase the strength of the connection "inset cutter – the body of the cone". This is realized because a reliable fit of the conjugate contact surfaces is obtained and prevents the tungsten carbide inset cutter from falling out of the bush. Resistance increases to the brittle fracture of the carbide inset cutter in a dangerous section. The proposed joint allows to improve the tightness of the conjugate surfaces of the "shank of the inset cutter – bush" in the technological operations of assembling the rock-destructive insert. The obtained results of stress state modeling indicate that, as expected, with the same forces acting on the inset cutter from 50 kN to 68 kN, the most intense place on the cone will be the "flange" near the inset cutter. The stress will be up to 1070MPa in this place for cones with serial rock-destroying

equipment. Therefore, the developed construction of the destructive insert provides new opportunities not only to increase the strength of the connection with the body of the cone. Conditions secure the cracking of tungsten carbide insert cutter with surge stresses in the press connection when we have an overload during the destruction of high-strength rocks. At that time, this stress will be up to 912MPa, which is 17% less for cones with developed rock-destroying equipment. It is established that the structural parameters of the rock-destroying insert allow to qualitatively changing the rigidity of the carbide insert cutter. This effect is due because the balance created in the conjugations and the intermediate sleeve is applied. Therefore, the developed construction of the destructive insert provides new opportunities not only to increase the strength of the connection with the body of the cone. There are also opportunities for the use of hard alloys with higher strength and prevent the formation of cracks in the body of the cone during the pressing of the inserts and in the process of rock's destruction. The developed design of the rock-destroying insert not only makes it possible to organize selective assembly but also successfully eliminates the allowed defect during the formation of holes.

**Keywords:** rock-destroying element; tungsten carbide insert cutter; cone; insert; modeling; roller cone bits; insert cutter design

## Вступ

У нафтогазовій та гірничій промисловості важливою задачею є надійність бурового інструменту. Під час буріння гірської породи, а особливо міцних порід, проблема безвідмовності роботи тришарошкових бурових доліт гостро стоїть у сучасному виробництві високоякісного інструменту. Серед можливих варіантів бурового інструменту, який використовується для роботи з твердими та особливо твердими породами, застосовують бурові долота з вставним породоруйнівним оснащенням. Специфіка цього інструменту є наявність різноманітних за конструкцією та типорозміром вставних твердосплавних зубків, а також способів їх закріплення. Надзвичайно важкі умови роботи бурових доліт потребують певних особливостей конструкції такого породоруйнівного оснащення та висувають комплекс вимог. Задовольнити усі потреби, які ставляться перед конструктором та технологом, досить важко в умовах реального виробництва навіть при наявності спеціального обладнання на долотних підприємствах. Отже, вирішення поставленої задачі по розробці надійних критеріїв у підходах конструювання при вдосконаленні технології виготовлення тришарошкових бурових доліт є актуальною проблемою. Її вирішення має важливе практичне значення для розробки нафтогазових свердлових, часу їх освоєння та собівартості усіх робіт під час буріння [1–3].

До тришарошкових бурових доліт висувають підвищені вимоги, незважаючи на конструкцію і типорозміру. До таких характеристик відносять: висока надійність, міцність відповідальних елементів опор та породоруйнівного оснащення, продуктивність, здатність витримати руйнівні сили та крутний момент, які підводяться через долото для впливу на вибій. Також конструкційні матеріали технології їхнього оброблення, технології зміцнення, які застосовуються для виготовлення долота, мають задовольняти комплекс вимог і критерії що диктують фізико-механічні властивості порід, для буріння яких призначені конкретні марки тришарошкових бурових доліт. Відомо, що ефективність роботи тришарошкових бурових доліт, ставить перед сучасним долотобудуванням

застосування передових наукоємних технологій забезпечення політики якості на усіх етапах їхнього виготовлення. Стандартний набір правил, вимог, методів є типовим і вже давно узгоджений на виробництві. Найвищі вимоги висуваються до робочих поверхонь долота: елементів опор, породоруйнівного і захисного оснащення шарошок, приєднаної різи, для герметизованих опор – системи герметизації і змашування опори. Рівень точності отриманих форми та взаємного розташування цих поверхонь, розмірів згідно конструкторсько-технологічної документації визначають якісні показники виготовлення шарошкового долота [4].

Якість закріплення вставних твердосплавних зубків в тілі шарошки є одним з головних чинників, що визначає ефективність формування вибою, руйнування породи та формування свердловини. Ключовим елементом тут є досконалість конструкції шарошок та особливо породоруйнівних вставних зубків. Конструкція вставних твердосплавних породоруйнівних зубків визначає можливість з'єднання та впливає на надійність та жорсткість з'єднання з тілом шарошки долота. Тому вдосконалення конструкції вставних твердосплавних породоруйнівних зубків має вагоме практичне значення для долотобудування [5].

## Мета роботи

Розробити ефективну конструкцію вставного твердосплавного породоруйнівного зубка, що дає змогу підвищити надійність його з'єднання з тілом шарошки бурового долота. До конструкції ставляться вимоги щодо забезпечення сприятливих умов для раціонального розподілу контактних напружень у спряжених поверхнях «твердосплавний зубок – втулка – тіло шарошки долота». Також, необхідна жорсткість кріплення твердосплавного зубка, має забезпечуватися обґрунтованим вибором раціональних параметрів конструкції. Умови накладаються також на забезпечення й підвищення технологічності виготовлення вставного породоруйнівного оснащення шарошок бурових доліт.

### Огляд літературних джерел

Відомий буровий інструмент [6], корпус якого виконаний з отворами у яких розміщені втулки і породоруйнівні вставки з робочою головкою і ступінчастим хвостовиком, ступінь меншого діаметру якого запресована у втулку з натягом, що не перевищує натяг між втулкою і корпусом. Проте, дана конструкція не забезпечує необхідної надійності й жорсткості, що може спричинити у одному випадку до крихкого руйнування твердосплавної вставки, у другому її випадання при бурінні породи вибою.

Конструкція породоруйнівного органу [7], що складається з корпусу, вставки, зносостійкого породоруйнюючого зубка, що включає робочу частину і ступінчастий хвостовик. В цій конструкції необхідно виконувати високоточні глухі ступінчасті отвори та розміщати в них металеві вставки, що спричинює труднощі, як на стадії формоутворення отворів, так і при складальних операціях.

Чільна конструкція породоруйнівної вставки [8], що містить твердосплавний елемент у вигляді зубка, що має робочу головку і хвостовик, запресований в гніздо корпусу інструмента через проміжну втулку, яка має дно з отвором і виточку на боковій поверхні зі сторони дна, виконану по посадці з зазором довжиною меншою за товщину дна. Твердість втулки менша за твердість хвостовика, а її розміри відповідають таким співвідношенням

$$0,69 < \frac{d_1}{d_2} < 1; \quad 0,4 \leq \frac{d_1 N_1}{d_2 N_2} \leq 0,5, \quad (1)$$

де  $N_1$  – натяг, який виникає між внутрішньою поверхнею втулки діаметром  $d_1$  та зубком,  $N_2$  – натяг, який виникає між зовнішньою поверхнею втулки діаметром  $d_2$  та отвором шарошки,  $d_1$  – діаметр внутрішньої поверхні втулки під вставний зубок,  $d_2$  – діаметр зовнішньої поверхні втулки, яка встановлюється у шарошку. Як показує практика, то при застосуванні даної конструкції, немає необхідної жорсткості та надійності закріплення твердосплавного зубка. Запасу пружності в нижній частині спряження хвостовик – втулка відсутній, а це і є причиною пластичної деформації втулки і випадіння твердосплавного зубка.

Найближчою до розробленої конструкції є породоруйнівна вставка [9], що включає твердосплавний елемент, який виконаний із двоступеневим хвостовиком, який має рівний по висоті 2 ступені. Співвідношення діаметрів відповідають такому вигляду:

$$\frac{d_3}{d_4} = \frac{1,8}{1,5}, \quad (2)$$

де  $d_3$  – діаметр першої ступені хвостовика,  $d_4$  – діаметр другої ступені хвостовика (рис. 1). Ніжка зуба, яка запресована в гнізді втулки, дно якої виконано з центральним отвором, а розміри втулки відповідають співвідношенням (1), а хвостовик виконаний двоступеневим із рівними по висоті ступенями, діаметри яких відповідають співвідношенню (2). Однак дана конструкція не забезпечує необхідну жорсткість з'єднання породоруйнівної вставки з тілом породоруйнівного інструменту, а також надійність кріплення твердосплавного елемента. Несприятливий розподіл напружень у ділянці контакту спряжених посадкових поверхонь твердосплавного зубка з проміжною втулкою, а також породоруйнівної вставки і дна отвору під неї в тілі інструмента. Дана конструкція також не забезпечує досягнення підвищення технологічності у виготовленні через необхідність спеціального різального інструменту для підбирання дна отвору в тілі породоруйнівного інструменту під якісне й надійне пресування породоруйнівної вставки.

### Виклад основного матеріалу

В основу розробленої конструкції поставлене завдання створення вставної породоруйнівної вставки, що дає змогу підвищити надійність з'єднання зубка з тілом шарошки долота, забезпечити сприятливі умови для раціонального розподілу контактних напружень у спряжених поверхнях «твердосплавний зубок – втулка – тіло шарошки долота». Ключовим моментом тут є забезпечення необхідної жорсткості кріплення твердосплавного зубка за рахунок обґрунтованого вибору раціональних параметрів конструкції хвостовика породоруйнівної вставки. Для ефективного освоєння виробництвом, породоруйнівна вставка має забезпечувати підвищити технологічність як у виготовленні, так і при складальних операціях при виготовленні шарошкових бурових доліт.

Поставлене завдання вирішували завдяки вдосконаленню обґрунтовано вибраного прототипу, яким є конструкція породоруйнівної вставки бурового долота, що включає твердосплавний зубок, який виконаний із двоступеневим хвостовиком із рівними по висоті ступенями [9]. У конструкцію хвостовика внесено обґрунтовані зміни, завдяки чому розроблена конструкція породоруйнівної вставки відрізняється тим, що втулка виконана у вигляді конуса з кутом при вершині  $120^\circ$ , а спряжені поверхні твірних малої ступені хвостовика та відповідної поверхні твірної внутрішнього отвору втулки виконані з конусністю, значення якої є в межах від 1:30 до 1:50, що взаємно орієнтована у різні сторони, а спряження між великим та малим діаметрами хвостовика твердосплавного елемента, виконані у вигляді галтелі, що включає радіус в межах  $2 \div 3$  мм та кут у вершині основи хвостовика

великого діаметра  $\beta=160-165^\circ$ , відповідна спряжена з малим діаметром хвостовика твердосплавного елемента внутрішня поверхня втулки.

Розроблена конструкція породоруйнівної вставки [9] забезпечує раціональні параметри розподілу контактних напружень у ділянках спряжень «твердосплавний зубок – втулка – тіло шарошки долота», необхідну жорсткість системи «шарошка долота – породоруйнівний зубок – порода вибою», створює можливості для підвищення міцності з'єднання «породоруйнівний зубок – тіло шарошки долота», надійне прилягання спряжених контактуючих поверхонь та унеможливує випадання твердосплавного зубка з втулки, підвищення опірності крихкому руйнуванню твердосплавного зубка в небезпечному перерізі, покращення щільності прилягання спряжених поверхонь «хвостовик зубка – втулка» при технологічних операціях складання породоруйнівної вставки.

Породоруйнівна вставка складається із зубка 1, який виготовлений з твердого сплаву і має робочу головку 2. Хвостовик виготовлений у формі двоступеневого циліндра з різними діаметрами. Перша ступінь є більшою і дорівнює діаметру  $d_3$  3. Друга ступінь є меншою і має діаметр  $d_4$  4. В складеному стані породоруйнівний вставка запресовуються в гніздо тіла шарошки 6. Втулка 5 має зовнішню поверхню діаметром  $d_3$  (рис. 1) і внутрішню  $d_5$  (рис. 3). Зовнішня посадкова поверхня основи втулки 5 виконана у вигляді конуса з кутом при вершині  $120^\circ$ , яка забезпечує раціональний контакт при посадці породоруйнівного зубка в гніздо тіла шарошки 6. У конусній частині втулки 5 виконано центральний отвір 7 (рис. 1).

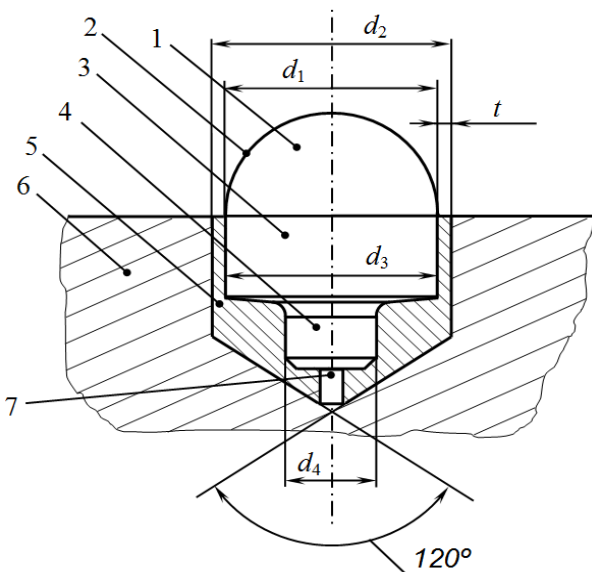


Рис. 1 – Породоруйнівна вставка, що включає твердосплавний зубок з втулкою, запресована у тіло шарошки бурового долота

На рис. 1 показано, у перерізі, породоруйнівну вставку, що включає породоруйнівний твердосплавний зубок з втулкою, яка запресована у тіло шарошки бурового долота, де:

- 1 – твердосплавний зубок;
- 2 – робоча головка твердосплавного зубка;
- 3 – циліндричний хвостовик твердосплавного зубка із більшим діаметром  $d_3$ ;
- 4 – циліндричний хвостовик твердосплавного зубка із меншим діаметром  $d_4$
- 5 – втулка;
- 6 – тіло шарошки;
- 7 – центральний отвір у конусній частині втулки;
- 8 – внутрішній отвір втулки діаметром  $d_4$ ;
- 9 – основа хвостовика твердосплавного зубка діаметром  $d_3$

- 10 – внутрішній отвір втулки діаметром  $d_5$ ;
- 11 – основа втулки;
- $R$  – гальтель у межах  $2 \div 3$  мм;
- $\beta$  – кут при вершині основи хвостовика діаметра  $d_3$  твердосплавного зубка. Вибрано у межах  $160 - 165^\circ$ .

- $H$  – висота комбінованої ніжки зубка;
- $t$  – товщина стінки втулки на висоті діаметра  $d_3$ ;
- $a$  – фаска на ніжці твердосплавного зубка;
- $h$  – висота циліндричної зовнішньої поверхні втулки.

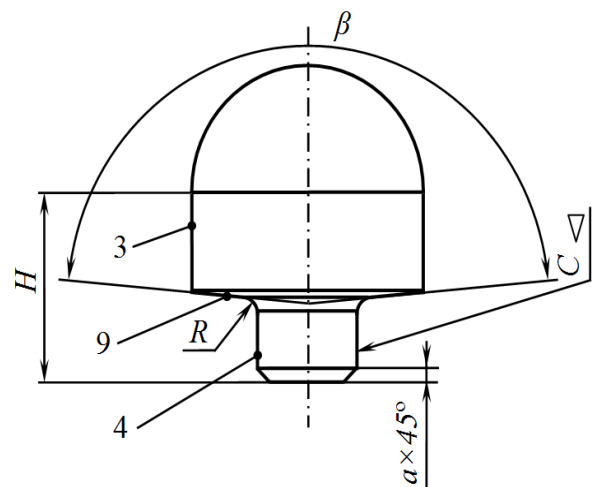


Рис. 2 – Породоруйнівний твердосплавний зубок

Величина діаметра  $d_4$  підбирається таким чином, щоб зберігалось співвідношення (2), тобто вона залежить від величини діаметру  $d_3$ . Така пропорція необхідна для забезпечення необхідної конструктивної міцності (рис. 1). Якщо діаметр  $d_3$  дорівнює 14 мм, то діаметр  $d_4$ , враховуючи це співвідношення буде дорівнювати до 12 мм. Спряжені поверхні твірних малої ступені хвостовика 4 твердосплавного зубка 1 та відповідної поверхні твірної внутрішнього отвору 8 втулки 5 виконана з конусністю, значення якої є в межах від 1:30 до 1:50, що взаємно орієнтована у різні сторони, а спряження

між великими діаметрами 3 та малим діаметрами хвостовика 4 твердосплавного зубка 1 (рис. 1), та виконане у вигляді галтелі, що включає радіус в межах  $R = 2 \div 3$  мм та кут  $\beta$  у вершині основи 9 хвостовика великого діаметра 3 (рис. 2) твердосплавного зубка 1 вибрано у межах  $160 - 165^\circ$ . Спряження 11 між великим 10 та малим 8 отворами втулки 5 має такі самі геометричні параметри: радіус спряження вибрано у межах  $R = 2 \div 3$  мм, а та кут  $\beta$  у вершині основи 11 отвору великого діаметра 10 втулки 5 вибрано у межах  $160 - 165^\circ$  (рис. 3). Розміри втулки 5 відповідають співвідношенням (1).

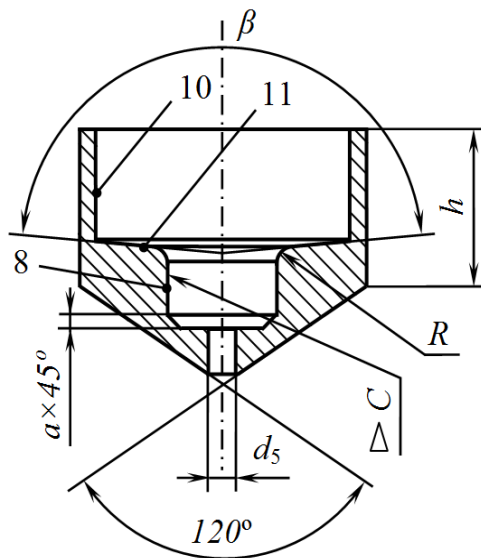


Рис. 3 – Втулка під посадку хвостовика твердосплавного зубка

Слід звернути увагу на те, що твердість ступінчатого хвостовика 3, 4 твердосплавного зубка повинна бути більшою за твердість матеріалу втулки 5.

Як показано на рис. 1 товщина стінки  $t$  у втулці 5 є тонкостінною, а її зовнішній діаметр  $d_3$  буде залежати від діаметру  $d_2$  та є величинами різного порядку.

Технологія виконання породоруйнівного оснащення шарошок бурових доліт включає такі етапи: формоутворення отворів, призначення раціональних натягів підбором селективних груп втулок, складання з'єднання «породоруйнівний зубок – втулка», пресування зібраних породоруйнівних вставок у визначені (селективні) отвори в тілі шарошок [10]. Отже, з'єднання твердосплавного зубка 1 з втулкою 5 здійснюється посадкою з натягом по внутрішній поверхні втулки 5. Забезпечення найбільшого натягу між внутрішньою поверхню втулки 5 з діаметром  $d_1$  та твердосплавним хвостовиком 3 і 4 не повинен допустити ризик змінання внутрішньої поверхні втулки 5.

При складанні вставки центральний отвір 7 слугує для випуску повітря, що витісняється твердосплавним зубком 1 з внутрішньої порожнини втулки 5. Під час запресовування необхідно дотримуватись відсутності зазору між отвором 10 втулки 5 та хвостовиком більшого діаметру  $d_3$ . Зусилля пресу прикладаються до головки 2 твердосплавного зубка 1. При цьому, для забезпечення ефективності з'єднання застосовано теплове пресування, яке ґрунтується на нагріванні втулки 5 та охолодженні твердосплавного зубка 1. Це уможливило уникнення пластичної деформації спряжених конусних поверхонь 8 втулки 5 та пошкодження конусної поверхні 9 твердосплавного зубка 1. За таких умов створено надійний замок у спряжених елементах меншої ступені хвостовика 4 твердосплавного зубка 1 та малого діаметра отвору 8 втулки 5, що забезпечує найкращі експлуатаційні показники породоруйнівної вставки.

У складеній породоруйнівній вставці (рис. 1) можна виконати обробку зовнішньої поверхні втулки 5, щоб підкоректувати посадку з натягом.

Запресовування породоруйнівної вставки в гніздо тіла інструмента 6 може бути здійснено як при нагрітому корпусі шарошки бурового долота, так і при холодному. Зусиллям пресу, що прикладений до робочої головки 2 твердосплавного зубка 1, яке передано хвостовиком 3, 4 і втулки 5, здійснено запресовування породоруйнівної вставки. При цьому, зовнішній шар поверхні втулки 5 з діаметром  $d_2$  контактує з поверхнею глухого отвору у тілі шарошки 6, і піддається пружній деформації. Це сприяє повнішому стицанню поверхонь, підвищує площу контакту і зменшує можливість змінання спряжених поверхонь. При запресовуванні виникає зусилля, яке додатково стискає хвостовик 4.

Раціональне співвідношення діаметрів втулки і натягів у внутрішній та зовнішній поверхні дає змогу передати на хвостовик 3 твердосплавного зубка 1 раціональне значення зусилля обтискання.

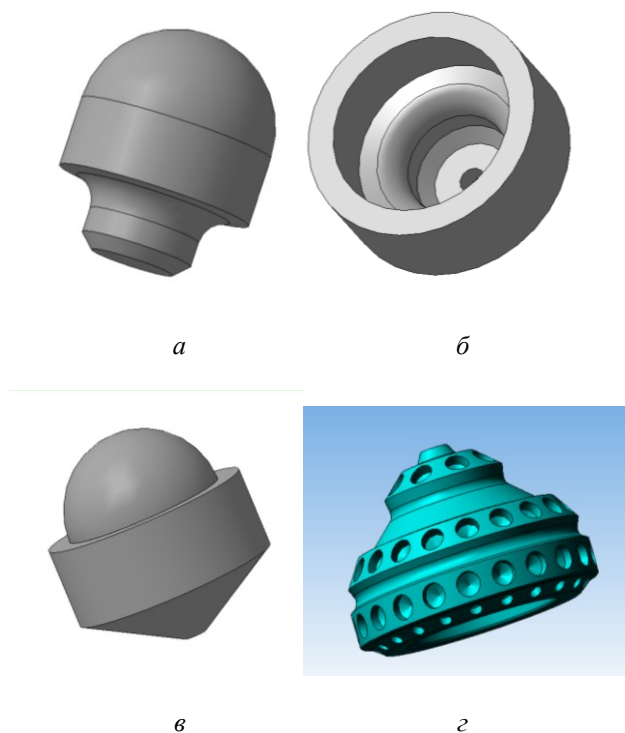
Породоруйнівна вставка з втулкою запресована до упору в дно гнізда, при цьому конусна поверхня і отвір у вершині основи втулки унеможливує виникнення несприятливого розподілу напружень у ділянці дна отвору в тілі шарошки 6. Порожнина центрального отвору 7, також дає достатній об'єм для стиснутого повітря при процесі пресування, що сприяє запресовуванню вставки до упору в дно гнізда інструмента 6.

Отвір 7 корисний і для демонтажу твердосплавного елемента 1 з шарошки відпрацьованого бурового долота для переробки цінного твердого сплаву. Для цього частину корпусу інструмента можна зрізати по перерізу, що

проходить у ділянці отвору 7 втулки 5, після чого, через отвір 7 твердосплавний елемент 1 може випресовуватися.

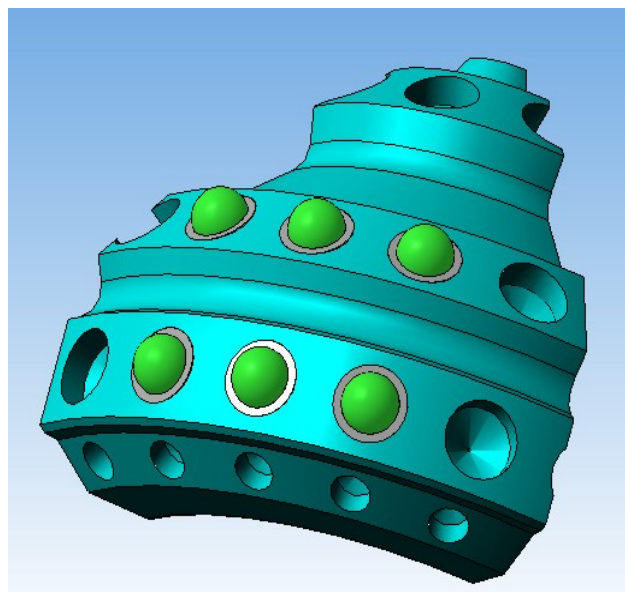
В основу розробленої нової конструкції породоруйнівної вставки покладено результати науково-конструкторських експериментальних досліджень, в тому числі представлені нижче результати моделювання в середовищі програмного продукту КОМПАС-3D АРМ FEM. Отже, спочатку створено 3D моделі розробленої конструкції породоруйнівної вставки (породоруйнівний зубок, втулка) під посадку в отвори однієї з шарошок тришарошкового бурового долота (рис. 4).

Для порівняння характеристик розподілів напружених станів у перерізах шарошок з розробленим породоруйнівним оснащенням та базовим (серійна технологія) створено 3D моделі для аналогічної конструкції шарошки оснащеної стандартним породоруйнівним оснащенням – породоруйнівними зубками з циліндричними хвостовиками встановленими у вінця шарошки за серійною технологією пресування (рис. 5).



*а – твердосплавний зубок ; б – втулка твердосплавного зубка;  
в – породоруйнівна вставка  $\varnothing 18$ мм; г – модель однієї з шарошок бурового долота*

*Рис 4. – 3-D модель елементів розробленої конструкції та зубків побудовані для досліджень напруженого стану породоруйнівного оснащення шарошок за умов імітації умов експлуатації*



*Рис. 5 – 3-D модель фрагмента шарошки з породоруйнівним оснащенням розробленої конструкції*

Аналізу піддавали шарошки тришарошкового бурового долота діаметром 302 мм. Аналіз міцності шарошок, оснащених порівнюваними варіантами породоруйнівного оснащення, виконували по небезпечному перерізі, при цьому виходили з випадку коли зведена сила прикладена до основного твердосплавного зубка моделі сягає 70 кН.

Моделювали фрагмент з 3-ма робочими зубками (рис. 5), які працюють в таких умовах:

- на основний зубок, розміщений всередині – прикладаємо по 68 кН.
- на сусідні зубки – прикладаємо по 50 кН.
- на усі ніжки зубків і на отвори шарошки діє тиск 1000МПа [6], який виникає при запресовуванні твердосплавного зубка.

Таким чином у контактній зоні кожна шарошка буде зазнавати до 200 кН, що відповідно впливає на напружений стан вінців шарошки [11]. Генеруючи сітку з кінцевих елементів (рис. 6) отримали характер напруженого стану у вінцях шарошки (рис. 7).

Для проведення теоретичного дослідження створимо сегмент конструкції шарошки, яка буде включати два основних вінця. Отримані результати [11] пошкоджені вінців доліт після експлуатації у вибої повністю узгоджується з даними, які отримали під час моделювання. На рис. 7-9 вказано області, які зазнають найбільших навантажень і відповідно у них виникають найбільші напруження.

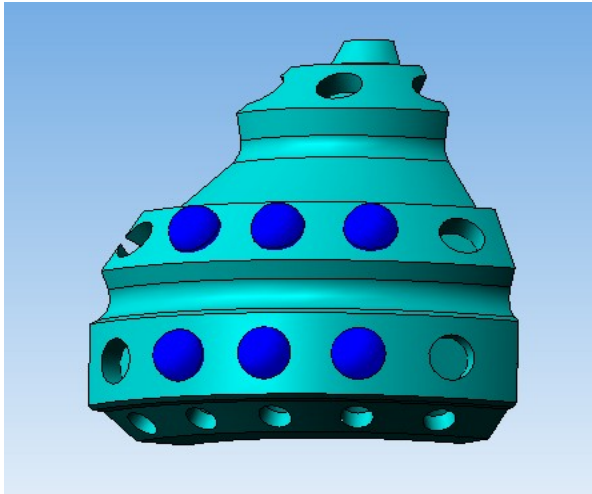


Рис. 6 – 3-D модель фрагмента шарошки з серійним породоруйнівним оснащенням тришарошкового бурового долота діаметром 302мм

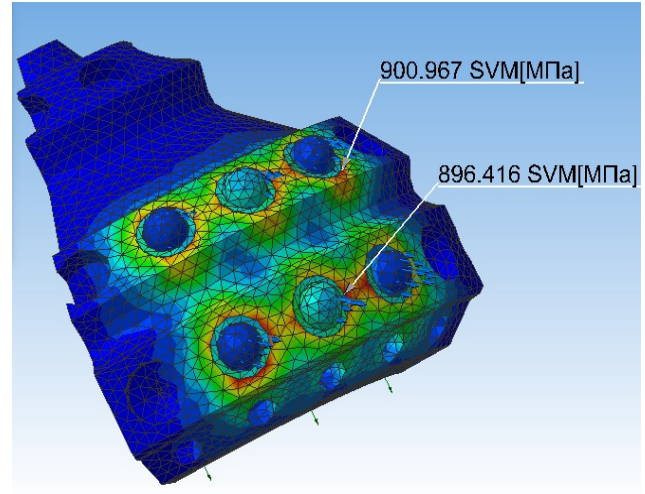


Рис. 9 – Моделювання напруженого стану на основних вінях шарошки з породоруйнівним оснащенням розробленої конструкції, у ділянках спряження «хвостовик зубка – отвір шарошки»

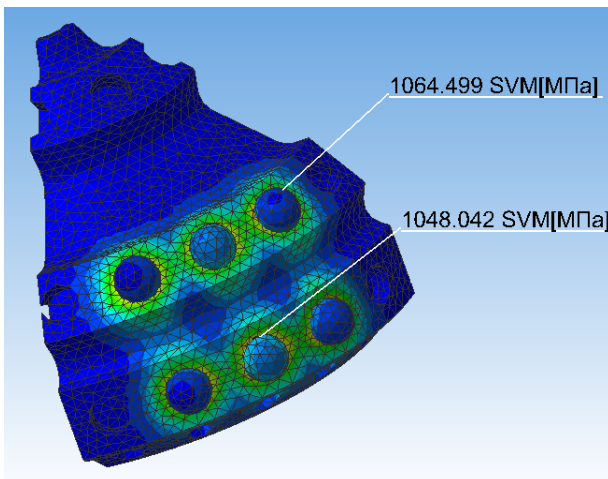


Рис. 7 – Моделювання напруженого стану на основних вінях шарошки з породоруйнівним оснащенням серійної конструкції у ділянках спряження «хвостовик зубка – отвір шарошки»

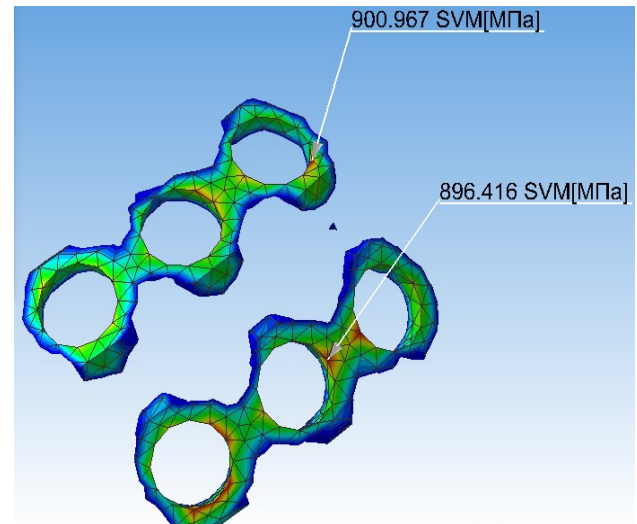


Рис. 10 – Зображення напруженого стану у фрагменті шарошки з породоруйнівним оснащенням розробленої конструкції, де напруження складає в межах 635 МПа до 912 кПа

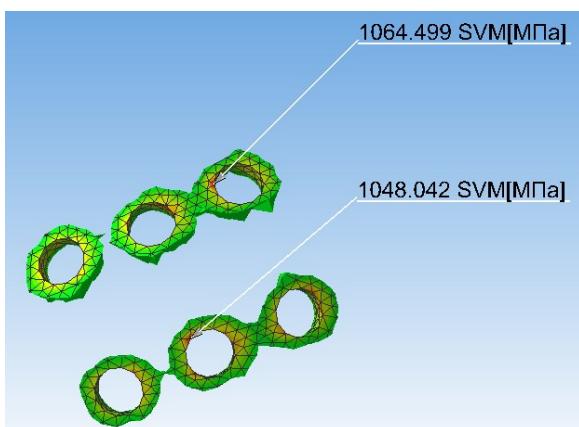


Рис. 8 – Зображення напруженого стану у фрагменті шарошки з породоруйнівним оснащенням серійної конструкції де напруження складає в межах 500МПа до 1070МПа

## Висновки

Теоретично й експериментально обґрунтовано параметри ефективної конструкції вставного твердосплавного породоруйнівного зубка, що дає змогу підвищити надійність його з'єднання з тілом шарошки бурового долота. Аналізом моделювання напруженого стану розробленої нової конструкції встановлено якісне та кількісне забезпечення сприятливих умов для раціонального розподілу контактних напружень у спряжених поверхнях «твердосплавний зубок – втулка – тіло шарошки долота». Встановлено, що параметри конструкції

породоруйнної вставки, за рахунок балансу в спряженнях і застосуванні проміжної втулки дають змогу якісно змінити жорсткість кріплення твердосплавного зубка, що забезпечує запобігання руйнуванню твердосплавного зубка при перевантаженні під час руйнування гірських порід підвищеної міцності. Також створюються можливості для застосування твердих сплавів з вищими показниками міцності та запобігання утворень тріщин у тілі шарошки під час пресування вставок та у процесі руйнування породи. Розроблена конструкція породоруйнної вставки дає змогу не тільки організувати селективне складання, а й успішно усувати брак допущений при формоутворенні отворів. За умов застосування суцільного твердосплавного зубка треба підшукувати необхідний діаметр для отворів, що різко випадають з ряду для посадки. Розроблена конструкція дає змогу, при однакових параметрах конструкції твердосплавного зубка, за рахунок проміжної втулки мобільно створювати необхідну кількість породоруйнівних вставок не тільки у селективних групах, а й у окремих «аварійних» випадках.

#### Список літератури

1. Ropyak L., Schuliar I., Bohachenko O. Influence of technological parameters of centrifugal reinforcement upon quality indicators of parts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. 5(79). P. 53–62. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59850.
2. Chung S. W., Park S. M. A Shell Theory of Hybrid Anisotropic Materials. *International Journal of Composite Materials*. 2016. 6(1). P. 15–25. doi: 10.5923/j.cmaterials.20160601.03.
3. Сліпчук А. М., Яким Р. С. Вплив технологічних параметрів складання з'єднання «зубок-шарошка» на якість вставного твердосплавного оснащення шарошок бурових доліт. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 3 (5). С. 3–9. doi: 10.20998/2413-4295.2020.01.01.
4. Wei M. D., Dai F., Xu N. W., Liu J. F., Xu Y. Experimental and numerical study on the cracked chevron notched semi-circular bend method for characterizing the mode I fracture toughness of rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016. 49(5). P. 1595–1609. doi: 10.1007/s00603-015-0855-2.
5. Mirsayar M. M., Razmi A., Aliha M. R. M., Berto F. EMTSN criterion for evaluating mixed mode I/II crack propagation in rock materials. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018. 190. P. 186–197. doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.12.
6. Панин Н. М., Думкин Л. Н., Ардасов Л. В., Лавренов В. С., Митюшин В. Н. А.с. 1439192. СССР, МКИ E21 B 10/16//E21B10/52. Буровой инструмент № 4210632/22-03; Заявлено 12.03.87; Оpubл. 23.11.88, Бюл. № 43. 3 с.
7. Линдо Г. В., Одинец С. И., Подкопаев П. А., Саркисян В. А., Арестов В. П. А.с. 909100. СССР, МКИ E21 B 10/16. Породоразрушающий орган. №

- 2967714/22-03; Заявлено 31.07.80; Оpubл. 28.02.82, Бюл. №8. 6 с.
8. Алексеев С. Е., Геде А. П. А.с. 1303696. СССР, МКИ E21 B 10/46. Породоразрушающая вставка. № 3872267/22-03; Заявлено 25.03.85; Оpubл. 15.04.87, Бюл. № 14. 3 с.
9. Петрина Ю.Д., Яким Р. С., Пасинович Т. Б. Пат. 38856 Україна, МПК E21B 10/46. Породоруйнівна вставка. заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. № u200809040; заявл. 10.10.08; опубл. 26.01.2009, Бюл. № 2. 4 с.
10. Яким Р. С., Сліпчук А. М. Оцінка надійності та критерії підвищення якості вставного породоруйнівного оснащення тришарошкових бурових доліт для буріння особливо міцних порід. *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ». 2019. № 5 (1330). С. 77–85. doi: 10.20998/2413-4295.2019.05.10
11. Thiyagu M., Karunamoorthy L., Arunkumar N. Thermal and tool wear characterization of graphene oxide coated through magnetorheological fluids on cemented carbide tool inserts. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 19, Iss. 4. P. 1043–1055. doi: 10.1016/j.acme.2019.05.005.

#### References (transliterated)

1. Ropyak L., Schuliar I., Bohachenko O. Influence of technological parameters of centrifugal reinforcement upon quality indicators of parts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, 5(79), pp. 53–62, doi: 10.15587/1729-4061.2016.59850.
2. Chung S. W., Park S. M. A Shell Theory of Hybrid Anisotropic Materials. *International Journal of Composite Materials*, 2016, no. 6 (1), pp. 5–25, doi: 10.5923/j.cmaterials.20160601.03.
3. Slipchuk A., Jakym R. The influence of technological factors during pressing tungsten carbide insert cutter in the cone of the roller cone bits for the reliability connection. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 3(5), pp. 3–9, doi: 10.20998/2413-4295.2020.01.01.
4. Wei M. D., Dai F., Xu N. W., Liu J. F., Xu Y. Experimental and numerical study on the cracked chevron notched semi-circular bend method for characterizing the mode I fracture toughness of rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49 (5), pp. 1595–1609, doi: 10.1007/s00603-015-0855-2.
5. Mirsayar M. M., Razmi A., Aliha M. R. M., Berto F. EMTSN criterion for evaluating mixed mode I/II crack propagation in rock materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 190, pp. 186–197, doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.12.
6. Panin N. M., Dumkin L. N., Ardasov L. V., Lavrenov V. S., Mityushin V.N. A.s. 1439192. SSSR, MКИ Ye21 V10/16//Ye21 V 10/52. Буровой инструмент (SSSR). № 4210632/22-03; Заявлено 12.03.87; Оpubл. 23.11.88, Бюл. № 43, 3 p.
7. Lindo G. V., Odinets S. I., Podkopayev P. A., Sarkisyan V. A., Arestov V. P. A.s. 909100. SSSR, MКИ Ye21 V 10/16. Porodorazrushayushchii organ № 2967714/22-03; Заявлено 31.07.80; Оpubл. 28.02.82, Бюл. № 8, 6 p.
8. Alekseyev S. Ye., Gede A. P. A.s. 1303696. SSSR, MКИ Ye21 V 10/46. Porodorazrushayushchaya vstavka. №



- 3872267/22-03; Zayavleno 25.03.85; Opubl. 15.04.87, Byul. № 14, 3 p.
9. Petrina YU. D., Yakym R. S., Pasynovych T. B. Pat. 38856 Ukrayina, MPK E21V 10/46. Porodoruynivna vstavka (Ukrayina); zayavnyk ta patentovlasnyk Ivano-Frankivs'kyu natsional'nyu tekhnichnyu universytet nafty ta hazu. № u 200809040; zayavl. 10.10.08; opubl. 26.01.2009, Byul. №2, 4 p.
10. Jakym R., Slipchuk A. Assessment of reliability and criteria for improving the quality of rock cutting equipment of tricone drilling bits for well-boring especially hard rock. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), pp. 77–85, doi: 10.20998/2413-4295.2019.05.10.
11. Thiyagu M., Karunamoorthy L., Arunkumar N. Thermal and tool wear characterization of graphene oxide coated through magnetorheological fluids on cemented carbide tool inserts. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2019, Vol. 19, Iss. 4, pp. 1043–1055, doi: 10.1016/j.acme.2019.05.005.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Сліпчук Андрій Миколайович** – кандидат технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри *робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування*, м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0003-0584-6104, e-mail: andsl@ukr.net

**Slipchuk Andrii** – Candidate of Technical Sciences, PhD, Lviv Polytechnic National University, Docent of the Department of Robotics and Integrated Mechanical Engineering Technologies, Lviv, Ukraine, ORCID: orcid.org/0000-0003-0584-6104, e-mail: andsl@ukr.net

**Яким Роман Степанович** – доктор технічних наук, професор, Дрогобицький державний педагогічний університет ім. І. Франка, професор кафедри технологічної та професійної освіти; м. Дрогобич, Україна, e-mail: Jakym.r@online.ua

**Yashkym Roman** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, Professor of Department of Technological and Professional Education, Drohobych, Ukraine, e-mail: Jakym.r@online.ua

**Кук Андрій Михайлович** – кандидат технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри *робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування*, м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0003-0584-6104, e-mail: andrii.m.kuk@lpnu.ua

**Kuk Andrii** – Candidate of Technical Sciences, PhD, Lviv Polytechnic National University Docent of the Department of Robotics and Integrated Mechanical Engineering Technologies, Lviv, Ukraine, ORCID: orcid.org/0000-0001-9145-243X, e-mail: andrii.m.kuk@lpnu.ua

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

Сліпчук А. М., Яким Р. С., Кук А. М. Дослідження покращеного з'єднання «зубок-шарошка» шляхом введення додаткового елемента для бурових доліт. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 33-41. doi: 10.20998/2413-4295.2022.02.05.

*Please cite this article as:*

Slipchuk A., Jakym R., Kuk A. Investigation of the improved "insert cutter – cone" connection by introducing an additional element for roller cone bits. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2 (12), pp. 33–41, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.05.

*Надійшла (received) 28.05.2022*

УДК 004/7

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.06

## СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК» НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ INTERNET OF THINGS

О. В. СТРОКАНЬ\*, Є. М. НАЗАРОВ

кафедра комп'ютерних наук, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, м. Мелітополь, УКРАЇНА

\*e-mail: oksana.strokan@tsatu.edu.ua

**АНОТАЦІЯ** Збільшення кількості пристроїв, підключених до Інтернету, викликало ескалацію технологічної революції в Інтернеті речей (Internet of Things). Інтернет речей об'єднує програмне і апаратне забезпечення, здатне контролювати та дистанційно управляти різноманітними процесами у багатьох сферах людської діяльності: інтелектуальний транспорт, охорона навколишнього середовища, державна робота, громадська безпека, промисловість, побут, освіта, медицина тощо. Постійний розвиток технологій Інтернету речей дозволяє з кожним днем ставати все більш інтелектуальним, винахідливим та зручним для користувача. Одним із найзначніших та останніх реалізацій технології Internet of Things є системи «Розумний будинок». Розглянуто створення комплексного прикладного рішення для управління системою «Розумний будинок» на основі технології Internet of Things. Запропонований перелік задач для автоматизації, концептуальна архітектура подібного рішення для реалізації на мобільній платформі. Запропонована система управління «Розумний будинок» дозволяє створити комфортні і безпечні умови всередині приміщення, а саме здійснювати моніторинг та управління мікрокліматом технічного середовища. Під технічним середовищем прийняте середовище, в якому необхідно забезпечити задані параметри: рівень температури, вологості, атмосферного тиску і загазованості повітря. Система управління, яка пропонується у цій роботі, базується на мікроконтролерній платформі NodeMCU V3 на базі модулі ESP8266. В якості вимірювальних пристроїв прийняті: датчик температури та вологості DHT11, датчик загазованості MQ-7, датчик атмосферного тиску BMP280.3.3V. Крім того, система здатна реєструвати дані в реальному часі на сервері хмар, через який користувач також може відстежувати в реальному часі стан середовища з будь-якої точки світу. Для реалізації логіки платформи NodeMCU V3 застосоване програмування на мові C/C++. Для здійснення діалогу між користувачем і системою управління розроблено інтерфейс користувача, який являє собою мобільний додаток з лічильником і графічним відображенням вимірюваних параметрів технічного середовища. За допомогою системи управління «Розумний будинок», приведеної у статті, можливо створити комфортні і безпечні умови всередині приміщення. **Ключові слова:** система управління; Інтернет речей; Розумний будинок; NodeMCU; модуль ESP8266; моніторинг; технологічне середовище; датчик

## SMART HOUSE CONTROL SYSTEM BASED ON INTERNET OF THINGS TECHNOLOGY

О. STROKAN\*, Je. NAZAROV

Department of Computer Science, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Melitopol, UKRAINE

**ABSTRACT** The increase in the number of Internet-connected devices has prompted the escalation of the technological revolution in the Internet of Things (IoT). The Internet of Things brings together software and hardware that can monitor and remotely control a variety of processes in many areas of human activity: intelligent transportation, the environment, government, public safety, industry, the world, medicine, and more. The constant development of Internet of Things technologies allows us to become more intelligent, resourceful and user-friendly every day. One of the most significant and latest implementations of Internet of Things technology is the Smart Home system. The creation of a comprehensive application solution for the control of the system "Smart Home" based on the technology of the Internet of Things is considered. The list of tasks for automation, conceptual architecture of the similar decision for realization on a mobile platform is offered. The proposed control system "Smart Home" allows you to create comfortable and safe conditions in the room, namely to control and manage the microclimate of the technical environment. In the capacity of a technical environment, a environment is adopted, in which it is necessary to ensure the given parameters: temperature, moisture, atmospheric pressure and gas pollution. The control system proposed in this article is based on the NodeMCU V3 microcontroller platform based on the ESP8266 module. The following are accepted as measuring devices: temperature and humidity sensor DHT11, gas pollution sensor MQ-7, atmospheric pressure sensor BMP280.3.3V. Moreover, the system is capable of logging real-time data into the cloud server through which a user can also monitor the real-time over the cloud from anywhere in the world. C/C++ programming is used to implement the logic of the NodeMCU V3 platform. To implement a dialogue between the user and the control system, a user interface has been developed, which is a mobile application with a counter and a graphical display of the measured parameters of the technical environment. With the help of the "Smart Home" control system given in the article, it is possible to create comfort and safe conditions premises.

**Keywords:** control system; the Internet of Things; Smart Home; NodeMCU; module ESP8266; monitoring; a technical environment; sensor

### Вступ

Світ ІТ технологій розвивається безперервно і динамічно. Зараз вже не можливо уявити повсякденне життя без використання комп'ютерних технологій, направлених на автоматизацію і спрощення

різноманітних життєвих процесів. І з кожним роком кількість технічних пристроїв, якими необхідно управляти, зростає, розширюється спектр їх функціональних можливостей. Тому постає питання автоматизації управління цими пристроями, направленими на створення комфортних умов

існування людини. Вирішити це питання покликанні сучасні ІТ технології.

Сьогодні найпоширенішою ІТ технологією є технологія «Інтернет речей» (Internet of Things – IoT) Інтернет речей (IoT) - це концепція, що розвивається, яка розширює можливості підключення через Інтернет між електронними пристроями і датчиками, щоб зробити наше життя простіше [1]. Технологія «Інтернет речей» надає можливість користувачу легко управляти сукупністю цифрових пристроїв (things) із використанням зручного графічного інтерфейсу за допомогою Інтернету. IoT широко застосовується в інтелектуальному транспорті, охороні навколишнього середовища, державній роботі, громадській безпеці [2,3].

Одним із сучасних напрямків застосування технології «Інтернет речей» є системи «Розумний будинок» [2]. «Розумний будинок» являє собою систему, яка об'єднує програмне і апаратне забезпечення, здатне контролювати та управляти безпекою, енергозбереженням і комфортом оточуючого людину середовища [4]. Сучасна людина удосконалила технології автоматичного та віддаленого управління настільки, що дана технологія дозволяє не тільки економити час та гроші, а також дозволяє забезпечити захист будинку.

В наш час на ринку представлено чимало систем управління «Розумний будинок» відомих та нових брендів, здатних виконати описані вище задачі.

Але існують ситуації, коли наявних продуктів недостатньо або їх працездатність недостатня для використання на практиці (висока ціна, малий перелік готових функцій, відсутність україномовного інтерфейсу тощо). У зв'язку з цим постає необхідність у розробці оригінальної системи управління «Розумний будинок», яка б була здатна створювати комфортні умови всередині приміщення відповідно до поставлених користувачем вхідних умов.

### Мета роботи

Метою роботи є аналіз апаратного забезпечення для систем підтримки розумного будинку та практична реалізація інтелектуальної системи управління «Розумний будинок» на основі технології «Інтернет речей». Задачами, які ставляться перед цією системою, є: забезпечення енергозбереження, зменшення витрат на створення комфортних умов проживання у будинку, можливість імплементації цієї системи у систему управління будинку або міста.

### Виклад основного матеріалу

Інтелектуальна система «Розумний будинок» на базі технології «Інтернет речей» використовує Інтернет для моніторингу та управління фізичними пристроями, які підключені до мережі Інтернет [4]. Основний принцип роботи даної системи міститься у тому, що ці пристрої взаємодіють один з одним без участі людини через відповідне програмне забезпечення. Основною особливістю розумного

будинку є об'єднання окремих підсистем в єдиний процес управління. Система управління «Розумний будинок» на базі технології Internet of Things надає можливість управляти пристроями, які входять до складу системи, у реальному часі за допомогою будь-якого мобільного пристрою або персонального комп'ютера, розташованого в локальній мережі або з доступом в Інтернет.

В наш час на ринку існує велика кількість систем, здатних забезпечити автоматизоване управління побутовими пристроями. Порівняльний аналіз таких систем наведений у табл. 1.

Таблиця 1 - Порівняльний аналіз можливостей систем «Розумний будинок»

Назва	Orvibo	РД від Xiaomi	Redmond
Легкість підключення	+	+	-
Зона дії	до 30 м	до 10 м	до 50 м
Автономність	+	+	+
Вартість	від 150\$	90\$	130\$
Кількість підключених пристроїв	100 пристроїв	пристрої базового набору	пристрої стартового набору і більше
Тип підключення	дротове підключення до Інтернету	Wi-Fi	Bluetooth

В результаті аналізу було виявлено, перелік проблем, які є наданий час у сучасних системах управління для розумних будинків. Зазвичай це висока ціна, малий перелік готових функцій, відсутність україномовного та російськомовного розпізнавання голосових команд.

Враховуючи недоліки розглянутих систем, у даній роботі пропонується створення нової інтелектуальної системи «Розумний будинок», яка б мала змогу не тільки контролювати і управляти температурним, вологісним режимом, рівнем загазованості у приміщенні, але й зберігати поточні дані з можливістю створення запиту до системи.

Система управління «Розумний будинок», яка пропонується у статті, функціонує на базі технічного, програмного та інформаційного забезпечення, та являє собою мобільний додаток. Технічне забезпечення складається із сукупності інженерних систем та електроприладів (різноманітних датчиків, електроприводів тощо). Програмне та інформаційне забезпечення системи являє собою комплекс взаємопов'язаних програмних засобів, які

забезпечують автоматичне вирішення задач збору інформації, її первинної обробки у формі, зручній для реєстрації, виробітку управляючих впливів.

Технологічний процес моніторингу і управління процесами «Розумний будинок» у міститься наступному (рис. 1).

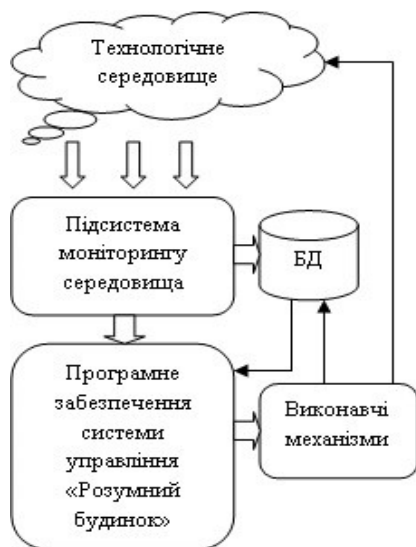


Рис. 1 – Технологічний процес моніторингу і управління процесами «Розумний будинок»

Технічне середовище являє собою приміщення, в якому необхідно забезпечити задані параметри стану середовища. В нашому випадку це параметри мікроклімату – температура, вологість, загазованість, тиск.

Підсистема моніторингу середовища являє собою технічне супроводження системи для вирішення поставленої задачі і включає вимірювальні пристрої: датчик вимірювання температури, гігрометр, датчик диму, датчик тиску. Виміряні дані поступають в базу даних, де зберігаються протягом тривалого часу, і на вхід програмного забезпечення системи, де відбувається моделювання стану технологічного середовища. В блоці моделювання виміряні дані порівнюються з нормованими даними з бази нормованих значень. Далі, відповідно до заданого алгоритму роботи системи і результатів порівняння виміряних і нормованих значень, блок прийняття рішень видає інформацію, яка у вигляді управляючих впливів передається на виконавчі механізми.

Дані про стан в середовищі служать основою для видачі управлінського впливу на виконавчі пристрої – наприклад, якщо температура та/або рівень вологості досягли заданого максимального значення, включається кондиціонер. При досягненні вказаними параметрами мікроклімату заданого мінімального значення кондиціонер відключається. У випадку переміщення користувача в межах дії датчика руху, останній активізується і передає дані на мікроконтролер. При активізації інших датчиків робота системи відбувається аналогічно. Поточний та

оновлений стан виконавчих пристроїв передається до бази даних.

Апаратна реалізація системи «Розумний будинок» представлена у вигляді схеми підключення елементів до мікроконтролера (рис. 2).

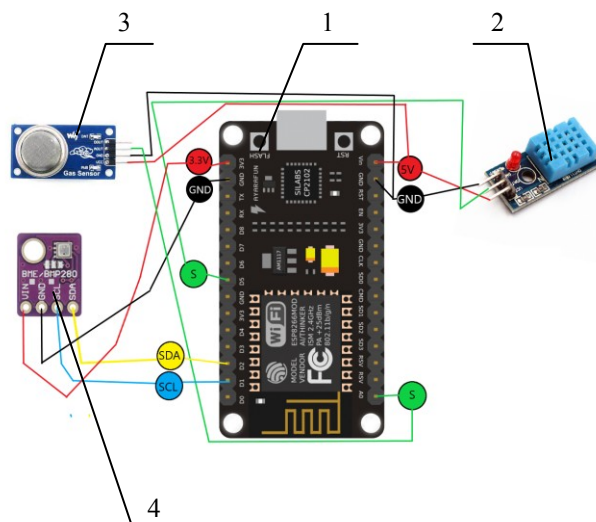


Рис. 2 – Апаратна реалізація системи «Розумний будинок»

Головним елементом схеми (див. рис. 2) є мікросхема контролера (1). Також до складу схеми входять: датчик температури та вологості (2), датчик рівня якості повітря – датчик загазованості (3) та датчик атмосферного тиску (4).

В якості головного елементу системи обрано мікроконтролерна платформа NodeMCU V3 (рис. 3).



Рис. 3 – Мікроконтролерна платформа NodeMCU V3

Вибір мікроконтролерної платформи NodeMCU V3 обумовлений наступними особливостями цієї платформи. Мікроконтролерна платформа NodeMCU V3 [5,6] – це програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом і комплект для розробки, який відіграє важливу роль у розробці запропонованої інтелектуальної системи на основі IoT технології за допомогою кількох рядків сценаріїв. Платформа базується на модулі ESP8266, який є недорогим мікрочипом Wi-Fi, що містить як повний стек TCP/IP, так і можливості мікроконтролера. Чіпсет містить вбудоване самокалібрування для компенсації помилок

продуктивності, покращуючи точність модуляції і стабільність бездротової комунікації. Наявність вбудованого Wi-Fi є однією з переваг даної платформи у порівнянні з іншими модулями аналогічного призначення. Мікроконтролерна платформа NodeMCU V3 в поєднанні з ESP8266 [7] використовується в якості блоку обробки, який збирає дані з датчиків, а потім завантажує їх до серверу. NodeMCU зчитує дані і команди з того ж самого серверу, за якими здійснює управління комутаційними пристроями.

Мікроконтролерна платформа NodeMCU в інтелектуальній системі управління «Розумний будинок» здійснює моніторинг температурного і вологісного режимів, а також загазованості навколишнього середовища і атмосферного тиску у приміщенні. З цією метою до відповідних виводів платформи NodeMCU підключені датчик температури, датчик вологості, датчик газу та барометр.

Датчик температури і вологості служить для вимірювання температури і рівня вологості у приміщенні. В якості датчика температури і вологості приймемо сенсор DHT11 (рис. 4). Сенсор відмінно відкалібрований, стабільний і енергоефективний [8,9]. Датчик DHT11 складається з ємнісного чутливого елемента вологості та термістора для визначення температури.

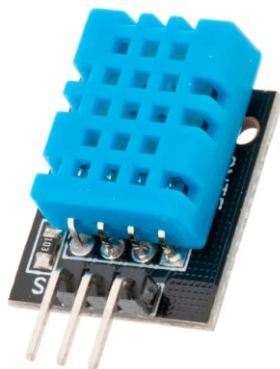


Рис. 4 – Датчик температури і вологості DHT11

Датчик підключається до керуючої електроніки через три дроти. Дані температури і вологості передаються по сигнальному проводу у вигляді цифрового сигналу. Вологість повітря описує вміст вологи у повітрі, яка може бути вираженою абсолютною вологістю, відносною вологістю та тиском водяної пари.

Для здійснення моніторингу стану загазованості у приміщенні сучасний ринок пропонує велику кількість датчиків [10]. В роботі приймемо датчик загазованості MQ-7 [3]. Даний датчик служить для детектування чадного газу та диму і володіє такими характеристиками: високою чутливістю, малим часом відгуку, низькою вартістю, надійністю, простою схемою включення, великим терміном експлуатації і стабільністю характеристик.

Для контролю за рівнем атмосферного тиску приймемо вимірювач атмосферного тиску барометр BMP280.3.3В [11]. Головними відмінностями даного

датчика є невеликі габарити, знижене енергоспоживанням, висока точність роботи, наявність точного заводського калібрування та двох послідовних інтерфейсів: I2C і SPI.

Для забезпечення Wi-Fi зв'язку з мобільним пристроєм застосуємо модуль ESP-01, взаємодія його з мікроконтролером здійснюється з через UART за допомогою набору AT-команд. Модуль можна використовувати як самостійний пристрій, завантаживши необхідну прошивку.

На рис. 5 зображений макет системи, зібраний на обраних технічних пристроях.

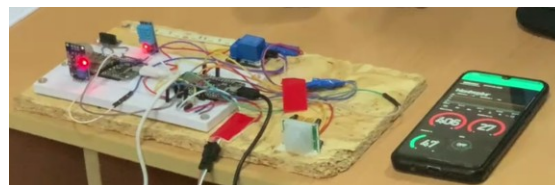


Рис. 5 – Макет системи «Розумний дім»

Вибір програмних засобів – є одним із найважливіших етапів розробки програмного продукту. Від правильності вибору залежить якість і адекватність роботи всієї системи в цілому.

Для реалізації роботи логіки платформи NodeMCU V3 застосоване програмування на мові C / C ++, яка скомпонована з бібліотекою AVR Libc і дозволяє використовувати будь-які її функції. Мова C++ відрізняється швидкістю, універсальністю, поширеністю, активно підтримується користувачами [12].

Система управління «Розумний дім» на основі технології Internet of Things для моніторингу стану навколишнього середовища має у своєму складі датчики, контролер і сенсори, які передають інформацію на пристрій управління, який в подальшому після опрацювання інформації передає управляючі впливи на виконавчі механізми, реалізований як мобільний пристрій.

Діалог між користувачем і системою «Розумний будинок» відбувається за рахунок інтерфейсу користувача, спроектованого як мобільний додаток. У процесі аналізу переваг і недоліків програмних засобів, які можна використати для розробки інтерфейсу користувача системи, для створення Android-додатку було обрано мову програмування Java. При виборі цього програмного інструменту враховувалися його кросплатформенність, здатність програм, створених на мові програмування Java працювати однаково на будь-якому сумісному з Java пристрої без необхідності зміни коду [13].

Мобільний додаток системи має у своїй архітектурі модуль підтримки ухвалення простих рішень, підсистему збору та демонстрації статистичної й аналітичної інформації. Інтерфейс користувача мобільного додатку розбитий на декілька зон (рис. 6): зона ініціалізації; зона демонстрації статистичної й аналітичної інформації, представленої у графічному і цифровому відображенні зміни стану середовища.

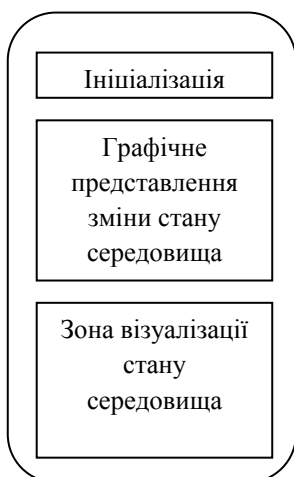


Рис. 6 – Архітектура інтерфейсу користувача системи «Розумний дім»

На рис. 7 наведений розроблений інтерфейс користувача системи «Розумний будинок». Спроектований інтерфейс користувача є інформативним, відповідає ергономічним і психологічним вимогам, які пред'являються до розробок такого типу.

За допомогою запропонованої IoT системи «Розумний будинок» можливо створити комфортні і безпечні умови всередині приміщення. Таким чином, така система може знайти застосування у широкому діапазоні: наприклад, автоматизація будинку, системи безпеки офісом, системи забезпечення енергозберігання тощо.



Рис. 7 – Інтерфейс користувача системи «Розумний дім»

## Висновки

Здійснений аналіз існуючих систем розумного будинку на сучасному ринку показав відсутність простого і дешевого рішення, яке б поєднувало програмне і апаратне забезпечення, спрямоване на задоволення потреб мешканців будинку, а також виявив необхідність розробки нової інтелектуальної системи «Розумний будинок» на базі технології Internet of Things. Основна мета створення такої системи полягає у підвищенні рівня безпеки комфорту існування, що досягається шляхом автоматизації управління підсистемами життєзабезпечення. Рациональне використання ресурсів забезпечує енергозбереження і зменшення витрат на створення комфортних умов проживання у будинку. Нова система має зручний інтерфейс керування будинком у вигляді мобільного додатку, за допомогою якого ефективно реалізований модуль підтримки ухвалення простих рішень, підсистема збору та демонстрації статистичної й аналітичної інформації.

У функціональні можливості системи входить: ведення бази даних показників температури, вологості, атмосферного тиску і загазованості приміщення; відображення показників вимірюваних показників середовища на моніторі мобільного пристрою за допомогою лічильників і графіків.

Обраний набір апаратного забезпечення дозволяє здійснювати подальше масштабування системи і впровадження її у інші системи розумного будинку.

## Список літератури

1. Mobasshir M., Hossain M., ApuGazi Md. Shamrat IoT-Cognizant cloud-assisted energy efficient embedded system for indoor intelligent lighting, air quality monitoring, and ventilation. *Internet of Things*. 2020. Vol. 11. P. 81-98. doi: 10.1016/j.iot.2020.100266.
2. Li B., Yu J. Research and Application on the Smart Home Based on Component Technologies and Internet of Things. *Procedia Engineering*. 2011. P. 2087-2092. doi: 10.1016/j.proeng.2011.08.390.
3. Строкань О. В., Литвин Ю. О. Система поливу ґрунту на платформі мікроконтролера ARDUINO. *Тематичний збірник наукових праць «Системи обробки інформації» Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба*. Харків, 2019. Випуск 2 (157). С. 90-95. doi: 10.30748/soi.2019.157.12
4. Mocrii D., Chen Yu., Musilek P. IoT-based smart homes: a review of system architecture, software, communications, privacy and security. *Internet of Things*. 2018. Vol. 1–2. P. 81-98. doi: 10.1016/j.iot.2018.08.009.
5. Pariha Y. S. Internet of Things and Nodemcu. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*. 2019. Volume 6, Issue 6. P. 1085-1088.
6. Firmansyah R., Yusuf M., Saputra P. IoT Based Temperature Control System Using Node MCU ESP 8266. *International Joint Conference on Science and Engineering. Advances in Engineering Research*. 2020. Vol. 196. P. 401-407. doi: 10.2991/aer.k.201124.072.
7. Alam Md. T., Pathak V. Internet of Things (IoT) Enabled Automation Systems. *International Journal for Scientific Research & Development*. 2018. Vol. 6. Issue 09. P. 10-14.

8. Novelan M. S., Amin M. Monitoring System for Temperature and Humidity Measurement with DHT11 Sensor Using NodeMCU. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*. 2020. Vol. 5. Issue 10. P. 123-128.
9. Paul K. K., Ochieng R. O., Mutava G. M. Monitoring Temperature and Humidity using Arduino Nano and Module-DHT11 Sensor with Real Time DS3231 Data Logger and LCD Display. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2020. Vol. 9. Issue 12. P. 416-422.
10. Leo-Ramírez A., Tabuenca B., García-Alcántara V., Tovar E., Greller W. and Gilarranz-Casado C., Solutions to ventilate learning spaces: a review of current CO2 sensors for IoT systems. *2021 IEEE 45th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*. 2021. P. 1544-1551. doi: 10.1109/COMPSAC51774.2021.00230.
11. Барометр BMP280 3.3V (датчик атмосферного тиску). URL: <https://arduino.ua/prod1758-barometr-datchik-atmosfernogo-davleniya-na-bmp280>.
12. Васильєв О. *Програмування на C++ в прикладах і задачах*: Навч. посіб. Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. 382 с.
13. Васильєв О. *Програмування мовою Java*. Київ: Видавництво Богдан, 2020. 696 с.
4. Mocii D., Chen Yu., Musilek P. IoT-based smart homes: a review of system architecture, software, communications, privacy and security. *Internet of Things*, 2018, Vol. 1–2, pp. 81-98, doi: 10.1016/j.iot.2018.08.009.
5. Pariha Y. S. Internet of Things and Nodemcu. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, 2019, Volume 6, Issue 6, pp. 1085-1088.
6. Firmansyah R., Yusuf M., Saputra P. IoT Based Temperature Control System Using Node MCU ESP 8266. *International Joint Conference on Science and Engineering. Advances in Engineering Research*, 2020, Vol. 196, pp. 401-407, doi: 10.2991/aer.k.201124.072.
7. Alam Md. T., Pathak V. Internet of Things (IoT) Enabled Automation Systems. *International Journal for Scientific Research & Development*, 2018, Vol. 6, Issue 09, pp. 10-14.
8. Novelan M. S., Amin M. Monitoring System for Temperature and Humidity Measurement with DHT11 Sensor Using NodeMCU. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 2020, Vol. 5, Issue 10, pp. 123-128.
9. Paul K. K., Ochieng R. O., Mutava G. M. Monitoring Temperature and Humidity using Arduino Nano and Module-DHT11 Sensor with Real Time DS3231 Data Logger and LCD Display. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2020, Vol. 9, Issue 12, pp. 416-422.

#### References (transliterated)

1. Mobasshir M., Hossain M., ApuGazi Md. Shamrat IoT-Cognizant cloud-assisted energy efficient embedded system for indoor intelligent lighting, air quality monitoring, and ventilation. *Internet of Things*, 2020, Vol. 11, pp. 81-98, doi: 10.1016/j.iot.2020.100266.
2. Li B., Yu J. Research and Application on the Smart Home Based on Component Technologies and Internet of Things. *Procedia Engineering*, 2011, pp. 2087-2092, doi: 10.1016/j.proeng.2011.08.390.
3. Strokan O. V., Lytvyn Yu. O. Systema polyvu hruntu na platformi mikrokontrolera ARDUINO. *Tematychnyy zbirnyk naukovykh prats' «Systemy obrobky informatsiyi» Kharkivs'koho universytetu Povitryanykh Syl imeni Ivana Kozheduba*. Kharkiv, 2019, Vypusk 2(157), pp. 90-95, doi: 10.30748/soi.2019.157.12.
10. Leo-Ramírez A., Tabuenca B., García-Alcántara V., Tovar E., Greller W. and Gilarranz-Casado C., Solutions to ventilate learning spaces: a review of current CO2 sensors for IoT systems. *2021 IEEE 45th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)*, 2021, pp. 1544-1551, doi: 10.1109/COMPSAC51774.2021.00230.
11. Barometr BMP280 3.3V (datchyk atmosferneho tysku). Available at: <https://arduino.ua/prod1758-barometr-datchik-atmosfernogo-davleniya-na-bmp280>.
12. Vasyly'ev O. *Prohramuvannya na S++ v prykladakh i zadachakh*: Navch. posib. K. Vydavnytstvo Lira-K, 2017. 382 p.
13. Vasyly'ev O. *Prohramuvannya movoyu Java*. K. Vydavnytstvo Bohdan, 2020. 696 p.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Строкань Оксана Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, доцент кафедри комп'ютерних наук; м. Мелітополь, Україна; ORCID: 0000-0002-6937-3548; e-mail: oksana.strokan@tsatu.edu.ua.

**Strokan Oksana** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Computer Science, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Melitopol, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6937-3548; e-mail: oksana.strokan@tsatu.edu.ua.

**Назаров Євген Матвійович** – кафедра комп'ютерних наук; м. Мелітополь, Україна; ORCID: 0000-0001-6491-5937; e-mail: jevgenij.matvijovich.nazarov@gmail.com.

**Nazarov Yevgen** – Department of Computer Science, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Melitopol, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6491-5937; e-mail: jevgenij.matvijovich.nazarov@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Строкань О. В., Назаров Є. М. Система управління «Розумний будинок» на основі технології Internet of Things. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 42-47. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.06.

*Please cite this article as:*

Strokan O., Nazarov Ye. Smart house control system based on Internet of Things technology. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2 (12), pp. 42–47, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.06.

*Надійшла (received) 02.06.2022*

UDC 621.314

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.07

## REMOTE CONTROL SYSTEM OF STEPPER MOTOR BASED ON THE ESP32 DEVELOPER BOARD

*C. XUAN\*, I. VERBYTSKYI*

Department of Electronic Devices and Systems, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

\*e-mail: xuanc274@gmail.com

**ABSTRACT** The stepper motor is a unit of a control system to achieve the goal of convenient use and precise control, which greatly facilitates our life and improves the level of the modern high-tech industry. In particular, multiple stepper motors may be joined in a system and work together with a remote-control program, which greatly improves the flexibility and applicability of the equipment. In real life, multiple stepper motors are used together more often. For example, a 3D printer, using three stepping motors at the same time, the x-axis, the y-axis, and the z-axis, can determine the left side of the space and accurately print the 3D three-dimensional object we need. By adding a remote-control system, we can control the movement of the motor in real time and can replace humans to complete complex and high-precision work. For example, endoscopes are often used in medicine, when the endoscope needs to make micro adjustments in position, we can use remote control to make real-time adjustments. The project of using ESP32 to control multiple stepper motors and uses python language to write programs based on microPython firmware to realize remote control of multiple stepper motors is introduced. The speed and direction of the stepper motor can be adjusted and controlled by pulse signals. The clock system of ESP32 can generate pulse signal PWM, ESP32 comes with a WiFi module, which can support remote control. The speed of the stepper motor can be adjusted by adjusting the duty cycle of the PWM by the program. Combined with ESP32 products, the performance of this designed product can be stable and reliable. The clock system of ESP32 has multiple timers and with their use with the interrupt system, multiple stepper motors can be efficiently controlled simultaneously. And the WiFi module of ESP32 can realize remote control easily and conveniently. According to the principle of the stepping motor, the half-step control, and full-step control are realized. Additionally, a micro step mode with PWM signal with cosine function is designed to control the stepper motor. A user-friendly web application has been developed to control the system of four motors, allowing you to remotely control a four-engine system in a simple and convenient way

**Keywords:** ESP32; stepper motor; remote control; WiFi module; microPython

## СИСТЕМА ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ КРОКОВИМ ДВИГУНОМ НА БАЗІ ПЛАТИ РОЗРОБНИКА ESP32

*Ч. СЮАНЬ, Є.В. ВЕРБИЦЬКИЙ*

Кафедра електронних пристроїв та систем, факультет електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» Київ, УКРАЇНА

**АНОТАЦІЯ** Кроковий двигун – це блок системи управління для досягнення мети зручного використання та точного керування, що значно полегшує наше життя та підвищує рівень сучасної високотехнологічної промисловості. Зокрема, кілька крокових двигунів можуть бути об'єднані в систему і працювати разом з використанням програми дистанційного керування, що значно покращує гнучкість та застосовність обладнання. У реальному житті кілька крокових двигунів використовуються разом частіше. Наприклад, 3D-принтер, використовуючи одночасно три крокові двигуни, вісь x, вісь y та вісь z, може визначити ліву частину простору та точно надрукувати потрібний нам тривимірний об'єкт. Додавши систему дистанційного керування по WiFi можна керувати рухом двигуна в режимі реального часу та повністю автоматизувати процес. Наприклад, ендоскопи, які часто використовуються в медицині, коли ендоскопу потрібно внести мікрокоригування в положення, ми можемо використовувати дистанційне керування для внесення змін у режимі реального часу. Представлено проект використання ESP32 для керування кількома кроковими двигунами одночасно. А модуль WiFi ESP32 може реалізувати мову Python для написання програм на основі мікропрограмного забезпечення microPython для реалізації віддаленого керування кількома кроковими двигунами. Швидкість і напрямок крокового двигуна можна регулювати і керувати за допомогою імпульсних сигналів. Система годинника ESP32 може генерувати імпульсний сигнал ШІМ, ESP32 поставляється з модулем WiFi, який може підтримувати дистанційне керування. Швидкість крокового двигуна можна регулювати, регулюючи робочий цикл ШІМ програмою. У поєднанні з продуктами ESP32 продуктивність цього розробленого продукту може бути стабільною та надійною. Система відліку часу ESP32 має кілька таймерів, використання яких з системою переривань, дає можливість ефективно керувати кількома кроковими двигунами одночасно. А модуль WiFi ESP32 може реалізувати дистанційне керування легко та зручно. Відповідно до принципу дії крокового двигуна, реалізовано півкрокове керування та повнокрокове керування кроковим двигуном, а також мікрокове керування з використанням ШІМ сигналу, що змінюється за законом косинусної функції. Для керування двигуном було розроблено зручний веб-додаток, що дозволяє здійснювати дистанційне керування системою, що складається з чотирьох двигунів, у простий і зручний спосіб

**Ключові слова:** ESP32; кроковий двигун; дистанційне керування; WiFi модуль; microPython

### Introduction

The stepper motor cooperates with the remote control system to achieve the goal of convenient use and

precise control, which greatly facilitates our life and improves the level of the modern high-tech industry.

In particular, multiple stepper motors work together and use the remote control program, which



greatly improves the flexibility and applicability of the equipment. In real life, multiple stepper motors are used together more often. For example, a 3D printer, using three stepping motors at the same time, the x-axis, the y-axis and the z-axis, can determine the left side of the space and accurately print the 3D three-dimensional object we need [1].

By adding a remote-control system, we can control the movement of the motor in real time and can replace humans to complete complex and high-precision work. For example, endoscopes are often used in medicine, when the endoscope needs to make micro-adjustments in position, we can use a remote control to make real-time adjustments.

Stepper motors can run accurately and stably and are widely used in modern industry. Remote control of multiple stepper motors has a very wide range of uses. It can be adjusted according to specific usage conditions and can be applied in many fields [2,3].

### The goal of the work

Study the principle of the stepper motor, according to the principle of stepper motor, and then based on micro python, use Python to write programs into ESP32 to realize remote control of multiple stepper motors.

### Principle of stepper motor operation

There are several ways to control the phases of a stepper motor.

The first method is provided by variable switching of phases, thus they do not overlap, at one moment of time only one phase is included, Fig.1 a). The rotor equilibrium points for each step coincide with the "natural" rotor equilibrium points of a non-supply motor. The disadvantage of this control method is that for a bipolar motor at the same time 50% of the windings are turned on and for a unipolar motor only 25%. This means that full torque cannot be obtained in this mode.

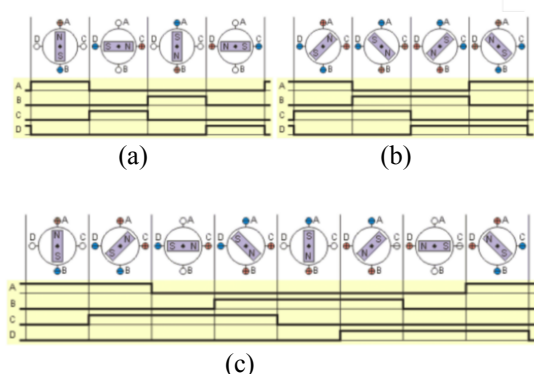


Fig. 1 – Modes of the stepper motor: a) full-step mode, one phase is included; b) full-step mode, two phases are included; c) half-step mode

The second method is overlapping phase control: the two phases are included at the same time. In this control method, the rotor is fixed at the intermediate position between the stator poles, Fig. 1 b) and provides approximately 40% greater torque than in a single contained phase. This control method provides the same step angle as the first method, but the position of the rotor balance point is moved to half a step.

The third method is a combination of the first two, called the half-step mode. This method is quite common, because the cost of a few-step motor is higher, and it is very attractive, from a 100-step motor to 200 steps per revolution. In each second step, only one phase is used for feeding, and in other cases, two are used for feeding, Fig. 1 c). As a result, the angular displacement of the rotor is the half-step rotation angle of the first two control methods. In addition to reducing the step size, this control method also allows part of the resonance phenomenon to get rid of. The half-step mode usually does not allow full torque to be obtained, although the most perfect drive implements a modified half-step mode in which the engine provides almost full torque while the power dissipated does not exceed the rated power [4, 5].

### Design of remote stepper motor control system

With the development of the times, the functions of microprocessors are becoming more and more powerful, and many chips that can complete complex control functions. To carry out this project, the system design needs to be carried out first, and a complete scheme is required. After the processor is selected, a program needs to be written to complete the control of the stepper motor. At the same time, to achieve remote control, a microprocessor and computer communication are required to achieve better human-computer interaction, as shown in Fig. 2.

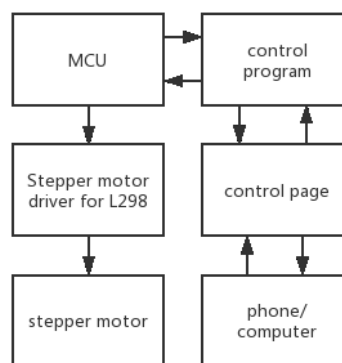


Fig. 2 – System design framework

Therefore, combined with the development board, we can use the development board to generate pulse signals to control the stepper motor and adjust the speed and direction of the motor. The project is developed based on stepper motor NEMA14 with current per winding 1 A.

It is typically used in 3D printers, laser engraving, and small CNC machines. The stepper motor structure is shown in Fig. 3. The main characteristics of NEMA14 are as follow: model – JK35HS34-1004; turning angle in one step: 1.8°; current per winding is 1 A.

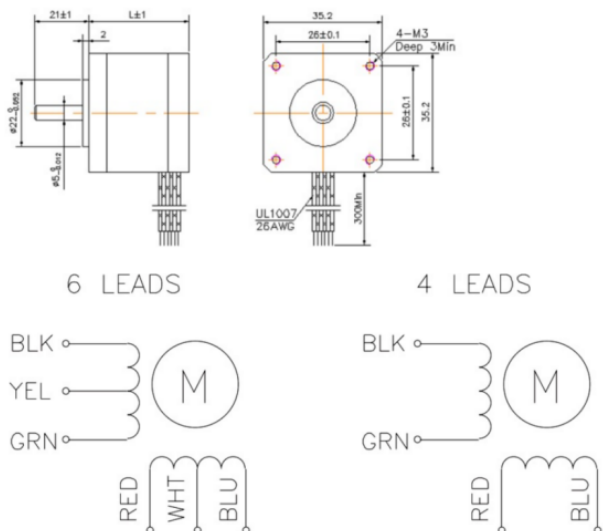


Fig. 3 – Schematic diagram of stepper motor structure

After designing the project and writing the relevant code, you need to have a detailed understanding of the state of the stepper motor when it is running, and you need to master data such as voltage and current [5].

When the stepper motor is running, it requires a change in the direction of the magnetic field, which is independent for each phase. The direction of the magnetic field can be changed in many ways. In a unipolar motor, the windings have a middle off-pole, or there are two independent windings for each phase. The direction of the magnetic field is changed by switching to half-winding or full-winding [6]. And here only two simple power switches A and B of electric drive for each stage are needed, Fig. 4.

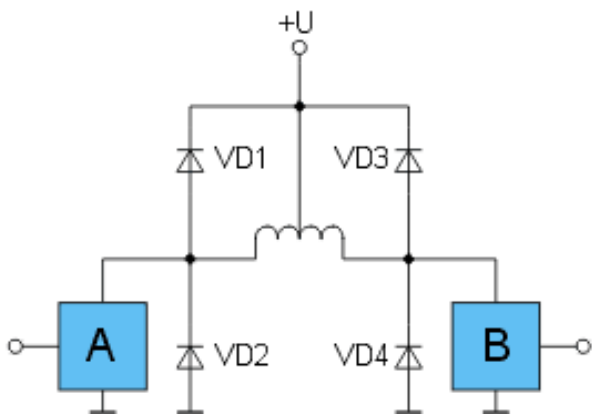


Fig. 4 – Electric drive of the unipolar motor

In a bipolar motor, the direction is changed by the output pole shift of the winding. For such an over-pole, an inverter bridge circuit is carried out for an electric drive shown in Fig. 5.

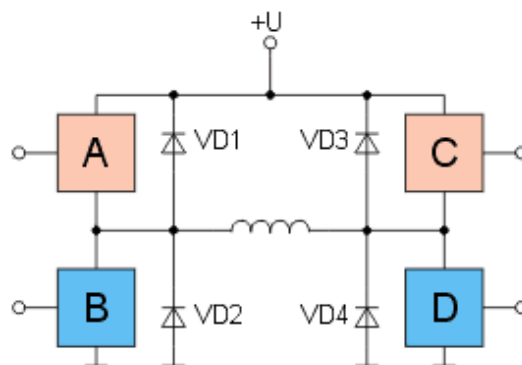


Fig. 5 – Electric drive of the bipolar motor

**Program software of the control system**

The data we use in the program are shown in the following Fig. 6.

```
import machine
import time
from machine import Pin
motor0=Pin(33,Pin.OUT)
motor1=Pin(25,Pin.OUT)
motor2=Pin(26,Pin.OUT)
motor3=Pin(27,Pin.OUT)
while True:
    motor0.value(1)
    motor1.value(0)
    motor2.value(0)
    motor3.value(0)
    time.sleep(0.1)
```

Fig. 6 – Half step program and data used

Here we use the delay function to write the code.

$$\begin{aligned}
 1.8 \div 2 &= 0.9^\circ; \\
 360 \div 0.9 &= 400 \text{ steps}; \\
 400 \times 0.1 &= 40 \text{ s},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

By calculation we can conclude that each revolution of the stepper motor takes 40 seconds.

The voltage is 3.3 volts, So we can calculate the current:

$$3.3 \div 2.7 = 1.22 \text{ A}, \tag{2}$$

So the current is 1.22 amps. Rotational angular velocity:

$$360 \div 40 = 9^\circ, \tag{3}$$

So the rotational angular velocity is 9 degrees per second.

We can change the rotation speed by adjusting the time of the delay function without changing the voltage and current [7]. Here we also can use the delay function to write the code.

$$\begin{aligned} 360 \div 1.8 &= 200 \text{ steps;} \\ 200 \times 0.5 &= 100 \text{ s,} \end{aligned} \quad (4)$$

By calculation, we can find that the time for each 360 rotation of the stepper motor is 200 seconds.

The voltage is 3.3 volts. So we can calculate the current:

$$3.3 \div 2.7 = 1.22 \text{ A,} \quad (5)$$

So the current is 1.22 amps. Rotational angular velocity:

$$360 \div 100 = 3.6^\circ, \quad (6)$$

So the rotational angular velocity is 3.6 degrees per second. We can change the rotation speed by adjusting the time of the delay function without changing the voltage and current [8].

Considering the torque problem of the stepper motor, PWM output signal whose duty ratio changes as a cosine function is designed, can make the acceleration of the stepper motor increase slowly and protect the stepper motor. The data we use in the program are shown in the following Fig. 7.

```

uPyCraft V1.1
File Edit Tools Help
├ device
├ sd
├ uPy_lib
└ workspace
├ pwm3.py
└ pwm_motor.py
1 import math
2 from machine import Pin, PWM
3 from time import sleep
4 d = math.sin(phi * math.pi) * 512 + 512
5 while True:
6 motor0 = PWM(Pin(33), 1000)
7 motor2 = PWM(Pin(26), 1000)
8 for phi in range(0, 100, 1):
9     d0 = int(math.sin(phi/200 * math.pi) * 1024)
10    d2 = int(math.sin(math.pi/2 - phi/200 * math.pi) * 1024)
11    motor0.duty(d0)
12    motor2.duty(d2)
13    print(phi)
14    sleep(0.001)
    
```

Fig. 7 – PWM program and data

In the program, the designed PWM frequency is 1000 Hz, so the period is 0.001 seconds. In this program, every time a pulse signal is given, the motor rotates a full step.

Due to the design of the PWM signal in the program, the duty cycle of the PWM changes according to the cosine function, so the delay function is used to adjust the speed. Thus, the current and voltage also change from time to time, and the cosine function also changes [9].

The number of pulse signals and the time for one rotation of the motor are required to calculate the number of pulse signals that the motor does not rotate once: period of PWM:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1000} = 0.001 \text{ s,} \quad (7)$$

So the period of PWM is 0.001 seconds.

$$360 \div 1.8 = 200 \text{ steps,} \quad (8)$$

$$200 \times (0.001 + 0.001) = 0.4 \text{ s,} \quad (9)$$

It takes 0.4 seconds for each revolution of the stepper motor [10].

After the project is designed, it needs to be tested, and the code needs to be debugged. All functions need to be done to achieve the desired effect.

Using a computer for remote control, the test results are as expected in Fig. 8.



Fig. 8 – Written control page, computer display

Using a mobile phone for remote control, the test results are as expected. It's the same as using a computer in Fig. 9.

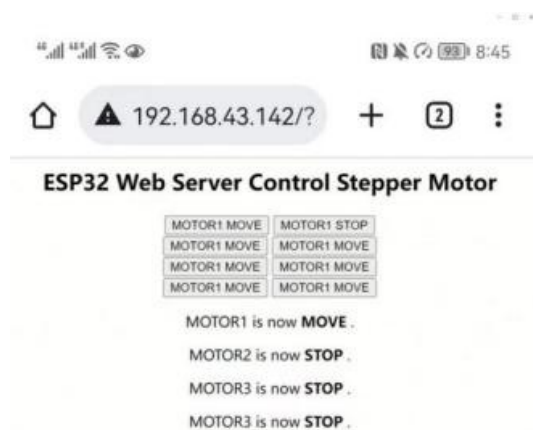


Fig. 9 – Written control page, phone display

Using the written code, download the program into esp32, and conduct debugging and testing experiments. The experimental results are good and the expected goals are achieved, Fig. 11.

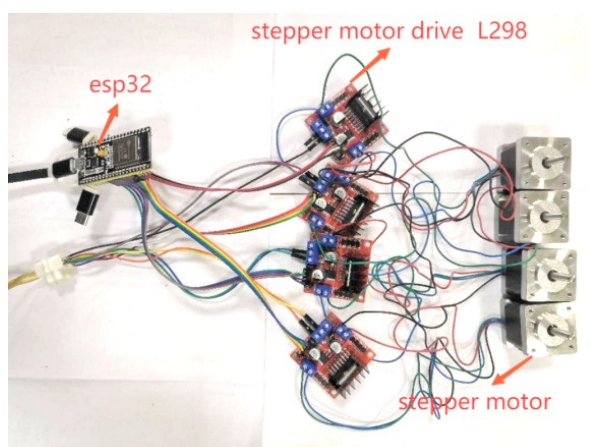


Fig. 11 – Physical test experiment

### Discussion of results

MicroPython is very convenient to use on ESP32, so it is more convenient and concise to use python to program this project. There are many control methods for stepper motors. Half-step control and full-step control. Combined with chip functions, using PWM to control stepper motors is more accurate and efficient. Design a PWM signal whose duty cycle changes according to the cosine function, which can effectively control the step. The torque problem of the incoming motor is solved, and the stepping motor is better protected [11].

In terms of control pages, HTML is used, which is concise and convenient and can display program functions well and realize good human-computer interaction functions [12].

### Conclusions

The remote-control project of multiple stepper motors based on micro Python firmware and ESP32 has been completed, realizing the real-time remote control of stepper motors, which is a convenient, fast, practical, and highly expandable advantage [13].

The chip clock system is used, the interrupt system is used, and the pulse signal whose duty cycle of PWM changes according to the cosine function is successfully designed.

### Список літератури

1. Zhang M., Li X. Design of Intelligent Classroom Control System Based on Internet of Things. *Mobile Information Systems*. 2021. № 4. P. 1–9. doi: 10.1155/2021/5438878.
2. Haowen L., Ripeng L. Design and Research of Stepper Motor Controller Based on STM32. *Journal of Physics Conference Series*. 2021. № 1. doi: 10.1088/1742-6596/2082/1/012009.
3. Blinov A., Verbytskyi I., Zinchenko D., Vinnikov, D., Galkin, I. Modular Battery Charger for Light Electric Vehicles. *Energies*. 2020. № 13, P. 774–796. doi: 10.3390/en13040774.

4. Zang, C. Q., Gao, M. Y., Liu, Y. F., He, Z. W. Study of Subdivision Stepping Motor Driver Based on the Controllable Dead-Time Compensation. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. P. 556–562. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.556-562.1294.
5. Verbytskyi I. V., Zhuikov V.J. Asynchronous motor drive interharmonics calculation based on generalized Fourier series of several variables. *Technical Electrodynamics*. 2020. № 2. P. 36–42. doi: 10.15407/techned2020.02.036.
6. Cheddadi Y., Cheddadi H., Cheddadi F., Errahimi F., Es-sbai, N. Design and implementation of an intelligent low-cost IoT solution for energy monitoring of photovoltaic stations. *SN Applied Sciences*. 2020. № 2(7). doi:10.1007/s42452-020-2997-4.
7. Wagyana A., Zulhelman, Rahmat. Development of Multi-Sensor Smart Power Outlet to Optimize Building Electrical Automation System. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. № 1364 (1). P. 012033. doi:10.1088/1742-6596/1364/1/012033
8. Gaspar G., Fabo P., Kuba M., Flochova J., Dudak, J., Florikova, Z. Development of IoT applications based on the MicroPython platform for Industry 4.0 implementation. *2020 19th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)*. 2020. doi: 10.1109/me49197.2020.9286455.
9. Stolojescu-Crisan C, Crisan C, Butunoi B-P. An IoT-Based Smart Home Automation System. *Sensors*. 2021. 21(11). P. 3784. doi: 10.3390/s21113784.
10. Linggarjati J. Design and Prototyping of Temperature Monitoring System for Hydraulic Cylinder in Heavy Equipment using ESP32 with data logging and WiFi Connectivity. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2022. № 998 (1). P. 012042. doi: 10.1088/1755-1315/998/1/012042.
11. Rey-Merchán MdC, Gómez-de-Gabriel JM, López-Arquillos A, Fernández-Madrigal JA. Virtual Fence System Based on IoT Paradigm to Prevent Occupational Accidents in the Construction Sector. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. 18 (13). P. 6839. doi: 10.3390/ijerph18136839Yang.
12. Xiaohua Zhang, Bingji Xu. Research on stepper motor control based on Single Chip and serial communication. *2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*. 2010. P. 3019-3023. doi: 10.1109/wcica.2010.5554081.
13. Venkatesan, L., Arulmozhiyal, R., Janarthanan, A. D. Simulation approach on step speed control of Induction Motor using Lab View. *2013 International Conference on Computer Communication and Informatics*. 2013. P. 1-6. doi:10.1109/iccci.2013.6466283.

### References (transliterated)

1. Zhang M., Li X. Design of Intelligent Classroom Control System Based on Internet of Things. *Mobile Information Systems*, 2021, 4, pp. 1–9, doi: 10.1155/2021/5438878.
2. Haowen L., Ripeng L. Design and Research of Stepper Motor Controller Based on STM32. *Journal of Physics Conference Series*, 2021, 1, doi: 10.1088/1742-6596/2082/1/012009.
3. Blinov A., Verbytskyi I., Zinchenko D., Vinnikov, D., Galkin, I. Modular Battery Charger for Light Electric Vehicles. *Energies*, 2020, 13, pp. 774–796, doi: 10.3390/en13040774.
4. Zang, C. Q., Gao, M. Y., Liu, Y. F., He, Z. W. Study of Subdivision Stepping Motor Driver Based on the

- Controllable Dead-Time Compensation. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, pp. 556–562, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.556-562.1294.
5. Verbitskiy I. V., Zhuikov V.J. Asynchronous motor drive interharmonics calculation based on generalized Fourier series of several variables. *Technical Electrodynamics*, 2020, 2, pp. 36–42, doi: 10.15407/techned2020.02.036.
  6. Cheddadi Y., Cheddadi H., Cheddadi F., Errahimi F., Es-sbai, N. Design and implementation of an intelligent low-cost IoT solution for energy monitoring of photovoltaic stations. *SN Applied Sciences*, 2020, 2(7), doi: 10.1007/s42452-020-2997-4.
  7. Wagyan A., Zulhelman, Rahmat. Development of Multi-Sensor Smart Power Outlet to Optimize Building Electrical Automation System. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1364 (1), pp. 012033, doi: 10.1088/1742-6596/1364/1/012033.
  8. Gaspar G., Fabo P., Kuba M., Flochova J., Dudak, J., Florkova, Z. Development of IoT applications based on the MicroPython platform for Industry 4.0 implementation. *2020 19th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)*, 2020, doi: 10.1109/me49197.2020.9286455.
  9. Stolojescu-Crisan C, Crisan C, Butunoi B-pp. An IoT-Based Smart Home Automation System. *Sensors*, 2021, 21(11), pp. 3784, doi: 10.3390/s21113784.
  10. Linggarjati J. Design and Prototyping of Temperature Monitoring System for Hydraulic Cylinder in Heavy Equipment using ESP32 with data logging and WiFi Connectivity. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2022, № 998 (1), pp. 012042, doi: 10.1088/1755-1315/998/1/012042.
  11. Rey-Merchán MdC, Gómez-de-Gabriel JM, López-Arquillos A, Fernández-Madrigal JA. Virtual Fence System Based on IoT Paradigm to Prevent Occupational Accidents in the Construction Sector. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18 (13), pp. 6839, doi: 10.3390/ijerph18136839Yang.
  12. Xiaohua Zhang, Bingji Xu. Research on stepper motor control based on Single Chip and serial communication. *2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2010, pp. 3019-3023, doi: 10.1109/wcica.2010.5554081.
  13. Venkatesan, L., Arulmozhiyal, R., Janarthanan, A. D. Simulation approach on step speed control of Induction Motor using Lab View. *2013 International Conference on Computer Communication and Informatics*, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/iccci.2013.6466283.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Cheng Xuan** – student, The department of Electronic Devices and Systems, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6235-7089; e-mail: xuanc274@gmail.com.

**Чен Сюань** – студент кафедри електронних пристроїв та систем, факультет електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-6235-7089; e-mail: xuanc274@gmail.com.

**Ievgen Verbitskiy** – Doctor of Science, Docent, Department of Electronic Devices and Systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7275-5152; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

**Вербицький Євген Володимирович** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри електронних пристроїв та систем, факультет електроніки, м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-7275-5152; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

*Please cite this article as:*

Xuan C., Verbitskiy I. Remote control system of stepper motor based on the ESP32 developer board. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2(12), pp. 48–53, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.07.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Сюань Ч., Вербицький Є. В. Система дистанційного керування кроковим двигуном на базі плати розробника ESP32. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 48-53. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.07.

*Received 24.05.2022*

УДК 004

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.08

## РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ БІБЛІОГРАФІЧНОЇ СИСТЕМИ

С. О. ЦИБУЛЬНИК\*, Д. С. БІДНИК, Д. О. ПІВТОРАК

кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА

\*e-mail: tsybulnik.s.a@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** В Україні більшість наукових установ і закладів вищої освіти фінансуються державою. Майже всі наукові дослідження проводяться переважно в державному секторі, тоді як приватні університети та компанії зазвичай не проводять жодних досліджень самостійно. Державні заклади вищої освіти фінансуються за кошти державного бюджету, і брак коштів є одним з основних факторів, які заважають впроваджувати нові інформаційні технології та системи в повсякденну рутину. Аналіз наукових досягнень з використанням бібліографічної інформації став значною частиною науково-технічного менеджменту в багатьох країнах світу, але на відміну від Словенії та Польщі, Україна не має єдиної бібліографічної бази даних та відповідних пошукових інтерфейсів. Тому запропоновано розробити автоматизовану бібліографічну систему, що спростить процеси створення, редагування, пошуку, сортування, статистики, видалення бібліографічної інформації науково-педагогічного працівника та дасть змогу автоматизувати формування персоналізованих звітів. Для реалізації запропонованої автоматизованої системи проведено огляд існуючих баз бібліографічної інформації та пошукових інтерфейсів. Зроблено висновок, що вони не можуть забезпечити науковців України необхідними функціональними можливостями для формування бібліографічних описів власних наукових робіт. Для проектування архітектури мобільного додатку на базі операційної системи Android обрано клас багаторівневої архітектури та шаблон MVVM. Спроектовано архітектуру, яка містить три рівні та п'ять шарів, на яких розміщуються окремі підсистеми. Для тестування додатку на різних розмірах екранів, а також на різних версіях програмного інтерфейсу був використаний емулятор Pixel та смартфон Xiaomi Redmi 5 Plus. Реалізовано оформлення введених даних за двома стандартами, а саме: ДСТУ 8302-2015 та IEEE. Реалізовано алгоритми пошуку та сортування записів за необхідними критеріями. Реалізовано збереження списку усіх необхідних бібліографічних описів у текстовому форматі. Додатково реалізовано можливість його відправки на електронну пошту. У подальшому планується розширити список стандартів оформлення бібліографічної інформації та удосконалити алгоритми пошуку і сортування.

**Ключові слова:** бібліографічна база даних; Android; Java; програмна архітектура; програмне забезпечення; MVVM

## DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED BIBLIOGRAPHIC SYSTEM

S. TSYBULNYK, D. BIDNYK, D. PIVTORAK

Department of Computer-Integrated Optical and Navigation Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Most research and higher education institutions of Ukraine are funded by the state. Almost all research is conducted mainly in the public sector, while private universities and companies usually do not conduct any research. Public higher education institutions are financed from the state budget and lack of funds is one of the main factors hindering the introduction of new information technologies and systems into the daily routine. Analysis of scientific achievements using bibliographic information has become a significant part of scientific and technical management in many countries around the world, but unlike Slovenia and Poland, Ukraine does not have a single bibliographic database and relevant search interfaces. Therefore, the aim of the work is to develop an automated bibliographic system that will simplify the process of creating, editing, searching, sorting, statistics, deleting bibliographic information of research and teaching staff and will automate the formation of personalized reports. To implement the proposed automated system, a review of existing databases of bibliographic information and search interfaces was conducted. It is concluded that they cannot provide Ukrainian scientists with the necessary functionality to form bibliographic descriptions of their own research papers. To design the architecture of a mobile application based on the Android operating system, a multi-level architecture class and an MVVM template were selected. Designed architecture contains three levels and five layers on which separate subsystems are located. The Pixel emulator and Xiaomi Redmi 5 Plus smartphone were used to test the application on different screen sizes, as well as on different versions of the software interface. The application was developed in the AndroidStudio software environment. The design of the entered data according to two standards was implemented, namely: DSTU 8302-2015 and IEEE. Algorithms for searching and sorting records according to the necessary criteria are implemented. Saving the list of all necessary bibliographic descriptions in text format is implemented. Additionally, the possibility of sending it to e-mail is implemented. In the future it is planned to expand the list of standards for bibliographic information and improve search and sorting algorithms.

**Keywords:** bibliographic database; Android; Java; software architecture; software; MVVM

## Вступ

Важливим інструментом для розвитку будь-якого професіонала, особливо для тих, хто працює у

галузі освіти та науки, є інформація, тобто пов'язані між собою концептуально дані або відомості, які можуть при їх використанні змінювати уявлення про об'єкти чи явища. Вдале застосування актуальної

інформації дозволяє просуватися не лише в академічній та науковій сферах, але й у повсякденному житті. Проте на сьогоднішній день є доступним величезний обсяг інформації, що проявляється у наявності сотень тисяч фахових підручників та мільйонів статей у періодичній літературі. Саме тому розроблено велику кількість автоматизованих (або автоматичних) інформаційних систем, які дозволяють зберігати, оброблювати та систематизувати подібну інформацію.

Проте навіть автоматизовані системи не позбавлені недоліків. Вони також, як і люди, можуть використовувати абстрактну, штучну і помилкову інформацію, яка часто не має об'єктивного чи адекватного відображення ні в природі, ні в суспільстві. Тому визначальним фактором у дослідженні шляхів вирішення будь-якої проблеми, безсумнівно, є розроблення відповідної стратегії отримання адекватної інформації.

Ще в 1960-х роках була заснована концепція універсального бібліографічного контролю [1], яка використовувала узгоджені на міжнародному рівні принципи каталогізації. Універсальний підхід до формування бібліографічної інформації є одним з основних методів забезпечення адекватного пошуку наукових даних у всьому світі.

В ідеалі, бібліографічна інформація має бути універсальною, загальнодоступною та містити основні бібліографічні дані про всі видання у всіх країнах [2], але на практиці цього досягти досі не вдалося. Для проведення оптимального бібліографічного пошуку важливо розуміти різні етапи, які в нього входять, знати, як реалізувати вдалу стратегію пошуку, мати уявлення про доступні бази даних, а також вміти користуватися бібліографічними менеджерами.

Бібліографічний пошук – це серія дій, спрямованих на пошук документів, які стосуються певної теми та покликані оптимізувати стан знань, які сприймаються як неповні або не відповідають певним вимогам [3]. Бібліографічний пошук є початковою фазою будь-якої наукової роботи та спрямований на збір достатньої кількості інформації щодо актуальності задачі, яка вирішується. Зазвичай це неструктурований процес, який містить також і певний рівень стохастичності. Неструктурований бібліографічний пошук легко може стати трудомістким і нескінченним процесом.

У зв'язку з постійно зростаючим обсягом наукової літератури підвищення ефективності пошуку бібліографічних даних стало актуальним завданням. Тому, щоб максимізувати ефективність результату бібліографічного пошуку при обмежених часі та ресурсах, науковці розробляють нові підходи до його проведення, які включають в себе наступні: формування стратегій пошуку [3,4]; виявлення та структурування інформації за рахунок формування її функціональних ознак [5]; нейронні мережі [6];

технології семантичних та пов'язаних даних [7]; графі [8-10], тощо.

Загалом, пошук здійснюється у певній бібліографічній базі даних, яка містить посилання на опубліковану літературу та може включати багато різних статей, книг, законів, тощо [3]. Інформація, яка міститься у таких базах даних, структурована та впорядкована в записи та поля, індексована дескрипторами та може включати посилання на повний текст. На сьогодні існує велика кількість бібліографічних баз даних, а також розробляються нові для задоволення вимог певних галузей науки (наприклад, [11-15]).

Проте, як показує практика [16], пошук навіть у декількох базах даних з використанням пошукових інтерфейсів не забезпечує повного і якісного результату. Бібліографічний менеджер (пошукова система, пошуковий інтерфейс) – це програмне забезпечення, яке керує пошуком бібліографічної інформації у відповідних базах даних [3,17,18].

В Україні, як і в Польщі [19], більшість наукових установ і закладів вищої освіти фінансуються державою. Майже всі наукові дослідження проводяться переважно в державному секторі, тоді як приватні університети та компанії зазвичай не проводять жодних досліджень самостійно. Державні заклади вищої освіти фінансуються за кошти державного бюджету, і брак коштів є одним з основних факторів, які заважають впроваджувати нові інформаційні технології та системи в повсякденну рутину.

На сьогодні інформаційні системи добре охоплюють лише найважливіші сфери діяльності університету, наприклад, управління персоналом, документообігом або оцінювання студентів. Зазвичай ці рішення навіть в рамках одного університету надаються різними компаніями або розробляються власними силами, що дуже сильно впливає на кінцеву якість такого програмного забезпечення. При цьому, як правило, ігноруються або відводяться на задній план потреби науково-педагогічного персоналу в запровадженні автоматизованої системи для збереження, сортування та надання персональної бібліографічної інформації.

Аналіз наукових досягнень з використанням бібліографічної інформації став значною частиною науково-технічного менеджменту в багатьох країнах світу. Наприклад, бібліографічна інформація дослідників у Словенії [20] на національному рівні включає оцінку бібліографічних показників наукової діяльності дослідників, дослідницьких груп, проектів, програм та організацій. На відміну від Словенії та Польщі [19,20], Україна не має єдиної бібліографічної бази даних та відповідних пошукових інтерфейсів. Саме тому щороку тисячі викладачів в Україні змушені оформлювати у відповідності до певного стандарту перелік своїх наукових праць у вигляді набору бібліографічних описів для: проходження конкурсу на заміщення посади; захисту дисертації

кандидата або доктора наук; участі в різноманітних конкурсах та наукових роботах чи проектах (зокрема державних); отримання наукового звання; формування щорічних звітів структурних підрозділів з науки; тощо [2]. Формування такого списку відбувається, як правило, в ручному режимі і потребує багато часу на обробку та аналіз бібліографічної інформації, оскільки для різних потреб наповнення списку наукових праць буде відрізняться: статті у періодичних виданнях за останні 5 років; усі публікації за весь період діяльності; тільки документи, які підтверджують наявність авторських прав; тощо. Кількість різноманітних звітів за персональними науковими показниками може коливатися від одного до 7-8 за рік, що призводить до значних витрат часу.

Враховуючи усі названі вище недоліки, пропонується розробити автоматизовану бібліографічну систему, яка спростить процеси створення, редагування, пошуку, сортування, статистики, видалення (та інші) бібліографічної інформації (бібліографічних описів) науково-педагогічного працівника та дасть змогу автоматизувати формування персоналізованих звітів.

### Мета роботи

Метою роботи є розроблення автоматизованої бібліографічної системи у вигляді мобільного додатку на базі операційної системи Android для збереження та організації персональних бібліографічних показників.

### Архітектура системи

З моменту свого утворення область комп'ютерних наук зіткнулася з проблемами, що були пов'язані зі складністю програмних систем. Раніше ці проблеми вирішувалися безпосередньо розробниками шляхом правильного вибору структур даних, алгоритмів та розмежування повноважень. Сьогодні ж зниження складності системи досягається за рахунок проектування якісної програмної архітектури. Під програмною архітектурою мається на увазі структура системи, принципи взаємодії її компонентів, а також аналіз і реалізація її властивостей.

Архітектура програмного забезпечення має декілька загальних класів, які є аналогічними різним типам креслень в будівництві споруд. Наприклад, клас багаторівневої (шаруватої, багат шарової) архітектури програмного забезпечення сьогодні є найбільш часто використовуваним. Метою шаруватої архітектури є організація окремих компонентів в горизонтальні логічні шари та фізичні рівні.

У закритій багаторівневій архітектурі шар може викликати лише шар, який знаходиться безпосередньо під ним. На рис. 1 наведено діаграму закритої багаторівневої архітектури.

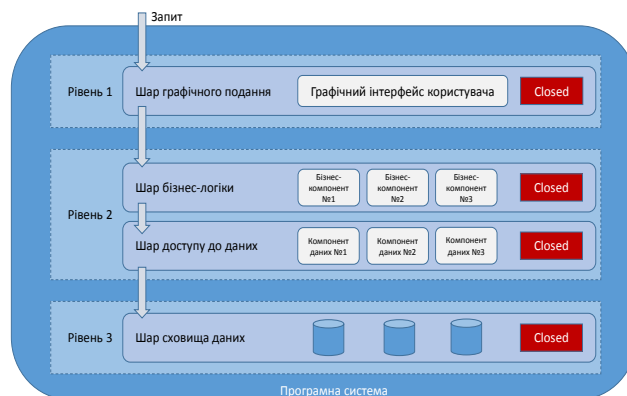


Рис. 1 – Приклад закритої багаторівневої архітектури

На наведеній діаграмі кожен шар позначений як закритий. Це означає, що для того, щоб запит пройшов до самого нижнього шару, він має пройти послідовно через кожен шар. Наприклад, коли запит ініціюється через рівень графічного подання, він спочатку буде проходити через рівень бізнес-логіки, потім через шар доступу до даних і, нарешті, дійде до шару сховища даних.

Метою закритої багаторівневої архітектури є забезпечення повної ізоляції шарів один від одного. Це дасть змогу стверджувати, що внесені в один шар архітектури зміни, не впливатимуть на інші шари, тобто реалізується принцип низького зчеплення.

Для реалізації даного класу архітектури було обрано архітектурну модель (шаблон) MVVM [2]. MVVM (Model-View-ViewModel) є однією з можливих реалізацій моделі абстрактної машини. Використання даного шаблону полягає у відокремленні логіки додатку від його візуальної частини та поділу програмної системи на три рівні (рис. 2): модель (Model), модель подання (ViewModel) і уявлення або вигляд (View).

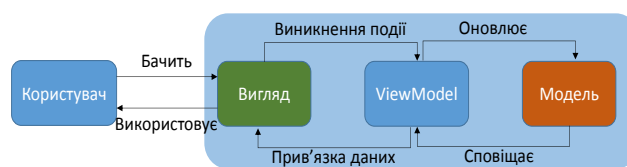


Рис. 2 – Шаблон MVVM

Серед переваг шаблону MVVM можна виокремити наступні:

- низьке зчеплення між ViewModel і View;
- забезпечує найкращу сумісність з керованим тестами розробленням програмного забезпечення.

Його недоліки:

- має великий розмір коду;



- кожен елемент інтерфейсу користувача потребує компоненти, які будуть викликати події.

На основі закритої багаторівневої архітектури та шаблону MVVM було спроектовано архітектуру автоматизованої бібліографічної системи (рис. 3). Дана архітектура містить три рівні та п'ять шарів, які включають одну чи більше підсистем кожен. У порівнянні з класичним уявленням багаторівневої архітектури (рис. 1) у даному випадку додано четвертий шар – шар програмної логіки, який знаходиться на третьому рівні і містить підсистеми обробки даних та транспортування. За своєю логікою дані підсистеми являються низькорівневими та не можуть бути включеними до шару з реалізацією бізнес-правил, тому вони розміщені саме в рівні моделі.

Кожна підсистема, яка присутня в спроектованій архітектурі, у свою чергу, поділяється на окремі модулі, а саме [2]:

- підсистема користувача: новий користувач, існуючий користувач;
- підсистема формування правил: уведення даних, редагування даних, видалення даних;
- підсистема формування даних для виведення: виведення помилок, формування звітів, виведення персональних даних;
- підсистема обробки даних: пошук, сортування;
- підсистема транспортування: відправка на відображення, відправка на e-mail, збереження на внутрішньому накопичувачі.

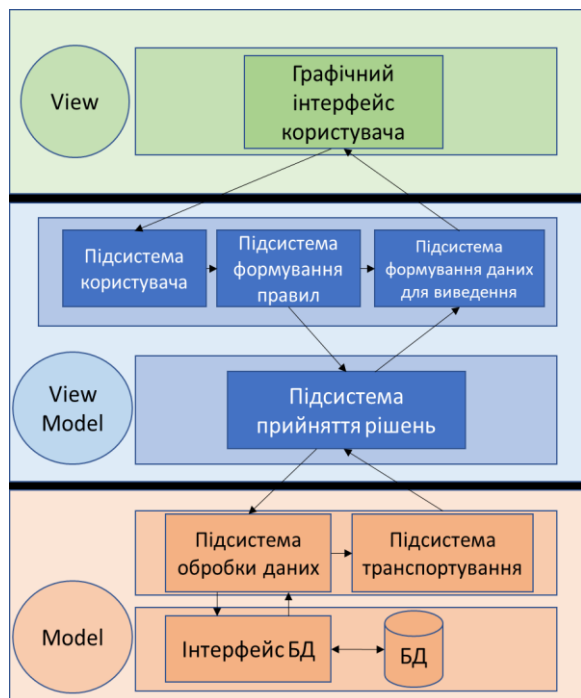


Рис. 3 – Архітектура автоматизованої бібліографічної системи

Реалізація даних підсистем дасть змогу забезпечити автоматизовану бібліографічну систему основними функціональними можливостями, необхідними для збереження персональних бібліографічних описів науково-педагогічного працівника та формування звітів з можливістю їх відправки на електронну пошту.

### Результати розроблення

Після установки та налаштування Android Studio, можна також побачити, що автоматично встановилася система автоматизованої збірки додатків Gradle, яка (у відповідності до [2]) буде використовуватися в подальшому. Для початку роботи було завантажено деякі додаткові бібліотеки, а саме:

- recyclerview – оптимізує роботу зі списками, що підвищує продуктивність;
- cardview – слугує контейнером для компонентів та дозволяє змінювати елементи оболонки;
- room – спрощує роботу з базою даних SQLite;
- livedata – сховище даних, яке працює за принципом шаблону «Спостерігач». Ця бібліотека дає змогу розміщувати об'єкт у сховищі та отримувати інформацію про статус цього об'єкту.

Для демонстрації роботи додатку можна використовувати вбудований емулятор смартфона або фізичний пристрій (смартфон), який працює на операційній системі Android. Для тестування розроблюваного додатку на різних розмірах екранів, а також на різних версіях програмного інтерфейсу був використаний емулятор Pixel та смартфон Xiaomi Redmi 5 Plus.

Створення графічних компонентів додатку відбувається за допомогою використання мови розмітки XML. Усі графічні елементи розміщуються в ресурсах самого проекту, що дає можливість відокремити графічну частину від програмної логіки. Це призводить до простоти написання та тестування коду.

Для того, щоб використовувати елементи інтерфейсу в Java-коді, їм назначаються відповідні унікальні ідентифікатори в XML файлі. Елементи інтерфейсу є звичайними Java-класами і, якщо інтерфейс цього потребує, їх можна створювати не за допомогою маніпуляцій з графічними елементами, а програмно.

Додаток на основі операційної системи Android складається з набору активностей (Activity), кожна з яких відповідає окремому графічному вікну додатка. З їх допомогою користувач може взаємодіяти з графічним інтерфейсом. Життєвий цикл кожної активності являє собою сукупність станів, через які проходить кожна активність під час своєї роботи.

Враховуючи той факт, що додаток реалізовано з використанням архітектурного шаблону MVVM, усі створені активності не містять в собі програмної або бізнес-логіки, а слугують лише для відображення певної інформації та переходу між графічними вікнами. Ці класи розміщено в папці View, яка містить активності та графічні елементи, які пов'язані з графічним інтерфейсом користувача.

Вся програмна логіка розташована в папці Model і відокремлена від графічної складової додатку. Model містить всі моделі бібліографічних описів різних типів, базу даних на основі цих моделей, а також класи які оброблюють ці дані.

За операції введення, виведення даних та бізнес-логіку відповідає група класів, які знаходяться в папці ViewModel. Дані класи використовують функції бібліотеки lifecycle і «пов'язують» графічний інтерфейс з програмною логікою. Це потрібно для того, щоб дані автоматично оновлювалися при кожній їх зміні та відображалися без затримок чи втрат.

На даному етапі процесу розроблення реалізовано оформлення введених даних за двома стандартами, а саме: ДСТУ 8302-2015 та IEEE. Після проведення пошуку та сортування записів за необхідними критеріями список усіх необхідних бібліографічних описів зберігається у текстовому форматі. Також за бажанням його можна відправити на електронну пошту. Усі записи у збереженому списку в залежності від обраного стандарту мають вигляд (наприклад, для тез доповідей) або «G. R. Faulhaber, «Design of service systems with priority reservation,» in *Conf. Rec. 1995 IEEE Int. Conf. Communications*, pp. 3–8.», або «Святецька А. В. Діалектизи у повісті М. Коцюбинського «Тіні забутих предків»: семантико-стилістичний аспект. *Стратегії розвитку та пріоритетні завдання філологічних наук*: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 19—20 жовт. 2018 р. / Класич. приват. ун-т. Запоріжжя, 2018. С. 19-23».

Приклади активностей створення бібліографічного запису наведено на рис. 4. У разі необхідності список наявних активностей можна розширити для забезпечення вимог інших стандартів оформлення бібліографічних описів.

У подальшому планується розширити список стандартів оформлення бібліографічної інформації та удосконалити алгоритми пошуку і сортування.

## Висновки

Аналіз наукових досягнень наукових та науково-педагогічних працівників є одним з основних факторів оцінювання їх професійної діяльності в багатьох країнах світу. На відміну від, наприклад, Польщі та Словенії Україна не має єдиної бібліографічної бази даних та відповідних пошукових інтерфейсів, щоб забезпечити менеджмент власних бібліографічних описів.

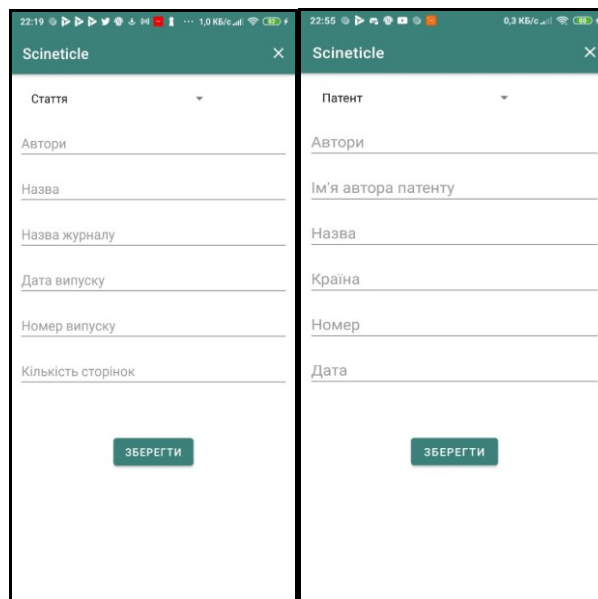


Рис. 4 – Приклади активностей створення бібліографічного опису

Саме тому на базі операційної системи Android у середовищі розроблення AndroidStudio створено автоматизовану бібліографічну систему. Її архітектуру спроектовано як багаторівневу на основі шаблону MVVM. Розроблено алгоритми бізнес-логіки, які дозволяють вносити в систему бібліографічні описи за двома стандартами, а саме: ДСТУ 8302-2015 та IEEE. Реалізовано алгоритми пошуку та сортування записів, а також формування та збереження списку за необхідними критеріями.

У подальшому планується розширити перелік доступних для оформлення стандартів, а також удосконалити алгоритми пошуку та сортування для забезпечення належного рівня якості.

## Список літератури

1. Willer M., Dunsire G. *Bibliographic Information Organization in the Semantic Web*. Chandos Publishing, 2013. 318 p. doi: 10.1016/B978-1-84334-731-6.50001-6.
2. Цибульник С. О., Бідник Д. С. Проектування архітектури автоматизованої бібліографічної системи. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. № 2 (8). С. 83–89. doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.12.
3. Campos-Asensio C. How to develop a bibliographic search strategy. *Enfermería Intensiva (English ed.)*. 2018. Vol. 29, Iss. 4. P. 182–186. doi: 10.1016/j.enfie.2018.09.001.
4. Fernández-Ananín S., Rodríguez J., Soler E. Then, how do I document the idea? Bibliographic search engines. *Cirugía Española (English Edition)*. 2022. doi: 10.1016/j.cireng.2022.04.020.
5. Fayemi P.-E., Duci S., Fayolle T., Maranzana N., Bersano G. Ideality & Bio-Inspired Based Collaborative

- Bibliographic Search Method. *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 39. P. 138–143. doi: 10.1016/j.procir.2016.01.179.
6. Yun J. Generalization of bibliographic coupling and co-citation using the node split network. *Journal of Informetrics*. 2022. Vol. 16. Iss. 2. doi: 10.1016/j.joi.2022.101291.
7. Rico M., Vila-Suero D., Botezan I., Gómez-Pérez A. Evaluating the impact of semantic technologies on bibliographic systems: A user-centred and comparative approach. *Journal of Web Semantics*. 2019. Vol. 59. doi: 10.1016/j.websem.2019.03.001.
8. Lee O-J., Jeon H.-J., Jung J. Learning multi-resolution representations of research patterns in bibliographic networks. *Journal of Informetrics*. 2021. Vol. 15. Iss. 1. doi: 10.1016/j.joi.2020.101126.
9. Zhu Y., Yan E. Searching bibliographic data using graphs: A visual graph query interface. *Journal of Informetrics*. 2016. Vol. 10. Iss. 4. P. 1092–1107. doi: 10.1016/j.joi.2016.09.005.
10. Zhu Y., Yan E., Song I.-Y. A natural language interface to a graph-based bibliographic information retrieval system. *Data & Knowledge Engineering*. 2017. Vol. 111. P. 73–89. doi: 10.1016/j.datak.2017.06.006.
11. Sile L. Entanglement of bibliographic database content and data collection practices: Rethinking data integration using findings from a European study. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 146. P. 201–207. doi: 10.1016/j.procs.2019.01.094.
12. Howell Ryan, Petersen S., Balzotti C., Rogers P., Jackson M., Hedrich A. Using WebGIS to Develop a Spatial Bibliography for Organizing, Mapping, and Disseminating Research Information: A Case Study of Quaking Aspen. *Rangelands*. 2019. Vol. 41. Iss. 6. P. 244–247. doi: 10.1016/j.rala.2019.10.001.
13. Nikita E., Mardini M., Mardini M., Tsimopoulou Ch., Karligkioti A. Bi(bli)oArch: An open-access bibliographic database for human bioarchaeological studies in the Eastern Mediterranean and Middle East. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2021. Vol. 39. doi: 10.1016/j.jasrep.2021.103151.
14. Batagelj V., Maltseva D. Temporal bibliographic networks. *Journal of Informetrics*. 2020. Vol. 14. Iss. 1. doi: 10.1016/j.joi.2020.101006.
15. Kastrin A., Hristovski D. Disentangling the evolution of MEDLINE bibliographic database: A complex network perspective. *Journal of Biomedical Informatics*. 2019. Vol. 89. P. 101–113. doi: 10.1016/j.jbi.2018.11.014.
16. Frandsen T., Gildberg F., Tingleff E. Searching for qualitative health research required several databases and alternative search strategies: a study of coverage in bibliographic databases. *Journal of Clinical Epidemiology*. 2019. Vol. 114. P. 118–124. doi: 10.1016/j.jclinepi.2019.06.013.
17. Cuschieri S., Grech V., Calleja N. WASP (Write a Scientific Paper): The use of bibliographic management software. *Early Human Development*. 2019. Vol. 128. P. 118–119. doi: 10.1016/j.earlhumdev.2018.09.012.
18. Stec E. Maintaining Nursing Knowledge Using Bibliographic Management Software. *Perioperative Nursing Clinics*. 2012. Vol. 7. Iss. 2. P. 195–200. doi: 10.1016/j.cpen.2012.02.004.
19. Nowiński A. Current Bibliography Research Information Systems in Poland. *Procedia Computer Science*. 2014. Vol. 33. P. 174–178. doi: 10.1016/j.procs.2014.06.029.
20. Curk L. Implementation of the Evaluation of Researchers' Bibliographies in Slovenia. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 146. P. 72–83. doi: 10.1016/j.procs.2019.01.082.

#### References (transliterated)

1. Willer M., Dunsire G. *Bibliographic Information Organization in the Semantic Web*. Chandos Publishing, 2013, 318 p., doi: 10.1016/B978-1-84334-731-6.50001-6.
2. Tsybulnyk S., Bidnyk D. Designing the architecture of an automated bibliographic system. *Bulletin of the National Technical University „KhPI”. Series: New solutions in modern technology*. Kharkiv: NTU „KhPI”, 2021, no. 2 (8), pp. 83–89, doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.12.
3. Campos-Asensio C. How to develop a bibliographic search strategy. *Enfermería Intensiva (English ed.)*, 2018, Vol. 29, Iss. 4, pp. 182–186, doi: 10.1016/j.enfie.2018.09.001.
4. Fernández-Ananín S., Rodríguez J., Soler E. Then, how do I document the idea? Bibliographic search engines. *Cirugía Española (English Edition)*, 2022, doi: 10.1016/j.cireng.2022.04.020.
5. Fayemi P.-E., Duci S., Fayolle T., Maranzana N., Bersano G. Ideality & Bio-Inspired Based Collaborative Bibliographic Search Method. *Procedia CIRP*, 2016, Vol. 39, pp. 138–143, doi: 10.1016/j.procir.2016.01.179.
6. Yun J. Generalization of bibliographic coupling and co-citation using the node split network. *Journal of Informetrics*, 2022, Vol. 16, Iss. 2, doi: 10.1016/j.joi.2022.101291.
7. Rico M., Vila-Suero D., Botezan I., Gómez-Pérez A. Evaluating the impact of semantic technologies on bibliographic systems: A user-centred and comparative approach. *Journal of Web Semantics*, 2019, Vol. 59, doi: 10.1016/j.websem.2019.03.001.
8. Lee O-J., Jeon H.-J., Jung J. Learning multi-resolution representations of research patterns in bibliographic networks. *Journal of Informetrics*, 2021, Vol. 15, Issue 1, doi: 10.1016/j.joi.2020.101126.
9. Zhu Y., Yan E. Searching bibliographic data using graphs: A visual graph query interface. *Journal of Informetrics*, 2016, Vol. 10, Iss. 4, pp. 1092–1107, doi: 10.1016/j.joi.2016.09.005.
10. Zhu Y., Yan E., Song I.-Y. A natural language interface to a graph-based bibliographic information retrieval system. *Data & Knowledge Engineering*, 2017, Vol. 111, pp. 73–89, doi: 10.1016/j.datak.2017.06.006.
11. Sile L. Entanglement of bibliographic database content and data collection practices: Rethinking data integration using findings from a European study. *Procedia Computer Science*, 2019, Vol. 146, pp. 201–207, doi: 10.1016/j.procs.2019.01.094.
12. Howell Ryan, Petersen S., Balzotti C., Rogers P., Jackson M., Hedrich A. Using WebGIS to Develop a Spatial Bibliography for Organizing, Mapping, and Disseminating Research Information: A Case Study of Quaking Aspen. *Rangelands*, 2019, Vol. 41, Iss. 6, pp. 244–247, doi: 10.1016/j.rala.2019.10.001.
13. Nikita E., Mardini M., Mardini M., Tsimopoulou Ch., Karligkioti A. Bi(bli)oArch: An open-access bibliographic database for human bioarchaeological studies in the Eastern Mediterranean and Middle East. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2021, Vol. 39, doi: 10.1016/j.jasrep.2021.103151.

14. Batagelj V., Maltseva D. Temporal bibliographic networks. *Journal of Informetrics*, 2020, Vol. 14, Iss. 1, doi: 10.1016/j.joi.2020.101006.
15. Kastrin A., Hristovski D. Disentangling the evolution of MEDLINE bibliographic database: A complex network perspective. *Journal of Biomedical Informatics*, 2019, Vol. 89, pp. 101–113, doi: 10.1016/j.jbi.2018.11.014.
16. Frandsen T., Gildberg F., Tingleff E. Searching for qualitative health research required several databases and alternative search strategies: a study of coverage in bibliographic databases. *Journal of Clinical Epidemiology*, 2019, Vol. 114, pp. 118–124, doi: 10.1016/j.jclinepi.2019.06.013.
17. Cuschieri S., Grech V., Calleja N. WASP (Write a Scientific Paper): The use of bibliographic management software. *Early Human Development*, 2019, Vol. 128, pp. 118–119, doi: 10.1016/j.earlhumdev.2018.09.012.
18. Stec E. Maintaining Nursing Knowledge Using Bibliographic Management Software. *Perioperative Nursing Clinics*, 2012, Vol. 7, Iss. 2, pp. 195–200, doi: 10.1016/j.cpen.2012.02.004.
19. Nowiński A. Current Bibliography Research Information Systems in Poland. *Procedia Computer Science*, 2014, Vol. 33, pp. 174–178, doi: 10.1016/j.procs.2014.06.029.
20. Curk L. Implementation of the Evaluation of Researchers' Bibliographies in Slovenia. *Procedia Computer Science*, 2019, Vol. 146, pp. 72–83, doi: 10.1016/j.procs.2019.01.082.

### Відомості про авторів (About authors)

**Цибульник Сергій Олексійович** – кандидат технічних наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-4462-0936; e-mail: tsybulnik.s.a@gmail.com.

**Tsybulnyk Serhii** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Computer-Integrated Optical and Navigation Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4462-0936; e-mail: tsybulnik.s.a@gmail.com.

**Бідник Данило Сергійович** – студент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем; м. Київ, Україна.

**Bidnyk Danylo** – student, Department of Computer-Integrated Optical and Navigation Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine.

**Півторак Діана Олександрівна** – кандидат технічних наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-3708-5610; e-mail: tsybulnik.s.a@gmail.com.

**Pivtorak Diana** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Computer-Integrated Optical and Navigation Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3708-5610; e-mail: tsybulnik.s.a@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

Цибульник С. О., Бідник Д. С., Півторак Д. О. Розроблення автоматизованої бібліографічної системи. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 54–60. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.08.

*Please cite this article as:*

Tsybulnyk S., Bidnyk D., Pivtorak D. Development of an automated bibliographic system. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2(12), pp. 54–60, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.08.

*Надійшла (received) 23.05.2022*

УДК 004.925.8:519.876.5:699.83

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.09

## МОДЕЛЮВАННЯ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ В РАЙОНІ УКРАЇНСЬКОЇ АНТАРКТИЧНОЇ СТАНЦІЇ

С. О. ЦИБУЛЬНИК<sup>1\*</sup>, В. В. НАКОРИК<sup>2</sup>, С. С. РУПІЧ<sup>2</sup>, Д. О. ПІВТОРАК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>кафедра приладів і систем орієнтації і навігації, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА

<sup>2</sup>кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА

\*e-mail: tsybulnik.s.a@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Місце розташування української антарктичної станції Академік Вернадський призводить до виникнення низки проблем, пов'язаних з необхідністю забезпечення життєдіяльності та безпеки людей. Інфраструктура станції Академік Вернадський протягом року зазнає впливу значних кліматичних навантажень, таких як: вітер, дощ, сніг та низька температура. Руйнування або навіть значне пошкодження елементів інфраструктури антарктичної станції може викликати загрозу для життя людей, які знаходяться на ній та не мають можливості евакуюватися. Тому необхідно визначити поля розподілу вітрового навантаження в межах антарктичної станції Академік Вернадський для виявлення найбільш навантажених об'єктів її інфраструктури. Програмне середовище системи автоматизованого проектування SolidWorks дозволяє будувати геометричні моделі об'єктів різної складності. Саме тому дану систему було обрано для моделювання інфраструктури української антарктичної станції Академік Вернадський. Імітаційне моделювання впливу вітрового навантаження проведено у програмному комплексі скінчено-елементного аналізу ANSYS. Створено геометричні моделі об'єктів інфраструктури станції. Використовуючи фотографії української антарктичної станції Академік Вернадський та її топологічну карту, також створено геометричні моделі місцевості та складальні одиниці місцевості з установленими на ній об'єктами інфраструктури станції. У результаті імітаційного моделювання з використанням розроблених геометричних моделей отримано поля тиску та векторні поля швидкості повітряного потоку, які показують кількісні та якісні результати. Створено геометричні моделі та виконано імітаційне моделювання об'єктів інфраструктури української антарктичної станції Академік Вернадський в умовах вітрового навантаження. Показано, що у випадку дії вітру з материка елементами інфраструктури станції, які сприймають основне вітрове навантаження, є головною будівля та РВС-200. Визначено, що наявність пального фундаменту впливає на векторні поля швидкості, тож даним елементом не бажано нехтувати при виконанні подальших досліджень. Показано, що практично всі об'єкти інфраструктури станції призводять до виникнення значних турбулентних хвостів при їх обтіканні.

**Ключові слова:** імітаційне моделювання; геометричне моделювання; Академік Вернадський; CAE; ANSYS

## AIRFLOW SIMULATION AT THE UKRAINIAN ANTARCTIC STATION

S. TSYBULNYK<sup>1</sup>, V. NAKORYK<sup>2</sup>, S. RUPICH<sup>2</sup>, D. PIVTORAK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Orientation and Navigation Instruments and System, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, UKRAINE

<sup>2</sup>Department of Computer-Integrated Optical and Navigation Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The location of the Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station leads to several problems related to the need to ensure the livelihood and safety of people. The infrastructure of Vernadsky station is affected by significant climatic loads during the year, such as wind, rain, snow and low temperatures. The destruction or even significant damage to the infrastructure of the Antarctic station can endanger the lives of people who are on it due to the inability to evacuate. The purpose of the study is to determine the fields of wind load distribution within the Antarctic Vernadsky station. This is necessary in order to identify the infrastructure objects that are most affected by wind loads. SolidWorks computer-aided design software environment allows you to build geometric models of objects of varying complexity. That is why this system was chosen to model the infrastructure of the Ukrainian Antarctic Vernadsky station. Simulation modeling of wind load was performed in the computer-aided engineering software of finite element analysis ANSYS. Geometric models of the infrastructure objects of the Ukrainian Antarctic Vernadsky station were created. Simulation modeling of the station under wind load conditions was performed. It is shown that in the case of wind from the mainland, the elements of the station's infrastructure that receive the main wind load are the main building and the VST-200. It is determined that the presence of a pile foundation affects the velocity vector fields, so this element should not be neglected when performing further research. It is shown that practically all objects of the station's infrastructure lead to significant turbulent vortices. Geometric models of the infrastructure objects of the Ukrainian Antarctic station Academician Vernadsky were created. Simulation modeling of the station under wind load conditions was performed. It is shown that in the case of wind from the mainland, the elements of the station's infrastructure that receive the main wind load are the main building and the RVS-200. It is determined that the presence of a pile foundation affects the velocity vector fields, so this element should

*not be neglected when performing further research. It is shown that almost all infrastructure objects of the station lead to significant turbulent tails when they flow around.*

**Keywords:** simulation; geometric modeling; Vernadsky station; CAE; ANSYS

## Вступ

Місце розташування української антарктичної станції Академік Вернадський викликає ряд проблем, що можуть виникнути у разі появи надзвичайних ситуацій. Це пов'язано з тим, що більшу частину року води, які оточують станцію, укриті кригою і проведення швидкої евакуації людей або рятувальних операцій є неможливим. Отже, актуальною задачею є забезпечення безаварійної експлуатації інфраструктури антарктичної станції.

Інфраструктура станції Академік Вернадський включає в себе ряд основних та допоміжних будівель, що протягом року сприймають значні кліматичні навантаження від низької температури, сильного вітру, значних опадів у вигляді дощу та снігу. Саме тому питання надійності цих об'єктів є особливо актуальними в умовах Антарктики. Прикладами надзвичайних ситуацій можуть бути інциденти, які виникли на різних антарктичних станціях, таких як:

- європейська станція Конкордія, на якій через неухважність одного зі співробітників у 2012 році стався невеликий побутовий вибух [1], який не спричинив значних наслідків;

- російська станція Прогрес, на якій у 2008 році в результаті пожежі через несправність електричної проводки [2] згоріла одна будівля, загинула одна людина і отримали значні опіки ще двоє;

- бразильська станція Команданте Феррас, яка 25 лютого 2012 року була практично повністю знищена пожежею [3-5], яка виникла в приміщенні з генераторами та забрала життя двох співробітників.

Це далеко не повний перелік ситуацій, які продовжують виникати на території Антарктики [6-9]. У багатьох випадках подібні аварії відбувалися всередині приміщень з генераторними установками, захищеними від більшості серйозних зовнішніх впливів, наприклад, вітрового та снігового навантажень. Однак основні резервуари з нафтопродуктами знаходяться поза приміщеннями і схильні до всього спектра несприятливих зовнішніх впливів. Наприклад, пориви вітру в комбінації з низькою температурою можуть стати причиною виникнення крихких руйнувань металевих конструкцій об'єктів інфраструктури особливо у випадку неправильного вибору марки сталі при проектуванні [10-13]. Наприклад, РВС-200, який експлуатується на українській антарктичній станції має саме таку проблему [14,15]: його конструкція містить елементи з вуглецевої сталі звичайної якості ВСт5пс, що працює в інтервалі температур від 0 °С до +425 °С. Дана сталь стає крихкою при низьких температурах та може зазнати швидкого руйнування при дії сильних поривів вітру.

Інфраструктура станції має забезпечувати її функціонування протягом року. Враховуючи

величезну матеріально-технічну складність будівництва в Антарктиці, важко забезпечити надійну роботу станції та захистити об'єкти інфраструктури від снігових заметів і вітру. Полярні вітри розносять сніг по всьому континенту, а на будь-якому вертикальному об'єкті швидко виростає сніжний замет. Накопичений сніг може призвести до передчасного руйнування будівель.

Архітектура сучасних антарктичних станцій розвивається дуже швидко. Будівлі мають аеродинамічну конструкцію (наприклад, корейська станція Чан Бого) і встановлені на високих палях, тому вітер може вільно розносити сніг під ними. Такі конструкції антарктичних станцій допомагають зменшити навантаження від вітру та снігу на об'єкти інфраструктури. Таким чином, ризик багатоосередкового пошкодження будівель від впливу цих природних навантажень знижується.

На стаціонарних лабораторіях серії Галлея британських антарктичних станцій регулярно виникали проблеми через снігові бурі, а також через активне танення льоду лабораторії поступово сповзали в океан. Тому був розроблений ланцюг мобільних лабораторій на гідравлічних опорах – Halley VI. Це дало можливість підіймати і опускати наукову лабораторію в залежності від кількості снігу, що випав. Модулі станції Halley VI можуть бути ізольовані один від одного, щоб запобігти поширенню можливих пожеж. Також модулі можна від'єднати один від одного і перевезти на нове місце, де в подальшому станція збирається знову в єдине ціле.

Той самий принцип, але в покращеному варіанті, був застосований у проекті німецької антарктичної станції Ноймаєр-3, яка була відкрита в 2009 році. Шістнадцять гідравлічних колон дозволяють усю конструкцію станції підняти. Приблизно раз на рік будівлю піднімають на один метр. Після цього нижній кінець кожної гідравлічної палі також піднімають і знову поміщають в ущільнений сніг.

Нажаль, описані вище проблеми, пов'язані з особливостями розташування української антарктичної станції та матеріалами конструкції об'єктів її інфраструктури, на сьогодні є не вирішеними. Тому проблема визначення зон підвищеного тиску на об'єкти інфраструктури залишається актуальною і потребує вирішення.

## Мета роботи

Оскільки найближчим часом не планується оновлення архітектури станції Академік Вернадський, основною метою дослідження є визначення найбільш ймовірних місць скупчення снігу та зон максимального вітрового тиску для виявлення та запобігання багатоосередковому пошкодженню

об'єктів інфраструктури. Дані дослідження раціонально проводити за допомогою геометричного моделювання та чисельних методів розрахунку.

### Геометричне моделювання

Для побудови тривимірної моделі станції Академік Вернадський було використано програмний пакет геометричного моделювання SolidWorks, який надає інженерам, дизайнерам і виробникам необхідні для розробки інструменти для проектування, виробництва, моделювання/перевірки, керування файлами, спільної роботи, тощо.

SolidWorks простий у використанні, потужний та перевірений промисловістю програмний засіб, який забезпечує глибину функціональності, необхідну для роботи з найскладнішими конструкціями та найбільшими складальними одиницями. Ці переваги стали ключовими факторами для використання саме цього програмного продукту для створення геометричних моделей об'єктів інфраструктури станції.

План-схему станції Академік Вернадський наведено на рис. 1.

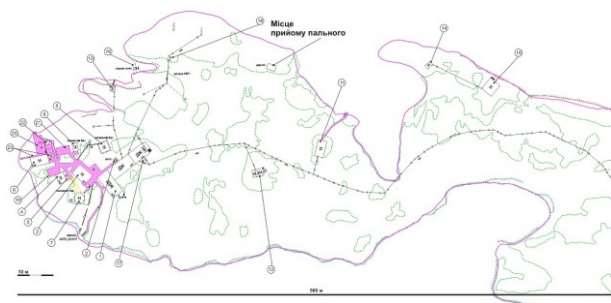


Рис. 1 – План-схема станції та навколишньої території

Дана схема завдяки наявності масштабу дозволила визначити геометричні розміри елементів інфраструктури станції та їх взаємне положення один відносно одного. Додатково для побудови використано фотографію місцевості, яку наведено на рис. 2.



Рис. 2 – Фото з топографією острова Галіндез

Програмна система SolidWorks дозволяє імпортувати рисунки і використовувати їх як основу для побудови ескізів. З рис. 1 та рис. 2 видно, що острів Галіндез має складну форму берегової лінії та кам'янистий ландшафт зі значними перепадами висоти над рівнем моря. Саме тому було вирішено скористатися вищезазначеним функціоналом для імпорту фотографії острова на одну з основних площин відображення у програмному середовищі (рис. 3).

Дана операція дозволяє створити початковий ескіз майбутньої тривимірної моделі у площині, яка паралельна до площини імпортованої фотографії.



Рис. 3 – Ескіз другого контуру місцевості

Програмне середовище SolidWorks дозволяє працювати з об'єктами у масштабі 1:1, тобто є можливість для відтворення острова Галіндез у реальну величину. Проте розміри станції Академік Вернадський (у порівнянні з загальною площею острова) є значно меншими, тож для імітаційного моделювання немає сенсу створювати занадто складну модель. Саме тому геометричну модель острова буде обмежено територією станції Академік Вернадський.

Після визначення границь ескізу за допомогою інструменту «Сплайн» необхідно дуже ретельно відновити контур бажаної області, викривляючи сплайни таким чином, щоб вони якомога точніше повторювали берегову лінію острова. Для майбутнього перетворення у тривимірну модель даний ескіз обов'язково має бути з закритим контуром. Це означає, що через будь-які дві сусідні точки має бути проведено лінію (сплайн), а остання точка має бути з'єднана лінією з першою. При порушенні даного правила створити тривимірну модель неможливо по причині відсутності об'єму у такого елемента (розрахований програмним середовищем SolidWorks об'єм дорівнює нулю).

Для детального відтворення берегової лінії обраної частини острова Галіндез було використано близько тисячі точок (рис. 3). Після створення закритого ескізу з нього можна створити геометричну

модель острова. Для цього його необхідно підняти на необхідну висоту.

Оскільки на топографічній карті, зображеній на рис. 2, чітко не вказано висоти кожної області, було прийнято рішення кожен контурну область витягувати на один метр вгору над попередньою. Прийmemo, що ескіз першої побудованої області, яка є контуром острова, знаходиться на рівні моря. Отже, вона витягується на один метр над рівнем моря.

Побудова кожного наступного рівня також починалася із формування ескізу шляхом виокремлення сплайнами відповідного контуру на топологічній карті місцевості, після чого витягувалася на один метр вгору. Основою кожного такого ескізу була верхня грань тривимірної моделі попереднього рівня.

Аналогічно було побудовано усі інші контурні лінії з топологічної карти. Результат цієї побудови зображено на рис. 4 (шар з імпортованою топологічною картою виключено з відображення).

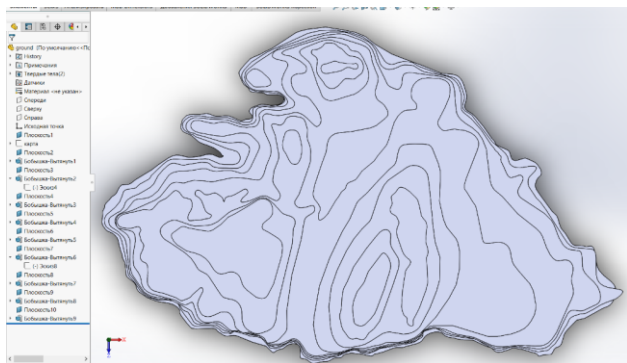


Рис. 4 – Геометрична модель району станції Академік Вернадський, вигляд зверху

Після готовності усіх необхідних елементів типу «Деталь» їх можна поєднати, створивши складальну одиницю. Для цього у робоче середовище SolidWorks імпортуються усі створені на попередніх етапах геометричні моделі, починаючи з рельєфу місцевості й закінчуючи об'єктами інфраструктури станції, а також розміщуються на місцевості у відповідності до план-схеми.

Додатково створено та розміщено на складальній одиниці модель дерев'яного помосту, який знаходиться між основними будівлями станції. Завершено складальну одиницю зображено на рис. 5.

### Імітаційне моделювання

У якості основного програмного комплексу скінчено-елементного аналізу для проведення імітаційного моделювання української станції Академік Вернадський було обрано ANSYS, який є одним із світових лідерів у області імітаційного моделювання. У якості додаткової системи

моделювання процесів та явищ гідро- та газодинаміки було обрано програмну систему FlowVision.

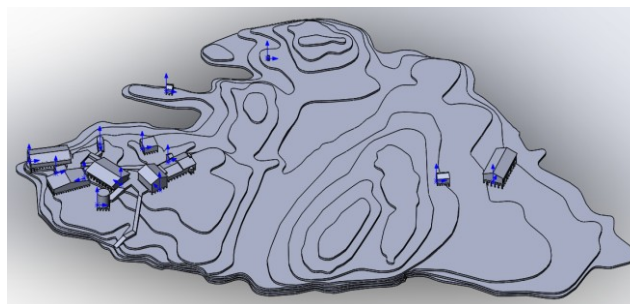


Рис. 5 – Складальна одиниця району станції Академік Вернадський, вигляд збоку

Для проведення імітаційного моделювання статичного впливу повітряного потоку в межах станції необхідно додатково створити модель повітряного простору. Дана геометрична модель являє собою паралелепіпед, з якого вирізана спрощена (частково обмежена) модель станції (рис. 6).

У відповідності до [16] середня швидкість вітру в районі станції Академік Вернадський становить 35 м/с, а максимальна – 45 м/с. Це означає, що об'єкти інфраструктури станції (будівлі та резервуари) потенційно знаходяться в несприятливих умовах експлуатації. Тривалий вплив вітрового навантаження зі значною швидкістю повітряного потоку може призводити до виникнення та розвитку тріщин (через взаємодію з низькою температурою навколишнього середовища), появи надмірних напружень та залишкових деформацій, тощо.

Для визначення векторних полів швидкості повітряного потоку та його тиску, які показують величину та напрямок розподілу вимірюваної величини по певній геометричній моделі (її частині, площині, тощо), було проведено імітаційне моделювання впливу вітрового навантаження в програмному модулі ANSYS CFX на станцію за допомогою відповідної геометричної моделі при швидкостях повітряного потоку нижче середнього (25 м/с) і вище середнього (максимум 45 м/с). Моделювання для швидкості 0,01 м/с не проводилося, тому що повітря у даному випадку є майже нерухомим.

Маючи геометричну модель повітряного середовища, можна приступати до створення її сіткової моделі. Для цього у розділі «Mesh» модуля ANSYS CFX було проведено побудову сітки на усіх елементах наявної геометричної моделі. Проте результуюча сіткова модель виявилася занадто складною (містила більше п'ятнадцяти мільйонів скінчених елементів та мала час побудови близько ста восьмидесяти семи годин). Тож для перевірки її адекватності та визначення основних недоліків було прийнято рішення спростити початкову складальну



одиницю шляхом обмеження побудованої території (рис. 6).

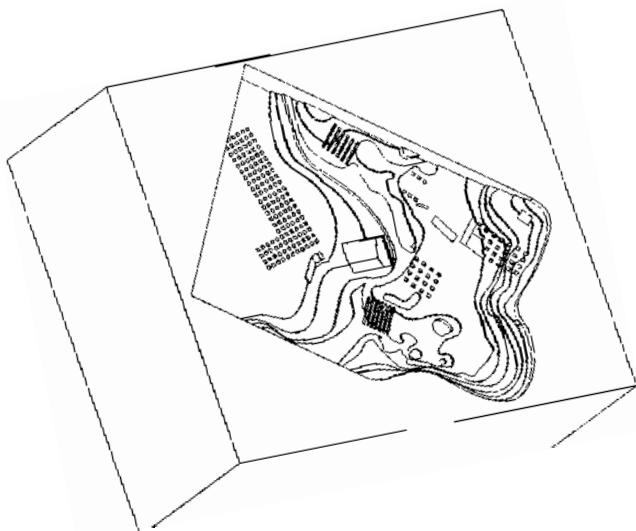


Рис. 6 – Геометрична модель повітряного простору навколо станції

Один цикл створення сіткової моделі для спрощеної геометричної моделі займав близько шестидесяти п'яти годин, а така модель містила 5 423 825 скінчених елементів та 1 024 253 вузлів. Результуючу сіткову модель району станції зображено на рис. 7.

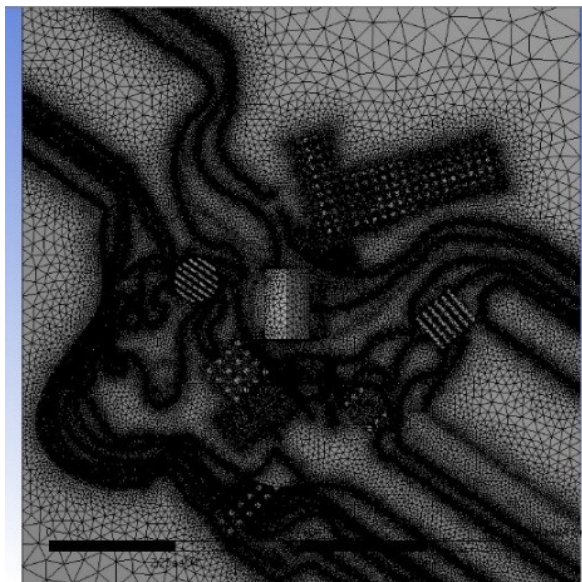


Рис. 7 – Сіткова модель району станції Академік Вернадський

Створення розрахункової моделі відбувалося шляхом визначення основних граничних умов (швидкість та турбулентність вітру, його напрямок, початкова площина, непроникні об'єкти, тощо) та

коефіцієнтів, які впливають на розрахунок. Для оцінки адекватності побудованих моделей було прийнято обрати за основні напрямки повітряного потоку вітер з океану та з материка. Це пов'язано з тим, що ці два напрямки вітру найсильніше впливають на вертикальний циліндричний сталевий резервуар.

Один розрахунок спрощеної моделі (рис. 7) займав біля 120 годин. Результати розрахунків показано на рис. 8 – рис. 11.

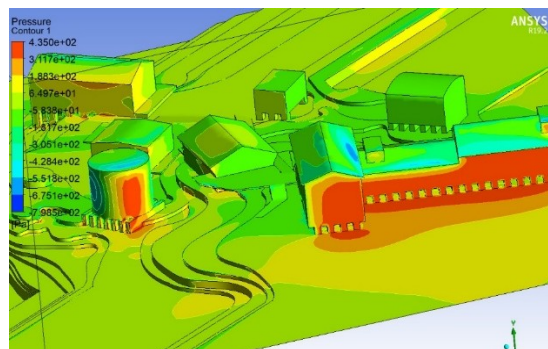


Рис. 8 – Поле тиску, вітер з материка (збільшений вигляд)

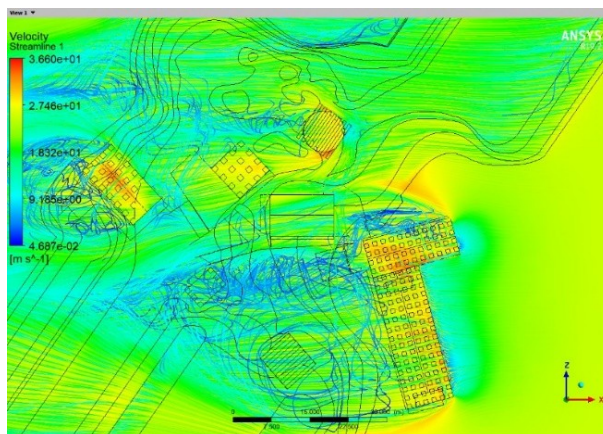


Рис. 9 – Векторне поле швидкості, вітер з материка (вид знизу)

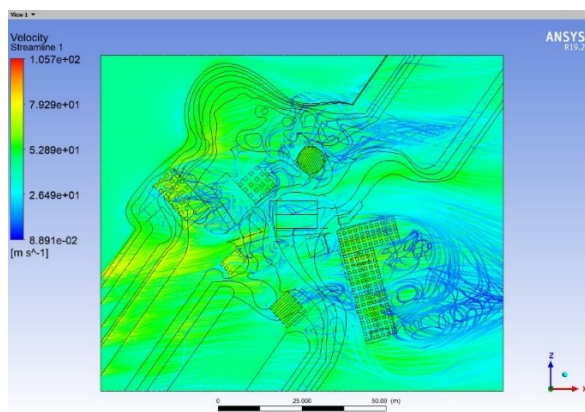


Рис. 10 – Векторне поле тиску, вітер з океану (вид знизу)

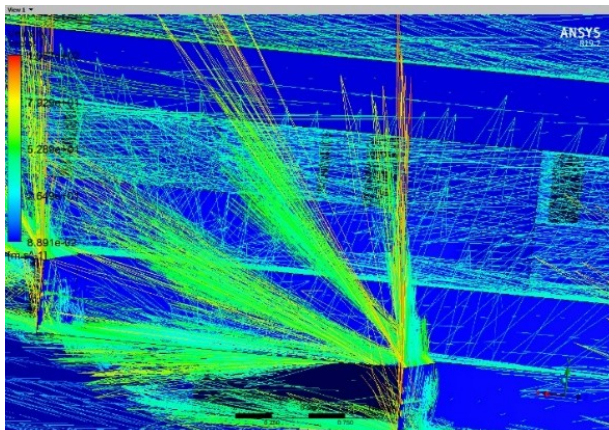


Рис. 11 – Векторне поле тиску, вітер з океану, обтікання елементів місцевості

Аналіз полів вітрового тиску (рис. 8) дав змогу визначити найбільш навантажені елементи інфраструктури станції Академік Вернадський у випадках дії вітру з материка та з океану. Найбільш навантаженими елементами інфраструктури є основна будівля та паливний бак у разі дії вітру з материка. Деяко менше навантаження приходить на столярну майстерню у цьому ж випадку.

Для випадку дії вітру з материка також характерне прискорення повітряних потоків при обтіканні елементів інфраструктури, які зустрічаються першими на його шляху: головної будівлі та вертикального циліндричного сталевго резервуару (рис. 9). Також показано, що у даному випадку паливний фундамент об'єктів інфраструктури станції має вплив на результати моделювання.

На відміну від вітру з материка, вітер з океану показав іншу, більш безпечну, картину (рис. 10) тиску повітряного потоку на елементи інфраструктури. Проте, якщо провести більш детальний аналіз результатів, то можна побачити (рис. 11), що наявність перпендикулярних елементів місцевості (переходи з одного рівня висоти на інший) призводить до розбивання повітряних потоків об них та їх розділенні на чотири основні напрямки векторів руху: горизонтально по поверхні, вертикально вгору, під кутами приблизно  $30^\circ$  та  $60^\circ$  до горизонталі. Це може призводити до спотворення загальної картини розподілу тиску по поверхні геометричної моделі та відхилення інших векторів швидкості. Саме тому необхідно в майбутньому провести додаткові дослідження на моделі, в якій усі прями кути на місцевості будуть замінені на тупі (гострі) або заокруглені для визначення впливу на параметри обтікання та розподілу вітрового тиску.

Також аналіз отриманих результатів показав, що для обох розглянутих випадків характерною є стабільність розподілу тиску та векторів повітряного потоку в межах геометричної моделі незалежно від величини швидкості вітру (25 м/с та 45 м/с). У обох розглянутих випадках присутнє формування значного

турбулентного хвоста за елементами інфраструктури станції (рис. 9, рис. 10) через наявність паливного фундаменту. Ці турбулентні хвости низької швидкості можуть стати причиною формування заметів.

Одне з завдань будь-якого моделювання полягає в забезпеченні його достатньої точності. Похибки імітаційного моделювання зумовлюються об'єктивними причинами (наприклад, спрощення реальних явищ, об'єктів чи процесів) та суб'єктивними (наприклад, недостатність знань і навичок людини-дослідника). Похибки можна врахувати, компенсувати або, в ідеальному випадку, уникнути. Саме тому треба провести всебічну оцінку отриманих результатів. Швидко це можна зробити, наприклад, перевіривши результат на: відповідність фізичному сенсу, виконання окремих умов, дотримання тенденцій зміни знаків чи величин, (монотонність, циклічність, плавність, тощо), розмірність (порядок), тощо.

Тож для забезпечення достатньої точності та узгодження результатів імітаційного моделювання необхідно в майбутніх роботах додатково провести аналітичний розрахунок вітрового навантаження на об'єкти інфраструктури станції Академік Вернадський, а також експериментальні дослідження для схожих з моделюванням умов. Це дасть змогу перекопатися у правильності прийнятих у ході імітаційного моделювання припущень та за необхідності розробити план заходів для протидії вітровому та сніговому навантаженням.

## Висновки

На сьогоднішній день проблема протидії складним погодним умовам в районі Антарктики вирішується за рахунок впровадження нових архітектурних рішень, які по ряду причин неможливо реалізувати на українській антарктичній станції Академік Вернадський. Неправильний вибір металу для деяких об'єктів інфраструктури української станції також створює додатковий ризик для життя персоналу станції. Ці невіршені проблеми потребують розроблення комплексу заходів, що у тій чи іншій мірі зменшать негативний вплив.

Саме тому у даній роботі створено геометричні моделі та виконано імітаційне моделювання об'єктів інфраструктури української антарктичної станції Академік Вернадський в умовах вітрового навантаження. Показано, що у випадку дії вітру з материка елементами інфраструктури станції, що сприймають основне вітрове навантаження, є головна будівля та РВС-200. Визначено, що наявність паливного фундаменту впливає на векторні поля швидкості, тож даним елементом не бажано нехтувати при виконанні подальших досліджень. Показано, що практично всі об'єкти інфраструктури станції призводять до виникнення значних турбулентних хвостів при їх обтіканні.

У майбутньому необхідно провести додаткові дослідження вітрового навантаження з напрямками повітряного потоку у відповідності до рози вітрів району станції Академік Вернадський. Це дасть змогу визначити точні напрямки турбулентних хвостів для розроблення комплексу заходів протидії вітровому та сніговому навантаженню на об'єкти інфраструктури станції. Також необхідно провести аналітичний розрахунок та експериментальні дослідження для визначення точності результатів імітаційного моделювання.

#### Список літератури

1. Accidents can happen. URL: <https://blogs.esa.int/concordia/2012/04/04/accidents-can-happen/> (дата звернення: 20.01.2022).
2. Xin Z. Be careful, Here is Antarctica – the statistics and analysis of the grave accidents in Antarctica. 2010. URL: <https://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/handle/10092/13919/Xin%20Zhang%20Antarctic%20accidents.pdf> (дата звернення: 20.01.2022).
3. Antarctic research base goes up in flames. *New Scientist*. 2012. Vol. 213. Iss. 2854. P. 5. doi: 10.1016/S0262-4079(12)60530-2.
4. Two die in fire at Brazil's Antarctic research station. URL: <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-17168526> (дата звернення: 20.01.2022).
5. Colabuono F., Taniguchi S., Cipro C., da Silva J., Bicego M., Montone R. Persistent organic pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons in mosses after fire at the Brazilian Antarctic Station. *Marine Pollution Bulletin*. 2015. Vol. 93. Iss. 1–2. P. 266–269. doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.01.018.
6. Brooks S., Jabour J., Sharman A., Bergstrom D. An analysis of environmental incidents for a national Antarctic program. *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 212. P. 340–348. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.02.024.
7. Guerra M., Neto E., Prianti M., Pereira-Filho E., Schaefer C. Post-fire study of the Brazilian Scientific Antarctic Station: Toxic element contamination and potential mobility on the surrounding environment. *Microchemical Journal*. 2013. Vol. 110. P. 21–27. doi: 10.1016/j.microc.2013.01.007.
8. Cereceda-Balic F., Vidal V., Ruggeri M., González H. Black carbon pollution in snow and its impact on albedo near the Chilean stations on the Antarctic peninsula: First results. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 743. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140801.
9. Jiang M., Pang X., Chen H., Chen D. Ecological integrity evaluation along the antarctic coast: A case study on the Fildes Peninsula. *Continental Shelf Research*. 2022. Vol. 242. doi: 10.1016/j.csr.2022.104747.
10. Кондрашова О. Г., Назарова О. М. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров. *Нефтегазовое дело*. 2004. № 2. С. 21–29.
11. Купреишвили С.М. Разрушения в процессе эксплуатации вертикальных цилиндрических резервуаров со стационарной крышей. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2005. № 7. С. 8–14.
12. Wang J., Wang M., Yu X., Zong R., Lu S. Experimental and numerical study of the fire behavior of a tank with oil leaking and burning. *Process Safety and Environmental*

- Protection*. 2022. Vol. 159. P. 1203–1214. doi: 10.1016/j.psep.2022.01.047.
13. Mirzaei M., Malekan M., Sheibani E. Failure analysis and finite element simulation of deformation and fracture of an exploded CNG fuel tank. *Engineering Failure Analysis*. 2013. Vol. 30. P. 91–98. doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.01.015.
14. Bouraou N., Lukianchenko O., Tsybulnik S., Shevchuk D. Vibration condition monitoring of the vertical steel tanks. *Vibrations in Physical Systems*. 2016. 27. P. 55–60.
15. Жук Г. В., Мороз И. В., Барвинко А. Ю., Барвинко Ю. П., Посыпайко Ю. Н. Особенности строительства и эксплуатации резервуара РВС-200 для хранения дизельного топлива в Антарктиде на станции «Академик Вернадский». *Автоматическая сварка*. 2017. № 2. С. 36–40.
16. The Replacement of Fuel Tanks at Vernadsky Station. URL: [http://www.ats.aq/documents/ATCM30/ip/ATCM30\\_ip030\\_e.doc](http://www.ats.aq/documents/ATCM30/ip/ATCM30_ip030_e.doc) (дата звернення: 06.12.2021).

#### References (transliterated)

1. Accidents can happen. Available at: <https://blogs.esa.int/concordia/2012/04/04/accidents-can-happen/> (Accessed Jan. 20, 2022).
2. Xin Z. Be careful, Here is Antarctica – the statistics and analysis of the grave accidents in Antarctica. 2010. Available at: <https://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/handle/10092/13919/Xin%20Zhang%20Antarctic%20accidents.pdf> (Accessed Jan. 20, 2022).
3. Antarctic research base goes up in flames. *New Scientist*, 2012, Vol. 213, Iss. 2854, p. 5, doi: 10.1016/S0262-4079(12)60530-2.
4. Two die in fire at Brazil's Antarctic research station. Available at: <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-17168526> (Accessed Jan. 20, 2022).
5. Colabuono F., Taniguchi S., Cipro C., da Silva J., Bicego M., Montone R. Persistent organic pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons in mosses after fire at the Brazilian Antarctic Station. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, Vol. 93, Issues 1–2, pp. 266–269, doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.01.018.
6. Brooks S., Jabour J., Sharman A., Bergstrom D. An analysis of environmental incidents for a national Antarctic program. *Journal of Environmental Management*, 2018, Vol. 212, pp. 340–348, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.02.024.
7. Guerra M., Neto E., Prianti M., Pereira-Filho E., Schaefer C. Post-fire study of the Brazilian Scientific Antarctic Station: Toxic element contamination and potential mobility on the surrounding environment. *Microchemical Journal*, 2013, Vol. 110, pp. 21–27, doi: 10.1016/j.microc.2013.01.007.
8. Cereceda-Balic F., Vidal V., Ruggeri M., González H. Black carbon pollution in snow and its impact on albedo near the Chilean stations on the Antarctic peninsula: First results. *Science of The Total Environment*, 2020, Vol. 743, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140801.
9. Jiang M., Pang X., Chen H., Chen D. Ecological integrity evaluation along the antarctic coast: A case study on the Fildes Peninsula. *Continental Shelf Research*, 2022, Vol. 242, doi: 10.1016/j.csr.2022.104747.
10. Kondrashova O. G., Nazarova O. M. Cause-and-effect analysis of vertical steel tank accidents. *Neftegazovoe delo*, 2004, Vol. 2, pp. 21–29.

11. Kupreishvili S. M. Destruction during operation of vertical cylindrical tanks with a fixed roof. *Montazhnye i special'nye raboty v stroitel'stve*, 2005, Vol. 7, pp. 8–14.
12. Wang J., Wang M., Yu X., Zong R., Lu S., Experimental and numerical study of the fire behavior of a tank with oil leaking and burning. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, Vol. 159, pp. 1203–1214, doi: 10.1016/j.psep.2022.01.047.
13. Mirzaei M., Malekan M., Sheibani E., Failure analysis and finite element simulation of deformation and fracture of an exploded CNG fuel tank. *Engineering Failure Analysis*, 2013, Vol. 30, pp. 91–98, doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.01.015.
14. Bouraou, N., Lukianchenko, O., Tsybulnik, S., Shevchuk, D. Vibration condition monitoring of the vertical steel tanks. *Vibrations in Physical Systems*, 2016, 27, pp. 55–60.
15. ZHuk G. V., Moroz I. V., Barvinko A. Yu., Barvinko Yu. P., Posypajko Yu. N. Features of the construction and operation of the RVS-200 tank for storing diesel fuel in Antarctica at the Vernadsky station. *Avtomaticheskaya svarka*, 2017, Vol. 2, pp. 36-40.
16. The Replacement of Fuel Tanks at Vernadsky Station. Available at: [http://www.ats.aq/documents/ATCM30/ip/ATCM30\\_ip030\\_e.doc](http://www.ats.aq/documents/ATCM30/ip/ATCM30_ip030_e.doc) (Accessed Dec. 06, 2021).

### Відомості про авторів (About authors)

**Цибульник Сергій Олексійович** – кандидат технічних наук, доцент, КПП ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри приладів і систем орієнтації і навігації; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-4462-0936; e-mail: tsybulnik.s.a@gmail.com.

**Tsybulnyk Serhii** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor of Department of Orientation and Navigation Instruments and Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4462-0936; e-mail: tsybulnik.s.a@gmail.com.

**Накорик Вікторія Валентинівна** – студент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-4851-4740.

**Nakoryk Viktoriia** – student, Department of Computer-Integrated Optical and Navigation Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4851-4740.

**Рупіч Сергій Сергійович** – кандидат технічних наук, асистент, КПП ім. Ігоря Сікорського, кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-8237-7001.

**Rupich Serhii** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Assistant, Department of Computer-Integrated Optical and Navigation Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8237-7001.

**Півторак Діана Олександрівна** – кандидат технічних наук, доцент, КПП ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри приладів і систем орієнтації і навігації; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-3708-5610.

**Pivtorak Diana** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor of Department of Orientation and Navigation Instruments and Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3708-5610.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Цибульник С. О., Накорик В. В., Рупіч С. С., Півторак Д. О. Моделирование повітряного потоку в районі української антарктичної станції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 61-68. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.09.

*Please cite this article as:*

Tsybulnyk S., Nakoryk V., Rupich S., Pivtorak D. Development of an automated bibliographic system. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2(12), pp. 61–68, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.09.

*Надійшла (received) 06.06.2022*

УДК 502.1

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.10

## ПРОБЛЕМА ЗАБРУДНЕННЯ СВІТОВОГО ОКЕАНУ ПЛАСТИКОВИМИ ВІДХОДАМИ

**А. О. БАРАНОВА\*, Т. Б. НОВОЖИЛОВА, А. І. ЛИТОВКА, М. В. БІЛОУСОВ**

кафедра Хімічна техніка та промислова екологія, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА  
\*e-mail: baranova647@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Найважливішою екологічною проблемою Світового океану є забруднення. Під забрудненням Океану розуміють пряме або побічне надходження речовин або енергії в морське середовище, що несуть такі шкідливі впливи, як заподіяння шкоди живим ресурсам, небезпека для здоров'я людей, перешкоди морської діяльності, включаючи рибальство, погіршення якості морської води. Пластик є найбільшою, найшкідливішою та найбільш стійкою частиною морського сміття, на яку припадає щонайменше 85 відсотків загального морського сміття. Він викликає смертельні та сублетальні ефекти у китів, тюленів, черепах, птахів і риб, а також у безхребетних, таких як двостулкові молюски, планктон, черви та корали. Наслідки включають заплутування, голодування, утоплення, розриви внутрішніх тканин, задушення та позбавлення кисню та світла, фізіологічний стрес та токсикологічну шкоду. Пластик також може змінити глобальний кругообіг вуглецю через свій вплив на планктон і первинне виробництво в морських, прісноводних і наземних системах. Сьогодні сукупні щорічні економічні втрати в результаті шкоди морській промисловості, включаючи витрати на очищення, оцінюються у 6–19 мільярдів доларів США. Оскільки ця оцінка не включає витрати на деградацію товарів і послуг екосистеми через морське сміття, вона, ймовірно, значно занижує загальні економічні втрати. Поєднання дешевого палива та неналежного збору відходів та їх переробки призвело до прогнозів, що до 2040 року очікувана маса витоку пластику в океані може становити 100 мільярдів доларів США. Ці цифри вказують на значні збитки для ринку та підкреслюють необхідність термінових заходів. Шляхами вирішення проблеми забруднення Світового океану є обмеження виробництва пластику, збільшити обсяги утилізації та розпочати виготовлення біорозкладного, нешкідливого для людського організму та навколишнього середовища, виду пластику, використання в кав'ярнях паперових або дерев'яних трубочок. Крім того, необхідний повний перехід з поліетиленових пакетів на багаторазові сумки.

**Ключові слова:** пластик; відходи; забруднення Світового океану; мікропластик

## THE PROBLEM OF PLASTIC WASTE POLLUTION IN THE WORLD OCEAN

**A. BARANOVA, T. NOVOZHILOVA, A. LITOVKA, M. BILOUSOV**

Department of chemical engineering and industrial ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The most important environmental problem facing the world's oceans is pollution. Ocean pollution refers to the direct or indirect release of substances or energy into the marine environment causing such adverse effects as harm to living resources, harm to human health, disruption of marine activities, including fishing, and degradation of seawater quality. Plastic is the largest, most harmful and most persistent part of marine litter, accounting for at least 85 percent of total marine litter. They cause lethal and sublethal effects in whales, seals, turtles, birds and fish, as well as in invertebrates such as bivalves, plankton, worms and corals. Their consequences include confusion, starvation, drowning, rupture of internal tissues, suffocation and deprivation of oxygen and light, physiological stress and toxicological damage. Plastics can also change the global carbon cycle through their impact on plankton and primary production in marine, freshwater and terrestrial systems. Today, the total annual economic losses due to damage to the maritime industry, including cleaning costs, are estimated at 6 to 19 billion US dollars. As this estimate does not include the cost of degrading ecosystem goods and services through marine litter, it is likely to significantly underestimate the overall economic loss. The combination of cheap fuel and improper waste collection and recycling has led to estimates that by 2040 the expected mass of plastic leaks into the oceans could reach \$100 billion. These figures point to significant losses for the market and underscore the need for urgent action. Ways to solve the problem of pollution of the world's oceans include reducing the production of plastic, increasing recycling volumes and starting the production of a benign, non-harmful to the human body and the environment type of plastic, use of paper or wooden tubes in coffee shops. In addition, a complete transition from polystyrene bags to carrier bags is required.

**Keywords:** plastic; waste; pollution of the World Ocean; microplastic

## Вступ

Водні організми постійно піддаються впливу пластикового забруднення. Найбільш стійкими фракціями морського сміття є синтетичні полімери та терморезистентні матеріали, у сукупності звані пластмасами; на них припадає близько 85% загального обсягу морських відходів. У прісноводних системах загроза фізичної шкоди від сміття та мікропластику залишається відносно маловивченою. На відміну від цього, у морському середовищі було проведено понад 100 000 морських досліджень щодо летального та нелетального впливу пластику на всі рівні харчового ланцюга, включаючи водорості, зоопланктон, ракоподібні та безхребетні, риби, птиці, черепахи та ссавці.

Основні спостережувальні ефекти пов'язані із заподіянням фізичної шкоди морським організмам, безпосередньо заплутуванням, удушенням від ковтання часток пластику; з хімічним впливом на морське середовище, виробленням патогенних речовин хімічного походження у зв'язку з деградацією та біоруйнуванням пластмас.

Вже понад десять років визнається, що мікропластик переносить ряд токсичних хімічних речовин, а також металів та мікробабудівачів у відкриті шари води, де вони можуть бути проковтнуті широким спектром морської фауни.

За останнє десятиліття було проведено широкий спектр лабораторних та експериментальних досліджень, які були доповнені польовими спостереженнями для того, щоб досягти кращого розуміння впливу мікро- та/або нанопластиків на різні організми. Однак моніторинг мікропластику залишається складним завданням як у навколишньому середовищі, так і у лабораторних умовах.

## Мета роботи

Метою роботи є визначення впливу пластикового забруднення на Світовий океан.

## Виклад основного матеріалу

За останні чотири десятиліття кількість пластикових відходів зросла в чотири рази. Попит на пластик продовжує зростати. За оцінками світового ринку пластику в 2016 році він становив 502 млрд дол. США, а в 2020 р. вже 580 млрд дол. [1].

Загальна маса пластику у світовому океані складає приблизно 268 тисяч тонн. Найбільш забрудненою є північна частина Тихого океану, а найчистішими стали південна частина Атлантичного океану та Середземне море [2].

Провівши 24 експедиції, такі результати досліджень отримали новозеландські науковці. Також вони створили інтерактивну мапу світу, яка ілюструє кількість пластикових відходів у різних регіонах [3].

Уперше «Велику тихоокеанську сміттєву пляму» (The Great Pacific Garbage Patch) було виявлено в 1997 році. Сміттєва пляма – це ділянка океану, на якій сконцентровано щільні масиви пластику та інших відходів, утворена Північно-Тихоокеанською системою течій [4].

Тихоокеанська сміттєва пляма – найбільша, але не єдина. Такі ж сміттєві водоверті є в Атлантичному та Індійському океанах. Відходи накопичуються, а пластик поступово подрібнюється на малі частинки. Тобто «сміттєва пляма» – це не завжди гора відходів, інколи це велика кількість мікрочастин пластику. Їх навіть не можна побачити неозброєним оком.

Мікроскопічні волокна, на які розпадається пластик, потрапляють у харчовий ланцюжок морських мешканців, завдаючи все більшої шкоди Світовому океану.

У воду більшість сміття потрапляє із суходолу. Наприклад, сміття із узбережжя Північної Америки пропливе водами океану приблизно шість років, щоб дістатися до Великої тихоокеанської сміттєвої плями. Подорож сміття з Японії займає близько року. Менше сміття залишається в океані від морських нафтових вишок і великих вантажних кораблів, які скидають сміття безпосередньо у воду або гублять товар, який доставляють. Згідно з Цілями сталого розвитку до 2025 року світ має суттєво скоротити усі типи забруднення морських екосистем, зокрема, забруднення внаслідок діяльності на суші [3].

Раніше вважалося, що 15 % пластику знаходиться на пляжах, 15 % – у морі, а 70% – на морському дні. Однак зараз вчені припускають, що на дні знаходиться 90 % пластику. Попри те, що пластик є одним із найбільш поширених матеріалів на планеті, яким є його вплив на здоров'я людини, усвідомлюється недостатньо. Проте вплив пластику поширюється на нові сфери довілля та харчового ланцюга, оскільки наявні пластикові вироби фрагментуються на менші частинки та концентрують токсичні хімічні речовини [5].

Наразі дослідження впливу пластику на здоров'я людини здебільшого зосереджуються на конкретних питаннях життєвого циклу пластику – від гирла свердловини до нафтопереробного заводу, від полиць магазинів до споживання людьми, а також від утилізації до постійного впливу – як забруднювача повітря та океанічного пластику. Кожен етап життєвого циклу пластику, взятий окремо, створює значні ризики для здоров'я людини.

Розуміння ризиків, пов'язаних із пластиком, та реагування на них, а також прийняття обґрунтованих рішень щодо цих ризиків вимагає підходу повного життєвого циклу до оцінювання комплексного впливу пластику на здоров'я людини. Йдеться про те, щоб ми не створювали ще більших та складніших екологічних проблем, намагаючись вирішити цю [6].

Видобуток нафти та газу, зокрема використання гідравлічного розриву пластів для видобутку природного газу, призводить до викиду безлічі токсичних речовин у повітря та воду, часто у значних обсягах. Понад 170 хімічних речовин, необхідних для здійснення гідророзриву, що використовуються для виробництва основних первинних матеріалів для пластику, мають відомі наслідки для здоров'я людини, зокрема канцерогенні захворювання, нейротоксичність, токсичність для репродуктивної системи та розвитку, погіршення імунної системи тощо.

Ці токсини мають безпосередній і документально зафіксований вплив на шкіру, очі та інші органи чуття, дихальну, нервову та шлунково-кишкову системи, печінку та мозок [7].

Перетворення палива в смоли пластмаси та полімерні добавки призводить до викидів у повітря канцерогенних та інших високотоксичних речовин. Задokumentовані наслідки впливу цих речовин охоплюють порушення нервової системи, репродуктивні проблеми та проблеми розвитку, рак, лейкемію та генетичні наслідки, зокрема, таких як низька вага тіла при народженні.

Використання пластикових виробів призводить до заковтування та/або вдихання великої кількості як частинок мікропластику, так і сотень токсичних речовин, що мають канцерогенний вплив та зумовлюють порушення розвитку та ендокринної системи.

Мікропластик, що потрапляє в організм людини шляхом прямого впливу через контакт зі шкірою, ковтання або вдихання, може призвести до низки негативних процесів, зокрема запалень, генотоксичності, оксидативного стресу, апоптозу та некрозу, що пов'язані з безліччю наслідків для здоров'я, наприклад, рак, серцево-судинні захворювання, запальні захворювання кишківника, діабет, ревматоїдний артрит, хронічне запалення, аутоімунні захворювання, нейродегенеративні захворювання та інсульт [8].

Брак даних щодо хімічних речовин, присутніх у більшості пластиків, та процесів їх виробництва перешкоджає комплексному оцінюванню їх впливу. Широкий захист конфіденційної бізнес-інформації та неадекватні вимоги до розкриття інформації відіграють ключову роль у створенні такої невизначеності й знижують здатність регуляторних органів розробляти адекватні гарантії; споживачів – робити обґрунтований вибір; а громад, що найбільше

потерпають, і сусідніх громад – обмежувати вплив пов'язаних із пластиком загроз для здоров'я.

Пластик не лише забруднює навколишнє середовище та загрожує тваринам і людям, але і «робить свій внесок» у зміну клімату. Про це повідомляють із Програми ООН з навколишнього середовища, посилаючись на дані нового дослідження, проведеного в Гавайському університеті [9].

Розкладаючись, під впливом сонячної радіації пластик виділяє домішки парникових газів метану та етилену, до того ж з часом обсяги емісій зростають. Дослідники протестували цілий ряд матеріалів, що містяться в тканинах, будівельних матеріалах, виробах із пластику. Результати говорять про те, що пластик є джерелом газоподібних домішок, які впливають на клімат [10–12].

Особливо небезпечні пакети, які в більших кількостях містять поліетилен – один з найактивніших джерел метану та етилену. За оцінками, починаючи з 1950 року було вироблено понад вісім мільярдів тонн пластикових пакетів. Очікується, що в найближчі 20 років їх річне виробництво зросте вдвічі.

#### Обговорення результатів

На фоні прогнозованого росту виробництва пластику на глобальному рівні важливо, щоб виробники пластику, а також держави, які намагаються зупинити зміни клімату, розуміли, які масштаби викидів метану та етилену і як вони впливають на екосистеми. На думку дослідників, їхні відкриття лише підтверджує необхідність боротися з використанням пластику, який, як з'ясувалося, сприяє глобальному потеплінню.

У цілому, концентрація метану в атмосфері, що потрапляє туди з різних джерел, за останні два століття подвоїлася. За оцінками Міждержавної групи по зміні клімату, здатність метану затримувати тепло та нагріти атмосферу – у 86 разів вища, ніж у вуглекислого газу, але емісії метану не так великі, як викиди CO<sub>2</sub>. Його джерела, крім пластику – сільське господарство та культивування рису, тваринництво, а також виробництво та використання вугілля, нафти й природного газу.

#### Висновки

Шляхами вирішення проблеми забруднення Світового океану є обмеження виробництва пластику, збільшення обсягів утилізації пластикових відходів, виготовлення біорозкладного, нешкідливого для людського організму та навколишнього середовища, виду пластику, використання в кав'ярнях паперових або

дерев'яних трубочок. Крім того, необхідний повний перехід з поліетиленових пакетів на багаторазові сумки.

#### Список літератури

1. Aanesen M., Armstrong C., Czajkowski M., Falk-Petersen J., Hanley N., Navrud S. Willingness to pay for unfamiliar public goods: Preserving cold-water coral in Norway. *Ecological Economics*. 2016. No. 3. P. 53–67. doi: 10.1016/j.ecolecon.2015.02.007.
2. Arcangeli A., Campana I., Angeletti D., Atzori F., Azzolin M., Carosso L. Amount, composition, and spatial distribution of floating macro litter along fixed trans-border transects in the Mediterranean basin. *Marine Pollution Bulletin*. 2017. No. 129(2). P. 545–554. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.10.028.
3. Ashbullby K. J., Pahl S., Webley P., White M. P. The beach as a setting for families' health promotion: A qualitative study with parents and children living in coastal regions in Southwest England. *Health and Place*. 2013. No. 23. P. 138–147. doi: 10.1016/j.healthplace.2013.06.005.
4. Balestri E., Menicagli V., Vallerini F., Lardicci C. Biodegradable plastic bags on the seafloor: A future threat for seagrass meadows? *Science of The Total Environment*. 2017. 605–606. P. 755–763. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.249.
5. Barboza L. G. A., Gimenez B. C. G. Microplastic in the marine environment: Current trends and future perspectives. *Marine Pollution Bulletin*. 2015. No. 97. (1–2). P. 5–12. doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.06.008.
6. Barra C., Brandts I., Torta L., Oliveira M., Telesa M. Effect of nanoplastics on fish health and performance: A review. *Marine Pollution Bulletin*. 2020. No. 151. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110791.
7. Black J. E., Kopke K., O'Mahony C. A trip upstream to mitigate marine plastic pollution – a perspective focused on the MSFD and WFD. *Frontiers in Marine Science*. 2020. No. 6, P. 1–6. doi: 10.3389/fmars.2019.00689.
8. Bucol L., Romanos E., Cabcan S., Siplon L. M., Madrid G. C., Bucol A., Polidoro B. Microplastics in marine sediments and rabbitfish (*Siganus fuscus*) from selected coastal areas of Negros Oriental, Philippines. *Marine Pollution Bulletin*. 2020. No. 150. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110685.
9. Cheung P. K., Cheung L. T. O., Fok L. Seasonal variation in the abundance of marine plastic debris in the estuary of a subtropical macroscale drainage basin in South China. *Science of The Total Environment*. 2016. No. 562. P. 658–665. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.048.
10. Costanza R., de Groot R., van der Ploeg S., Anderson S. J., Kubiszewski I., Farber S. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*. 2014. No. 26. P. 152–158. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002
11. Dris R., Gasperi J., Rocher V., Saad M., Renault N., Tassin B. Microplastic contamination in an urban area: A case study in Greater Paris. *Environmental Chemistry*. 2015. No. 12(5). P. 592–599. doi: 10.1071/EN14167.

12. Groh K. J., Backhaus T., Carney-Almroth B., Gueke B., Inostroza P. A., Lennquist A. et al. Overview of known plastic packaging-associated chemicals and their hazards. *Science of The Total Environment*. 2019. No. 651. P. 3253–3268. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.015.

#### References (transliterated)

1. Aanesen M., Armstrong C., Czajkowski M., Falk-Petersen J., Hanley N., Navrud S. Willingness to pay for unfamiliar public goods: Preserving cold-water coral in Norway. *Ecological Economics*, 2016, no. 3, pp. 53–67, doi: 10.1016/j.ecolecon.2015.02.007.
2. Arcangeli A., Campana I., Angeletti D., Atzori F., Azzolin M., Carosso L. Amount, composition, and spatial distribution of floating macro litter along fixed trans-border transects in the Mediterranean basin. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, no. 129 (2), pp. 545–554, doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.10.028.
3. Ashbullby K. J., Pahl S., Webley P., White M. P. The beach as a setting for families' health promotion: A qualitative study with parents and children living in coastal regions in Southwest England. *Health and Place*, 2013, no. 23, pp. 138–147, doi: 10.1016/j.healthplace.2013.06.005.
4. Balestri E., Menicagli V., Vallerini F., Lardicci C. Biodegradable plastic bags on the seafloor: A future threat for seagrass meadows? *Science of The Total Environment*, 2017, 605–606, pp. 755–763, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.249.
5. Barboza L. G. A., Gimenez B. C. G. Microplastic in the marine environment: Current trends and future perspectives. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, no. 97 (1–2), pp. 5–12, doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.06.008.
6. Barra C., Brandts I., Torta L., Oliveira M., Telesa M. Effect of nanoplastics on fish health and performance: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, no. 151, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110791.
7. Black J. E., Kopke K., O'Mahony C. A trip upstream to mitigate marine plastic pollution – a perspective focused on the MSFD and WFD. *Frontiers in Marine Science*, 2020, no. 6, pp. 1–6, doi: 10.3389/fmars.2019.00689.
8. Bucol L., Romanos E., Cabcan S., Siplon L. M., Madrid G. C., Bucol A., Polidoro B. Microplastics in marine sediments and rabbitfish (*Siganus fuscus*) from selected coastal areas of Negros Oriental, Philippines. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, no. 150, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110685.
9. Cheung P. K., Cheung L. T. O., Fok L. Seasonal variation in the abundance of marine plastic debris in the estuary of a subtropical macroscale drainage basin in South China. *Science of The Total Environment*, 2016, no. 562, pp. 658–665, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.048.
10. Costanza R., de Groot R., van der Ploeg S., Anderson S. J., Kubiszewski I., Farber S. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, no. 26, pp. 152–158, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002
11. Dris R., Gasperi J., Rocher V., Saad M., Renault N., Tassin B. Microplastic contamination in an urban area: A case study in Greater Paris. *Environmental*



- Chemistry*, 2015, no. 12(5), pp. 592–599, doi: 10.1071/EN14167.
12. Groh K. J., Backhaus T., Carney-Almroth B., Gueke B., Inostroza P. A., Lennquist A., et al. Overview of known plastic packaging associated chemicals and their hazards. *Science of The Total Environment*, 2018, no. 651, pp. 3253–3268, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.015.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Баранова Антоніна Олегівна** – доктор філософії в галузі екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ст. викладач кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1079-7856; e-mail: baranova647@gmail.com.

**Antonina Baranova** – PhD, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior lecturer at the Chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1079-7856; e-mail: baranova647@gmail.com.

**Новожилова Тетяна Борисівна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Хімічна техніка та промислова екологія»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2551-6954; E-mail: Tetiana.Novozhylova@khp.edu.ua

**Tatiana Novozhilova** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", associate professor at the Chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2551-6954; E-mail: Tetiana.Novozhylova@khp.edu.ua

**Літовка Анна Ігорівна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка кафедри «Хімічна техніка та промислова екологія»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-3445-4882; E-mail: Anna.Litovka@mit.khp.edu.ua

**Anna Litovka** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student at the Chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3445-4882; E-mail: Anna.Litovka@mit.khp.edu.ua

**Білоусов Максим Віталійович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри «Хімічна техніка та промислова екологія»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-7030-5526; E-mail: Maksym.Bilousov@mit.khp.edu.ua

**Maksim Bilousov** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student at the Chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-7030-5526; E-mail: Maksym.Bilousov@mit.khp.edu.ua

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

Баранова А. О., Новожилова Т. Б., Літовка А. І., Білоусов М. В. Проблема забруднення світового океану пластиківими відходами. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 69-73. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.10.

*Please cite this article as:*

Baranova A., Novozhilova T, Litovka A., Bilousov M. The problem of plastic waste pollution in the World Ocean. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2 (12), pp. 69-73, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.10.

*Надійшла (received) 08.06.2022*

УДК 666.972

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.11

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСІВ СЕПАРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛА ВІДХОДЯЩИХ ГАЗІВ

**В. С. ВИТЯГАНЕЦЬ, В. Б. БАЙРАЧНИЙ, І. В. ПІТАК, А. О. БАРАНОВА\***

кафедра Хімічна техніка та промислова екологія, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА  
\*e-mail: baranova647@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Корисне використання тепла насамперед пов'язане з використанням тепла відхідних газів. Слід підкреслити, що у всіх випадках необхідно прагнути повернути технологічному процесу максимальну кількість тепла газів, що відходять. Частина тепла зазвичай повертають до робочої камери з підігрітим повітрям (до 300 – 500 °С). В окремих випадках можливе використання деякої кількості тепла газів для підсушування і нагріву сировини, готового продукту та/або підігріву технологічної води, що надходить на переробку; використання тепла газів для вироблення пари тих чи інших параметрів, для необхідного нагрівання дуття. Все це відкриває можливість досягнення дуже високих кінцевих показників енергетичних установок. Однак, як правило, гази, що відходять, характеризуються досить високими концентраціями дрібнодисперсних твердих частинок (дрібнодисперсні виноси), які необхідно ефективно видалити в сепараторі оскільки в більшості випадків вони перешкоджають ефективному використанню тепла газів, що відходять. Таким чином, ефективна сепарація дрібнодисперсного винесення має вирішальне значення для утилізації тепла газів, що відходять, особливо для високопродуктивних агрегатів. На підставі відомих літературних даних та результатів власних експериментів, розглянуто деякі питання сепарації дрібнодисперсного виносу. Сформульовано основи механізму сепарації, які зводяться до з'ясування причин та закономірностей руху дрібних частинок до сепаруючої поверхні поперек основного потоку. Детально проаналізовано механізми сепарації дрібних частинок за рахунок турбулентної дифузії та оцінено можливість реалізації механізму сепарації на основі термофорезу. Встановлено визначальні параметри та критерії, що характеризують процес сепарації частинок. Виведено формули для оцінки стікання сепарації частинок та проаналізовано вплив визначальних критеріїв на цю величину. В результаті аналізу наведених даних зроблено практичні висновки про шляхи інтенсифікації процесів сепарації у промислових умовах.

**Ключові слова:** сепарація дрібних частинок; механізм сепарації; інтенсифікація процесу сепарації

## INVESTIGATION OF THE INTENSIFICATION OF SEPARATION PROCESSES USING THE HEAT OF EXHAUST GASES

**V. VYTYAHANETS, V. BAIRACHNYI, I. PITAK, A. BARANOVA**

Department of chemical engineering and industrial ecology, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The useful use of heat for the above cases is primarily related to the use of heat from the exhaust gases. It should be stressed that in all cases it is necessary to return the maximum amount of waste heat to the process. Part of the heat is usually returned to the working chamber with heated air (up to 300 - 500 °C). In some cases, it is possible to use a certain amount of gas heat for drying and heating the raw material, the finished product and/or for heating the process water used in the processing; the use of heat from gases to produce steam and other parameters for the necessary heating of the blast furnace. All of this opens up the possibility of achieving very high end results for energy plants. However, as a rule, the exhaust gases are characterized by fairly high concentrations of fine solid particles (fine removals), which must be effectively removed in the separator because in most cases they prevent the efficient use of heat from the exhaust gases. Thus, efficient separation of fine removal is crucial for heat recovery of exhaust gases, especially for high-performance units. The ways to intensify the separation processes in industrial waste were investigated and made practical conclusions. Based on known literature data and results of own experiments, some questions of separation of fine removal are considered. The basics of the separation mechanism are formulated, which are reduced to elucidating the causes and patterns of movement of small particles to the separating surface across the main stream. The mechanisms of separation of small particles due to turbulent diffusion are analyzed in detail, the possibility of realization of the mechanism of separation on the basis of thermophoresis is estimated. The initial parameters and criteria that characterise the particle separation process have been established. A formula for assessing the particle separation rate is derived and the effect of the specified criteria on this value is analyzed. The analysis of the above data resulted in practical conclusions on ways to intensify the separation processes under industrial conditions.

**Keywords:** separation of fine particles; separation mechanism; intensification of the separation process

### Вступ

Високотемпературні вогнетехнічні процеси є виробничою основою таких провідних галузей

промисловості, як чорна металургія, важке машинобудування, переробка нафти та газу, виробництво будівельних матеріалів: цементу, скла. Велике значення мають вони при отриманні

мінеральних добрив, наповнювачів у вигляді оксидів та ниткоподібних кристалів різного хімічного складу та структури та звичайно для хімічної промисловості.

Останнім часом високотемпературні виробничі процеси зайняли одне з головних місць у паливному балансі країни. У цьому загальне масове споживання палива цехами і заводах, вищевказаних галузей вимірюється багатьма сотнями і тисячами тон, що значно перевищує теплові потужності сучасних електростанцій. Поряд з цим, коефіцієнт використання тепла палива, яке витрачається на сам виробничий процес, становить, з урахуванням гранично розвиненої регенерації, величину дуже невелику: 15 – 20 % для камерних та ванних печей та 35 – 40 % для великих методичних нагрівальних та найбільш економічних шахтних печей. Ці низькі ККД продуктивних вогнетехнічних процесів невикладкові. Вони термодинамічно немінучі і викликані потрібним високим температурним рівнем процесів. В даному випадку мірою температурного рівня процесу вважається температура, що видається технологічного продукту. Усе це і визначає першу важливу причину необхідності тієї чи іншої комбінування промислової вогнетехніки з енергетикою.

### Мета роботи

Метою дослідження є розглянути шляхи інтенсифікації процесів сепарації у промислових відходах та зробити практичні висновки.

### Виклад основного матеріалу

До особливостей дрібнодисперсних частинок слід розвинути питому поверхню та здатність коагулювати навіть у твердому стані. Такі частки легко йдуть разом із струменем газу і схильні до хаотичного (броунівського) руху.

Вивчення механізму сепарації, зводиться тут, в основному, до з'ясування причин і закономірностей руху дрібних частинок до поверхні, що сепарує, поперек основного газового потоку. На дрібні частинки, у загальному випадку, можуть діяти сили тяжкості, в'язкості, броунівські, радіометричні, електростатичні та інші. Сили тяжкості та інерції тут мізерно малі і, практично не впливають на рух частинок. Тому ними зазвичай нехтують.

Розглянемо механізм сепарації дрібнодисперсних частинок за рахунок турбулентної дифузії. У цьому випадку, в результаті поперечного турбулентного масообміну, концентрація частинок перерізу турбулентного ядра потоку вирівнюється. Основною перешкодою на шляху руху частинок до стінки, що сепарує є прикордонний дифузійний шар.

За гіпотезою Тейлора і Прандтля [1], дифузійний шар  $\delta_d$ , збігається з ламінарним прикордонним шаром  $\delta_l$ , на межі яких коефіцієнти

молекулярної та турбулентної в'язкості рівні. Турбулентні пульсації не проникають всередину ламінарного шару, і частинки рухаються до стіни за рахунок молекулярної дифузії. Згідно з теорією Ландау і Левіга [2], що точніше відображає дійсність, турбулентні пульсації проникають у ламінарний прикордонний шар і загасають лише біля самої поверхні, де є дифузійний підшар, в якому молекулярна дифузія переважає над турбулентною. На межі дифузійного шару збігаються коефіцієнти молекулярної та турбулентної дифузії. Для аерозолів, товщина дифузійного шару значно менша за прикордонний ламінарний шар  $\delta_d/\delta_l \approx 0,57/Sc^{1/4}$ , де критерій Шмідта для аерозолів  $Sc \ll 1$ .

Можна припустити помітну роль сил інерції у сепарації дрібнодисперсних аерозолів. Незважаючи на повне збільшення частинок діаметром 25 мкм і дрібнішими за турбулентні пульсації, можливо, що поблизу стінки, навіть на вельми дрібнодисперсні частинки (1 – 5) мкм діють значні інерційні сили, які можуть викликати їх сепарацію [3]. На відміну від макроінерційних сил, зумовлених зміною величини та напрямки середньої швидкості при обтіканні тіла, виникнення мікроінерційних сил можливе за рахунок дрібномасштабних перпендикулярних стінок вихорів високої інтенсивності, що спостерігаються на відстані від поверхні порядку декількох мікрон. При зменшенні масштабу пульсацій, їх прискорення збільшується і може бути причиною появи мікроінерційних сил в аерозолях.

Викладені найбільш ймовірні гіпотези про механізм сепарації не мають, доки, достовірного експериментального підтвердження, і тому механізм сепарації мілкодисперсних частинок з турбулентного потоку не цілком зрозумілий.

З огляду на велику складність явища, до нашого часу, аналітично не отримані загальні закономірності сепарації дрібнодисперсних частинок. Найвні досвідчені дані недостатні, а часто суперечливі.

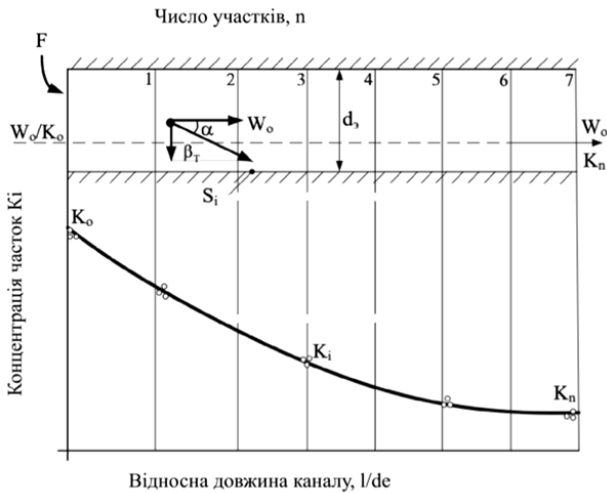
Для сепарації дрібнодисперсних частинок на стінках каналу можна вивести такі загальні залежності. На рис. 1 представлена принципова схема зміни концентрації частинок по довжині каналу сепарації.

Відповідно до рис. 1 та розрахунків ступеня сепарації на  $i$ -тій ділянці каналу буде:

$$\eta_i = \frac{\Delta G_i}{G_0} = \frac{\beta T \cdot S_i \cdot K_{i-1}}{W_0 \cdot F \cdot K_0} = \frac{\beta T}{W_0} \cdot \frac{S_i}{F} \cdot (1 - \sum_{i=1}^u \eta_{i-1}) \quad (1)$$

$$\eta = \sum_{i=1}^u \eta_i = \frac{\beta T \cdot S}{W_0 \cdot F} \cdot \sum_{i=1}^u \frac{K_{i-1}}{K_0} \cdot \frac{\beta T \cdot S}{W_0 \cdot F} \cdot (1 - \sum_{i=1}^u \eta_{i-1}) \quad (2)$$

У рівняннях 1, 2  $G_0$ ,  $\Delta G_i$  – масова витрата аеродинамічного потоку на вході та його зміна на  $i$ -тій ділянці;  $\beta T$  – коефіцієнт масопереносу аерозолію.



$F$  – поперечний переріз каналу,  $d_e$  – еквівалентний діаметр каналу,  $S$  – сепаруюча поверхня,  $l$  – довжина каналу,  $W_0$  – лінійна швидкість аеродинамічного потоку,  $K_i$  – концентрація аерозолу в потоці,  $n$  – число ділянок розбиття каналу

Рис. 1 – Принципова схема виведення загальної залежності сепарації дрібних частинок

Отримана залежність показує, що ступінь сепарації зростає зі збільшенням ступеня відносного розвитку сепаруючих поверхонь  $S/F$  та критерію Маргулісу  $\beta_T/W_0$ , що характеризує інтенсивність сепарації. Геометрична інтерпретація критерію Маргуліса (рис. 1) зводиться до відношення векторів середньої статичної швидкості руху частинок уперекресток потоку та швидкості потоку вздовж поверхні та характеризується кутом:

$$\alpha = \arctan \frac{\beta_T}{W_0} \quad (3)$$

Аналіз диференціальних рівнянь руху несучого потоку газів Нав'є-Стокса, нерозривності Ейлера, дифузія частинок у потоці несучого середовища та крайових умов [4] дозволив нам виділити систему критеріїв, що характеризують сепарацію дрібнодисперсних частинок. Визначальними критеріями є: критерій Рейнольдса

$$Re_0 = \frac{w_0 \cdot d_e}{\nu_0}; \frac{K}{K_0}; \frac{S}{F} \text{ та визначальні критерії Ейлера}$$

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho_0 \cdot W_0^2} \text{ та Маргуліса } \beta_T/W_0$$

Останньому критерію рівнозначні критерії

$$\text{Шмідта } S_c = \frac{\nu_0}{D} \text{ або } \frac{D}{W_0 \cdot l_0} = \frac{\beta_T}{W_0} \cdot \frac{\delta}{l_0}$$

Як впливає з літературних джерел [4-6], якщо на вході в канал здійснюється осесиметричний рух з обертанням потоку поряд із критерієм Рейнольдса, визначальним критерієм є критерій та фактор початкової закрутки потоку  $\Phi = \frac{W_0}{U_0}$ , де  $U_0$  – характерна осьова швидкість на виході із завихрювача

(пристрою, що закручується) і відповідно тиск. У цьому випадку спостерігається сильний вплив поля відцентрових сил на поля інтенсивності пульсації та інших характеристик турбулентності. Причому цей вплив залежить від профілю середньої швидкості. У разі обертання, за законом твердого тіла, відцентрові сили надають стабілізуючий вплив пульсацій швидкості та температури. Навпаки, при інтенсивній закрутці, поле відцентрових сил інтенсифікує пульсаційний рух і процеси переносу. Таким чином, в останньому випадку за рахунок обертання потоку в сепараційній камері, при певних параметрах закрутки, потоки можна істотно збільшити коефіцієнт перенесення  $\beta_T$  у 2 – 3 рази.

На рис. 2 температура потоку – 400 °С,  $W_0 = 10$  м/с [7,8].

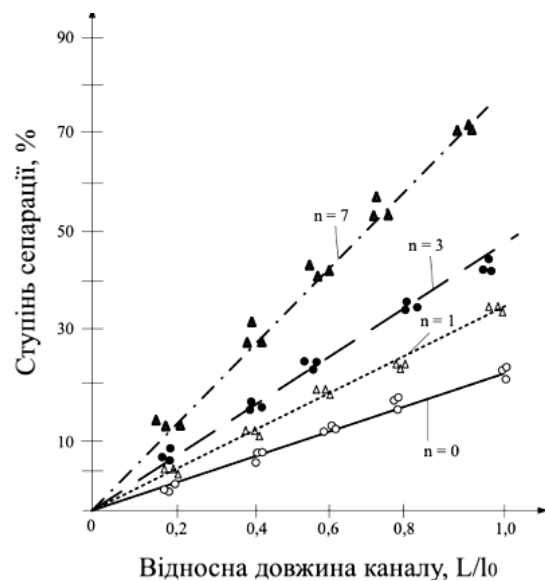


Рис. 2 – Досвідчена залежність сепарації за довжиною каналу

На рис. 3 наведена дослідна залежність сумарної сепарації від ступеня розвитку сепаруючих поверхонь для  $Re_0 = 2 \cdot 10^4 \div 10^6$  і тих самих частинок та умов, характеристика яких дана на рис. 2.

В результаті обробки дослідних даних отримано залежності для сепарації в каналах дрібнодисперсних частинок в діапазоні  $Re_0 = 2 \cdot 10^4 \div 10^6$ .

$$\eta = \sum_{i=1}^n \eta_i \approx 4,0 \left(\frac{1}{d_e}\right)^{0,7} \quad (4)$$

$$\eta = 2,1 \frac{S}{S_0} \cdot Re^{1/3} \quad (5)$$

Сепарація по довжині каналу згасає через зниження концентрації частинок в потоці. Турбулізація потоку (зростання  $Re$ ) та закрутка інтенсифікують процес.

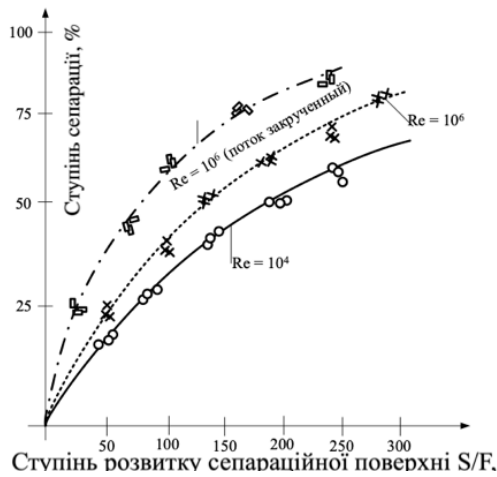


Рис.3 - Залежність сепарації від рівня розвитку поверхні сепарації

У літературних даних, практично відсутні дані і вплив температури потоку на процес сепарації. Взагалі, зміна в'язкості та щільності потоку з температурою, очевидно, вплине на сепарацію частинок. Збільшення в'язкості частинок несучого потоку  $\mu_0$ , мабуть, призведе до погіршення сепарації внаслідок зростання сил в'язкості опору руху частинок до стінки. З певністю це важко стверджувати, оскільки не з'ясована залежність критерію Маргуліса від в'язкості несучого середовища. З огляду на це нами наведено дані про вплив температури потоку на ступінь сепарації при використанні частинок з різними розмірами (рис. 4).

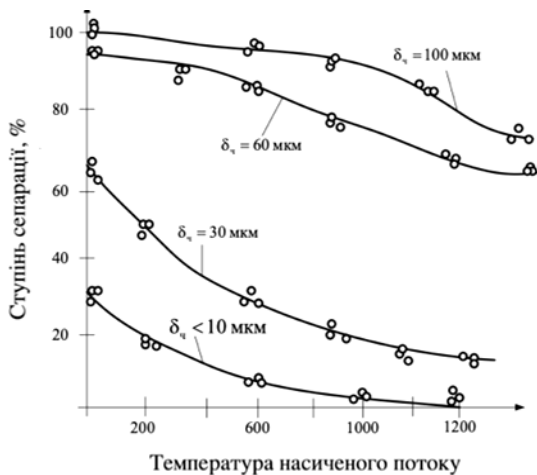


Рис. 4 – Розрахункова зміна ступеня інерційної сепарації частинок від температури несучого потоку за досвідченими даними [9] при поперечному обтіканні циліндра  $D = 100$  мм,  $\rho_{\text{зод}} = 2,5$  г/см<sup>3</sup>  $Wo = 10$  м/с

Як випливає з наведених даних, при інерційній сепарації з підвищенням температури ступінь сепарації різко знижується, навіть для часток з розміром  $\sim 100$  мкм. Як впливатиме структура потоку при його проходженні через сепаратор за різних

початкових умов на показник ступеня сепарації при різних температурах несучого середовища не ясно, хоча, мабуть, тенденція, представлена в роботі [9] буде дотримуватися. Тому, розглянемо вплив та вплив на процес деяких додаткових сил, наприклад, термофорезу [10]. Сила термофорезу виникає при вплив молекул газу з нерівномірно нагрітою частинкою аерозолі. Механізм виникнення цієї радіометричної сили суттєво залежить від величини відношення діаметра частинок  $\delta_{\text{год}}$  до середньої довжини вільного пробігу молекул  $l$ . Остання залежить від температури і тиску газу і має величину близько десятків часток мікрона  $l = 0,1 \div 0,6$  мкм. У всіх випадках, сила термофорезу, має реактивний характер, і виникає в результаті того, що від більш нагрітої сторони частинки молекул газу відлітають з більшою швидкістю, ніж від менш нагрітої сторони, тому повідомляють імпульс частинці у бік зменшення температури. З погляду сепарації промислових уносів, дослідників мало цікавлять частки розміром  $\delta_{\text{ч}} \ll 1$ , оскільки їхня незначна кількість. Сепарація частинок розміром  $\delta_{\text{ч}} \gg 1$  відбувається переважно з допомогою сил інерції, котрий іноді тяжкості, і тому, додаткова зовнішня сила термофорезу б'є по русі великих частинок, зовсім незначно. Практичне значення ця сила має для інтенсифікації сепарації частинок розміром від  $1 \div 5$  мкм, які є проміжними між крайніми межами. Ця можливість може бути особливо вдало реалізована в умовах високошвидкісних потоків, що обертаються, в яких значна кількість дрібнодисперсного віднесення високотемпературний рівень процесу. Останнє визначає наявність градієнта температур у частках, що потрапили до ламінарного прикордонного шару газу. Для частинок, порівнянних з довжиною вільного пробігу молекул газу, Хетнер [3] запропонована емпірична інтерполяційна формула для сили термофорезу:

$$F_{\text{ТФ}} = - \frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot \delta_{\text{ч}}^2}{\frac{2M \cdot P \cdot \delta_{\text{ч}}}{3R \cdot g \cdot \mu_0} + \frac{24 \cdot \mu_0 \cdot T}{\alpha \cdot P \cdot \delta_{\text{ч}}}} \cdot \text{grad}T \quad (6)$$

де  $M$  – молекулярна маса газу;  $R$  – Універсальна газова постійна,  $R = 8,31$ ;  $\mu_0$  – динамічна в'язкість при відповідній температурі та тиску;  $T$  – температура газу;  $P$  – тиск газу;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81$ ;  $\delta_{\text{год}}$  – розмір часток;  $\pi$  – математична постійна,  $\pi = 3,14$ .

З рівності сил термофорезу та опору середовища отримуємо швидкість руху частинок до сепараційної поверхні:

$$V = \frac{K \cdot \delta_{\text{ч}}^2 \cdot \text{grad}T}{\frac{2M \cdot P \cdot \delta_{\text{ч}}^2}{R \cdot g \cdot \mu_0} + \frac{72 \cdot \mu_0 \cdot T}{\alpha \cdot P}} \quad (7)$$

де коефіцієнт:  $K = 1 + 2A \cdot \frac{1}{\delta_{\text{ч}}} + 2Q \cdot \frac{1}{e} \cdot \frac{-b\delta_{\text{н}}}{21}$  залежить від характеру взаємодії газових молекул із поверхнею частинок від розміру частинок [3].

Аналітичний розрахунок сепарації під дією сил термофорезу надзвичайно утруднений, зокрема через практичну неможливість розрахунку величин  $\text{grad}T$  і  $d$  для частинки, що сепарується [11]. Тим не менш, при збереженні параметрів аеродинамічного потоку ( $P$ ,  $T$ ) можлива організація його сепараційного очищення, наприклад, при послідовному відділенні великих фракцій у циклонах, а потім дрібнодисперсного винесення у вихровій трубі або ротоклоні. Для інтенсифікації сепарації можна використовувати здатність частинок віднесення набувати електричний заряд при проходженні зони високих температур. При цьому може виникнути електростатичне поле в аерозолі, напруженість якого можна порівняти з полем в електрофільтрах [12]. Однак це явище мало досліджено і вимагає подальшого вивчення.

### Обговорення результатів

Сформульовано основи механізму сепарації, які зводяться до з'ясування причин та закономірностей руху дрібних частинок до сепаруючої поверхні поперек основного потоку. Докладно проаналізовано механізми сепарації дрібних частинок за рахунок турбулентної дифузії, оцінено можливість реалізації механізму сепарації на основі термофорезу. Встановлено визначальні параметри та критерії, що характеризують процес сепарації частинок. Виведено формули для оцінки стикання сепарації частинок та проаналізовано вплив визначальних критеріїв на цю величину. В результаті аналізу наведених даних зроблено практичні висновки про шляхи інтенсифікації процесів сепарації у промислових умовах.

### Висновки

В даний час є очевидними наступні шляхи збільшення ступеня сепарації дрібнодисперсних частинок:

1. розвиток сепаруючих поверхонь (S/F) в каналних сепараторах відповідної конструкції та інтенсифікація в них турбулентного масообміну, у тому числі за рахунок закрутки потоків;

2. після відокремлення великих фракцій доцільно використовувати додаткові зовнішні сили: термофорезу, електростатики, електромагнетизму та ін. що дозволить у секціонованому сепараторі забезпечити високий ступінь сепарації результуючого потоку на виході;

3. забезпечення примусової коагуляції частинок за рахунок їх інтенсивного зіткнення в потоці, що рухається (за допомогою ультразвуку) і потім використання принципів інерційної сепарації.

Ці рекомендації за наявності фізико-хімічної інформації про конкретну аеродисперсну систему, що подається на очищення, дозволяють принаймні створювати укрупнені демонстративні установки, на

яких при дослідженнях уточнюються основні критерії та полегшується масштабування установок.

### Список літератури

1. Глазков В. В. *Техническая газодинамика*. Учебное пособие. Издательство «Лань», 2018. 108 с.
2. Pahija E., Golshan S., Blais B. Perspectives on the process intensification of CO<sub>2</sub> capture and utilization. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2022. Vol. 176, № 3. P. 67-89. doi: 10.1016/j.cep.2022.108958.
3. Cesari L., Castel C., Favre E. Membrane contactors for intensified gas-liquid absorption processes with physical solvents: A critical parametric study. *Journal of Membrane Science*. 2021. Т. 635. P. 119-134. doi: 10.1016/j.memsci.2021.119377.
4. Shaporev V., Pitak I., Pitak O., Briankin S. Investigation of the functioning of a vortex tube in supply of disperse flow (gas – dustparticles) to the tube. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2017. Vol 4, № 10 (88). P. 51-60. doi: 10.15587/1729-4061.2017.108424.
5. Халатов А. А., Авраменко А. А., Шевчук И. В. *Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил*: в 4-х т. Киев: Ин-т техн. Теплофизики НАН Украины, 2010. Т. 3: *Закрученные потоки*. 474 с.
6. Veretennikov S. V., Barinov S. N. Experimental investigation of heat transfer energy separation chambers of the vortex tube. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2015. 14 (2). P. 44-51. doi:10.18287/2412-7329-2015-14-2-44-51.
7. Piralishvily S. A., Veretennikov S. V. Vortex effect and intensification of heat and mass transfer energy technology. *Vestnik of Samara University. Aerospace And Mechanical Engineering*. 2011. № 3-1 (27). P. 241-247.
8. Bogomolov A. On Inertial Systems, Dust Cleaning and Dust Removal Equipment, and Work Areas in the Production of Aerated Concrete from the Hopper Suction Apparatus CSF. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 2036-2041. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.290.
9. Chelnokov A. A. *Inzhenernye metody ohrany atmosfernogo vozduha*. Vysheyschaya shkola, 2016. 397 p.
10. Thakare H. R. Experimental, computational and optimization studies of temperature separation and flow physics of vortex tube: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 52. P. 1043-1071. doi: 10.1016/j.energy.2015.03.058.
11. Guo X., B. Zhang. Computational investigation of precessing vortex breakdown and energy separation in a Ranque – Hilsch vortex tube. *International Journal of Refrigeration*. 2018. Vol. 85. P. 42-57. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.09.010.
12. Akhmetov D. G. Swirl flow in vortex chamber. *Science Bulletin*. 2015. Vol. 6, Issue 4. P. 109 – 120. doi: 10.17117/nv.2015.04.109.

### References (transliterated)

1. Glazkov V. V. *Tekhnicheskaya gazodinamika*. Uchebnoe posobie. Izdatelstvo «Lan». 2018. 108 p.
2. Pahija E., Golshan S., Blais B. Perspectives on the process intensification of CO<sub>2</sub> capture and utilization. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2022, Vol. 176, 3, pp. 67-89, doi: 10.1016/j.cep.2022.108958.
3. Cesari L., Castel C., Favre E. Membrane contactors for intensified gas-liquid absorption processes with physical

- solvents: A critical parametric study. *Journal of Membrane Science*, 20221, Vol. 635, pp. 119-134, doi: 10.1016/j.memsci.2021.119377.
- Shaporev V., Pitak I., Pitak O., Briankin S. Investigation of the functioning of a vortex tube in supply of disperse flow (gas – dustparticles) to the tube. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2017, Vol. 4, 10 (88), pp. 51-60. doi: 10.15587/1729-4061.2017.108424.
  - Halatov A. A., Avramenko A. A., Shevchuk I. V. *Teploobmen i gidrodinamika v polyah centrobezhnih massovih sil: v 4-h t. Kiev. In-t tehn. Teplofiziki NAN Ukraini*, 2010. T. 3: *Zakruchennye potoki*. 474 s.
  - Veretennikov S. V., Barinov S. N. Experimental investigation of heat transfer energy separation chambers of the vortex tube. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*, 2015, 14 (2), pp. 44-51, doi:10.18287/2412-7329-2015-14-2-44-51.
  - Piralishvily S. A., Veretennikov S. V. Vortex effect and intensification of heat and mass transfer energy technology. *Vestnik of Samara University. Aerospace And Mechanical Engineering*, 2011, 3–1 (27), pp. 241–247.
  - Bogomolov A. On Inertial Systems, Dust Cleaning and Dust Removal Equipment, and Work Areas in the Production of Aerated Concrete from the Hopper Suction Apparatus CSF. *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 150, pp. 2036–2041, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.290.
  - Chelnokov A. A. *Inzhenerye metody ohrany atmosfernogo vozduha. Vyssheshayashkola*, 2016. 397 p.
  - Thakare H. R. Experimental, computational and optimization studies of temperature separation and flow physics of vortex tube: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, Vol. 52, pp. 1043–1071, doi: 10.1016/j.energy.2015.03.058.
  - Guo X., Zhang B. Computational investigation of precessing vortex breakdown and energy separation in a Ranque – Hilsch vortex tube. *International Journal of Refrigeration*, 2018, Vol. 85, pp. 42-57, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.09.010.
  - Akhmetov D. G. Swirl flow in vortex chamber. *Science Bulletin*, 2015, Vol. 6, Issue 4, pp. 109–120, doi: 10.17117/nv.2015.04.109.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Витяганець Валентин Сергійович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-3314-6917, e-mail: Valentyn.Vytiahanets@mit.khpi.edu.ua

**Valentin Vytiaganets** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", post-graduate student at the chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3314-6917, e-mail: Valentyn.Vytiahanets@mit.khpi.edu.ua

**Байрачний Володимир Борисович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор, кандидат технічних наук, професор кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-8397-3489; E-mail: bairachniyvb@gmail.com E-mail: bairachniyvb@gmail.com

**Volodymyr Bairachnyi** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor, associate professor at the Chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8397-3489; E-mail: bairachniyvb@gmail.com

**Пітак Інна Вячеславівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5073-2942, e-mail: Inna.Pitak@khpi.edu.ua

**Inna Pitak** – PhD, associate professor, National Polytechnic University "Kharkiv Polytechnic Institute", associate professor at the Chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5073-2942, e-mail: Inna.Pitak@khpi.edu.ua

**Баранова Антоніна Олегівна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доктор філософії в галузі екології, ст. викладач кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1079-7856; e-mail: baranova647@gmail.com.

**Antonina Baranova** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", PhD, senior lecturer at the Chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1079-7856; e-mail: baranova647@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Витяганець В. С., Байрачний В. Б., Пітак І. В., Баранова А. О. Дослідження інтенсифікації процесів сепарації з використанням тепла відходящих газів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 74-79. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.11.

*Please cite this article as:*

Vytiaganets V., Bairachnyi V., Pitak I., Baranova A. Investigation of the intensification of separation processes using the heat of exhaust gases. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2(12), pp. 74–79, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.11.

*Надійшла (received) 17.05.2022*

УДК 681.518.22

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.12

## РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ СЕРЕДОВИЩА ПРИ РОЗВЕДЕННІ КРЕВЕТОК

I. В. ГРИГОРЕНКО\*, С. М. ГРИГОРЕНКО

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА  
\*e-mail: grigmaestro@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** На сьогодні інформаційно-вимірювальні системи використовуються практично в усіх галузях промисловості, де необхідно не тільки проводити вимірювання параметрів об'єкту контролю, але й впливати на процес у об'єкті з метою своєчасного реагування на зміни параметрів, що контролюються. Слідкування за змінами параметрів об'єкту контролю є актуальною задачею сучасної вимірювальної техніки. При розробленні інформаційно-вимірювальної системи, що виконує збір, оброблення та передачу інформації, одним із головних завдань є підтримка метрологічної надійності такої системи та її економічної доцільності. Інформаційно-вимірювальна система повинна бути конкурентоздатною у порівнянні з існуючими аналогами. Одним з перспективних напрямів підвищення метрологічної надійності є використання сучасних високоточних первинних вимірювальних перетворювачів, оскільки саме аналогова частина вимірювального каналу вносить найбільший внесок у сумарну похибку вимірювання. У статті запропоновано розроблення системи контролю параметрів середовища при розведенні креветок на підставі сучасної елементної бази, що дозволяє не тільки з високою точністю вимірювати параметри мікроклімату у резервуарі з креветками, але й впливати на об'єкт контролю завдяки виконавчим пристроям. Ці пристрої вмикають при необхідності системи підігріву та аерації води. Визначення необхідності впливати на середовище визначається завдяки операції «порівняння поточного значення параметру контролю з встановленим значенням». Дана операція можлива завдяки програмному продукту, що завантажується у мікроконтролер. У статті представлена структурна схема розробленої інформаційно-вимірювальної системи, електрична-принципова схема та аналіз похибок по каналах вимірювання. Зазначено, що похибка вимірювань по кожному з каналів не перевищує 1,5%.

**Ключові слова:** інформаційно-вимірювальна система; система контролю; креветки; похибка

## DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MONITORING THE PARAMETERS OF THE ENVIRONMENT DURING SHRIMP BREEDING

I. HRYHORENKO\*, S. HRYHORENKO

Department of information and measuring technologies and systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Today, information and measurement systems are used in almost all industries where it is necessary not only to measure the parameters of the object of control, but also to absorb the process in the object, in order to respond in a timely manner to changes in controlled parameters. Monitoring changes in the parameters of the object of control is an urgent task of modern measuring technology. When developing an information and measurement system that performs the collection, processing and transmission of information, one of the main tasks is to maintain the metrological reliability of such a system and its economic feasibility. The information and measurement system must be competitive in comparison with existing analogues. One of the promising ways to increase metrological reliability is the use of modern high-precision primary measuring transducers, as it is the analog part of the measuring channel that makes the largest contribution to the total measurement error. The article proposes to develop a system of control of environmental parameters in shrimp breeding on the basis of modern element base, which allows not only to measure with high accuracy the microclimate parameters in the shrimp tank, but also to influence the object of control through actuators. These devices switch on the water heating and aeration system if necessary. Determining the need to influence the environment is determined by the operation "comparison of the current value of the control parameter with the set value". This operation is possible thanks to the software product that is loaded into the microcontroller. The article presents a block diagram of the developed information and measurement system, electrical schematic diagram and analysis of errors in measurement channels. It is noted that the measurement error on each of the channels does not exceed 1.5%.

**Keywords:** information measuring system; control system; shrimp; error

### Вступ

Креветки мають велике промислове значення. Близько 300 видів становлять економічну цінність. Частка креветок становить 70 % від кількості всіх ракоподібних, яких виловлюють для споживання. Природоохоронні організації потребують скоротити

вилов креветок та модернізувати засоби лову, тому є необхідність вирощувати креветку на спеціально підготовлених фермах. Такий підхід надасть можливість зберегти природню популяцію креветки та задовольнить потреби населення [1].

Креветки – теплолюбні членистоногі. Для їхньої життєдіяльності потрібно підтримувати



постійну температуру води у зазначених вище межах. Цього непросто досягти з огляду на розміри тварин і, отже, водоймища для їх успішного розмноження.

Креветкові ферми на відкритому повітрі функціонують лише у місцевості із теплим кліматом. Необхідна температура для розмноження – від +22 °С до +26 °С. Вода повинна мати нейтральний рН-баланс і бути трохи м'якою [1]. Тому є необхідність вирощувати креветку на спеціально підготовлених фермах. Це надасть можливість зберегти природно популяцію креветки та задовольнить потреби населення у дуже корисному продукті харчування, оскільки страви з креветок поширені в кухнях багатьох країн світу.

Кожна сучасна ферма з розведення креветок незалежно від масштабів та продуктивності використовує одну з двох популярних сьогодні технологій вирощування:

- біофлок;
- СЗВ (система замкнутого водопостачання).

Біофлок – досить складна технологія, вирощування креветок, відповідно до якої проводиться в особливому водному середовищі, наповненому живильними водоростями, бактеріями, найпростішими, карапаксами та іншими органічними частинками.

Вирощування креветок на Україні найчастіше проводиться за технологією СЗВ, яка відрізняється стійкою якістю води. Вона дозволяє забезпечити прийнятні умови для розвитку молюсків у районах із підвищеною бактеріологічною небезпекою та низькою якістю води. При цьому далеко не кожна ферма-початківець з вирощування креветок може дозволити собі таку систему [1].

Варто зауважити, що основною перевагою СЗВ є підвищений ступінь біологічної безпеки, який безпосередньо пов'язаний, як із стійкістю параметрів якості води, так і стабільністю роботи всієї системи СЗВ. До недоліків системи слід віднести велику початкову вартість установки, а також необхідність вищого рівня технічних знань та досвіду в управлінні системою.

Для автоматизації контролю та підтримки основних параметрів мікроклімату при вирощуванні креветок необхідно розробити спеціалізовану систему контролю, що надасть можливість не тільки контролювати основні параметри але і дозволить оперативна реагувати на їх зміни шляхом вмикання системи аерації і підігріву води. Велике значення при цьому має точність вимірювання і підтримки вказаних параметрів. Особливості побудови систем контролю різного призначення представлені у роботах [2–8]. У вказаних роботах зазначається, що у загальну похибку вимірювання найбільший вклад вносить аналогова частина вимірювального каналу то для забезпечення потрібної точності необхідно використовувати датчики, що мають мінімальну похибку вимірювання.

## Мета роботи

Мета роботи – розроблення системи контролю параметрів середовища при розведенні креветок, а саме: розробка структурної схеми системи, складання алгоритму її роботи; вибір елементної бази та на його основі створення принципової електричної схеми з подальшим аналізом похибок по кожному з каналів вимірювання.

Система повинна вимірювати температуру води у діапазоні від + 17 °С до + 34 °С (температура розмноження + 22 °С до + 26 °С), рівень рН від 7 до 8 одиниць, рівень розчиненого кисню від 4 до 10 мг/л. Похибка вимірювань по кожному з каналів не повинна перевищувати 1,5 %.

Необхідність створення такої системи контролю пов'язана з тим, що для забезпечення розвитку та розмноження креветок треба створити середовище максимально схоже із природним. Для цього потрібен постійний контроль вказаних параметрів та швидка реакція на вихід параметрів за встановлені критичні значення.

## Основна частина

Система контролю параметрів контролю параметрів середовища при розведенні креветок на базі мікроконтролера *ATmega16* (МК) (рис. 1) має три канали вимірювання середовища басейна: перший вимірює рівень рН, другий – температуру води, третій – розчиненого кисню. Датчик рівня *pH* позначений як ПВП1; датчик температури – ПВП2; датчик розчиненого кисню – ПВП3. Система життєзабезпечення креветки складається з нагрівача та аератора води, що вмикається та вимикається за допомогою блока реле. БЖ – блок живлення призначений для забезпечення живлення усіх компонентів системи. ГСІ – генератор синхронізуючих імпульсів виробляє синхроімпульси, необхідні для роботи мікроконтролера. Інтерфейс (ІФ) призначений для обміну даними із зовнішніми пристроями, зокрема з ПЕОМ. Цифровий відліковий пристрій (ЦВП) необхідний для візуального відображення інформації оператору системи. Алгоритм роботи системи наступний: для приведення системи у робочий стан необхідно підключити її до джерела енергії; далі відбувається початкове налаштування мікроконтролера (МК); після настройки МК іде вибір вимірювального каналу й очікування готовності даних з ПВП, після чого виконується зчитування мікроконтролером інформації з трьох первинних вимірювальних перетворювачів; інформація о результатах виміру надходить в оперативний запам'ятовуючий пристрій ОЗП; далі мікроконтролер порівнює поточні дані з уставками; якщо дані відрізняються від встановлених значень, то мікроконтролер дає команду виконавчим пристроям на вмикання, або вимикання системи аерації води і нагрівача води; інформацію про поточне

значення параметру, що контролюється може бути передана до ЕОМ або відображає на цифровому відліковому пристрої; якщо потрібно зробити новий

вимір, вертаємося до вибору вимірювального каналу. Цикл повторюється знову; якщо необхідно припинити роботу приладу, то вимикається живлення.

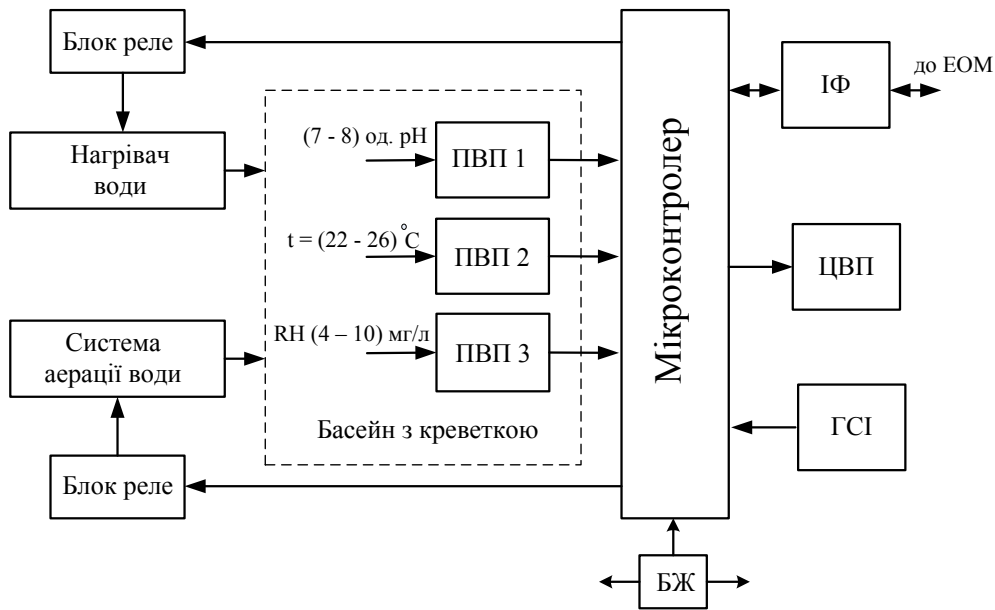


Рис. 1 – Структурна схема системи контролю

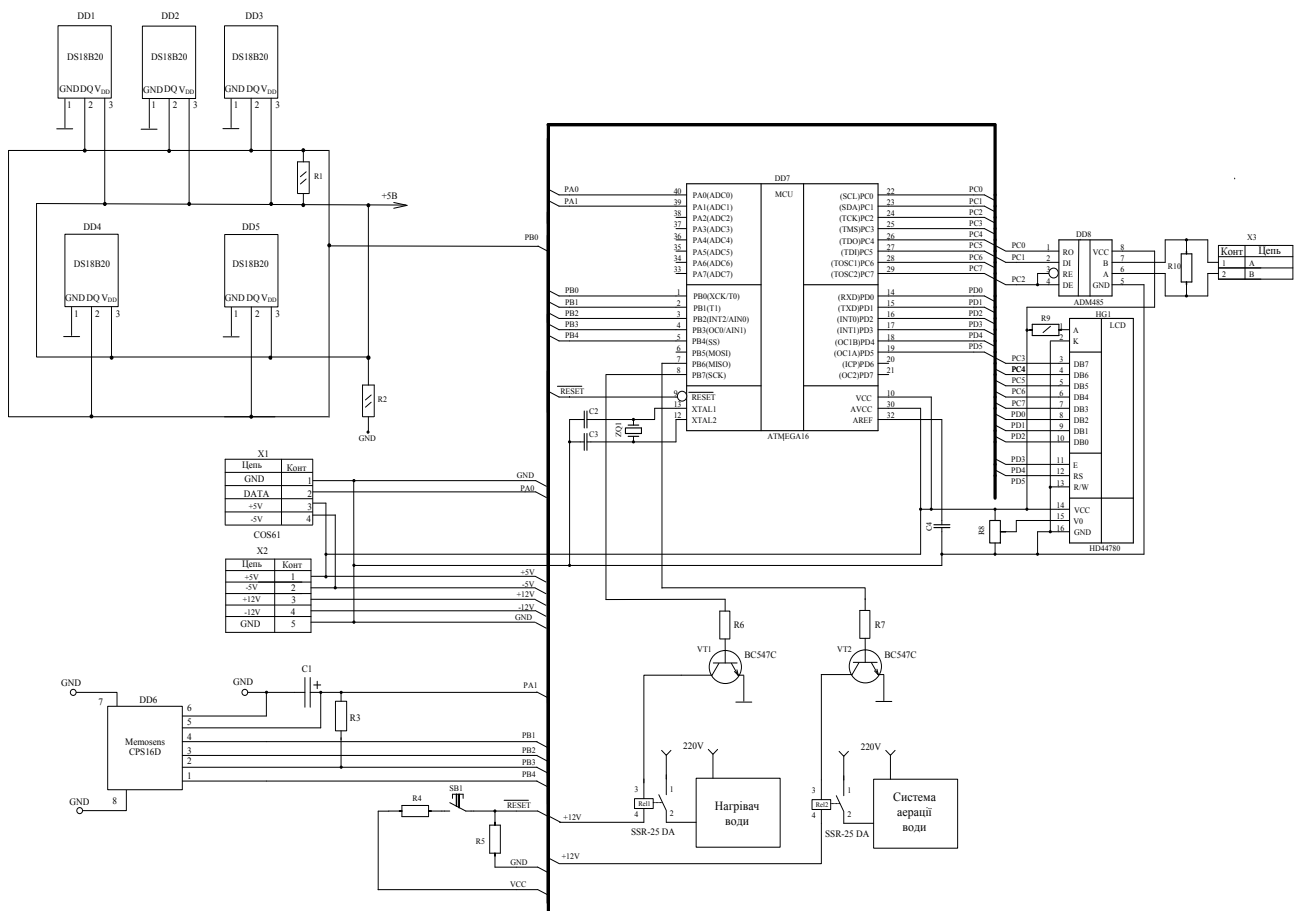


Рис. 2 – Електрична принципова схема системи контролю

Для контролю температури у запропонованій системі використано датчик температури моделі 1-3ФТ фірми ПАТ «ТЕРА» Україна. Це багатозонний термоперетворювач (термопідвіска), що застосовується для контролю температури в резервуарах з рідиною на різній глибині. Монтажна частина термопідвіски виготовлена з іскробезпечної пластикової трубки, хімічно інертної до нафтопродуктів. Сенсори розташовуються усередині трубки на різній глибині. Як сенсори застосовуються сенсори DS18B20 [9].

У якості датчика рівня розчинного кисню обрано датчик *Oxymax COS61*, це високопродуктивний датчиком кисню, що забезпечує швидкі та точні вимірювання. Він підтримує технологічний процес завдяки низьким трудовитратам на техобслуговування, високу доступність і простоту в управлінні. Стійкий флуоресцентний шар на датчику є виключно селективним для кисню (без перешкод), що забезпечує стабільну надійність вимірів [10].

У якості датчика рівня *pH* у басейні з креветкою обрано універсальний цифровий датчик для одночасного вимірювання *pH* і ОВП, що забезпечує поліпшене керування процесами і підвищена якість продукту. Датчик має брудовідштовхуючу діафрагму з *PTFE* для застосування в процесах і середовищах з тривалими стабільними умовами. Завдяки цифровій технології *Memosens, CPS16D* поєднує максимальну цілісність процесу і даних з простотою в експлуатації. Він стійкий до корозії і впливу вологи, забезпечує лабораторну калібрування і спрощує попереджувальне технічне обслуговування [11]. Діапазон вимірювання *pH*: 1...12 *pH* при температурі від - 15 °C до +80 °C.

Електрична принципова схема системи контролю представлено на рис. 2.

Датчик контролю температури води у басейні з креветкою моделі 1-3ФТ представлений мікросхемами *DD1 – DD5*, оскільки він містить п'ять датчиків *DS18B20*. Датчик рівню *pH Memosens, CPS16D* представлений мікросхемою *DD6*, Датчик рівню розчиненого кисню *COS61* підключаються до роз'єднувача *X1*.

До ніжки мікроконтролера *DD7 (PB0)* приєднується інформаційний вихід датчиків температури *DS18B20*. Для створення сигналів обміну з датчиками температури, вихід *PB0* підтягується за допомогою резистора *R1 4,7 кОм* до шини живлення +5 В. Мікроконтролер (*DD7*), реалізований на мікросхемі *Atmega16* [12], здійснює обробку результату вимірювання і передає готовий результат вимірювання на цифровий відліковий пристрій, представлений мікросхемою *HD44780 (HG1)* [13]. Резистор *R8* регулює яскравість рідкокристалічного індикатора.

Оброблений мікроконтролером результат вимірювань, також може передаватися на ПЕОМ

через роз'єднувач *X3*, завдяки стандартному послідовному інтерфейсу *RS485*, який представлено мікросхемою *DD8*. Передбачена можливість ручного скидання мікроконтролера. Скидання здійснюється за допомогою кнопкового перемикача *SB1* з резистивною обв'язкою *R4* та *R5*. Конденсатори *C1* і *C2* задають режим роботи кварцового резонатора *ZQ1*.

Транзистори *VT1, VT2* необхідні для управління роботою реле *SSR-25DA*. Реле вмикають та вимикають (за необхідністю) водонагрівач та систему аерації води.

Живлення схеми здійснюється через роз'єднувач *X2*.

Розроблюваний прилад може працювати в чотирьох режимах:

1) основний – вимірювання з індикацією поточних значень температури, рівня *pH*, рівня розчинного кисню;

2) підключення водонагрівача та системи аерації води;

3) установка/корекція дати й часу;

4) передача даних до ЕОМ.

Загальна похибка системи контролю складається з похибок вимірювальних каналів та їх складових елементів. У розробленій системі контролю джерелами похибки є первинні вимірювальні перетворювачі та АЦП, що вбудований у мікроконтролер.

Розглянемо зазначені джерела похибок.

Похибка датчика температури модель 1-3ФТ у діапазоні: + 22 °C до + 26 °C становить ± 0,5 °C.

Похибка датчика *pH Memosens CPS16D* становить ± 1,0 % від вимірюваного значення.

Похибка датчика розчиненого кисню *COS61* становить ± 0,1 % від вимірюваного значення.

Похибка АЦП убудованого у мікроконтролер *Atmega16* розраховується наступним чином: знаючи, що вхідні напруги вбудованого АЦП при вимірюванні становлять (0 ÷ 5,5) В знайдемо  $U_H$  за формулою

$$U_H = U_{max} - U_{min}; \quad (1)$$

$$U_H = 5,5 - 0 = 5,5 \text{ В.}$$

Вбудований АЦП має 10 розрядів. Розрахуємо похибку квантування при вимірюванні відносної вологості за формулою

$$\Delta_{\text{кв}} = \frac{U_H}{2^n - 1}, \quad (2)$$

де  $n$  – кількість розрядів АЦП.

Підставивши необхідні дані в (2) отримуємо

$$\Delta_{\text{кв}} = \frac{5}{2^{10} - 1} = 0,005 \text{ В.}$$

Відносна похибка АЦП виходить рівною

$$\delta = \frac{\Delta_{\text{кв}}}{U_N} \cdot 100 \% . \quad (3)$$

Підставивши в (2)  $U_N = 5,0 \text{ В}$  [12] отримуємо при вимірюванні

$$\delta_{\text{АЦП}} = \frac{0,005}{5} \cdot 100 \% = 0,1 \% .$$

Всі інші елементи схеми похибки не вносять.

Так як всі складові сумарної похибки можна вважати некорельованими між собою, то вираз для знаходження загальної похибки має вигляд [14]

$$\delta_{\Sigma} = 1,1 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N \delta_i^2} , \quad (4)$$

де  $N$  – кількість складових загальної похибки;  $\delta_i$  – значення складової сумарної похибки;  $1,1$  – коефіцієнт, що залежить від довірчої ймовірності ( $P = 0,95$ ) при числі складових сумарної похибки не більше двох [14].

Сумарна похибка каналу виміру розчиненого кисню Memosens CPS16D

$$\delta_{\Sigma} = 1,1 \cdot \sqrt{1^2 + 0,1^2} = 1,12 \% .$$

Отримані похибки задовольняють умовам технічного завдання, тобто не перевищують  $1,5 \%$ .

### Висновки

Було виконано розроблення системи контролю параметрів середовища при розведенні креветок, що призначена для контролю температури води у басейні, рівня рН, вмісту розчиненого кисню у воді.

У якості мікроконтролера було обрано МК фірми *Atmel* – *ATmega16*, як найбільш потужний, дешевий та маючий у своєму складі убудований аналого-цифровий перетворювач (АЦП).

Було створено структурну та електричну принципову схеми системи, складаний алгоритму її роботи, проведено аналіз похибок, що впливають на результат вимірювань.

Отримані похибки по кожному з каналів вимірювання не перевищують  $1,5 \%$ .

### Список літератури

1. Технологія вирощування креветок. URL: [http://sfera.fm/articles/rybnaya/vyrashchivanie-krevetok-za-tekhnologiei-uzv-budushchee\\_1709](http://sfera.fm/articles/rybnaya/vyrashchivanie-krevetok-za-tekhnologiei-uzv-budushchee_1709) (дата звернення: 22.04.2022).

2. Feldkirchner M., Lutkus C. Process control networking – bridging between process control and information technology. *Conference record of 2019 IEEE IAS Pulp, paper and forest industries conference (ppfic)*. 2019. doi: 10.1109/ppfic43189.2019.9052379.
3. Wang X. H., Zhang Y. M. and Zhang X. Y. AVR fuzzy PID control system based on MCU. *Journal of computational methods in sciences and engineering*. 2019. № 19 (4). pp. 1027–1036.
4. Belozubov E. M., Vasil'ev V. A. and Chernov P. S. Metrological Self-Checking of Smart Sensors of Measurement and Control Systems. *Measurement techniques*. 2018 61 (7). P. 660–669.
5. Dominikowski B., Pacholski K. and Wozniak P. Fuzzy controller surface error in the intelligent automatic gain control system. *Przegląd elektrotechniczny*. 2018. № 94 (9). P. 62–67.
6. Markovic J., Zivcak J., Tarbajovsky P. New Generation of the Compact System for Performing Measurements of Solid Liquids by Gas Station Dispensers. *Journal of marine science and engineering*, 2022. № 10 (4). doi: 10.3390/jmse10040524.
7. Hryhorenko I., Tverytnykova E., Hryhorenko S., Demidova Yu. The usage of statistical analysis methods for controlling the operational stability of gas treatment facility. *Ukrainian metrological journal*, Kharkov. 2021. № 1. P. 26–32.
8. Hrihorenko Ihor, Hrihorenko Svitlana, Tverytnykova Elena. Improving the accuracy of the laser control system. *IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019*. Sozopol. Bulgaria. P. 232–235, doi: 10.1109/CAOL46282.2019.9019456.
9. DS18B20. Опис роботи із датчиком температури. URL: <http://www.e-voron.dp.ua/files/pdf/maxim/ds18b20-rus.pdf> (дата звернення: 26.04.2022).
10. Охумак COS61. URL: <https://eltald.com.ua/products/endress-hauser-oxumax-w-cos61> (дата звернення: 26.04.2022).
11. Memosens CPS16D. URL: <https://trade-control.com.ua/products/endress-hauser-memosens-cps16d> (дата звернення: 27.04.2022).
12. Мікроконтролер ATmega16. URL: <https://greenchip.com.ua/24-0-214-0.html> (дата звернення: 27.04.2022).
13. ЦВП HD44780. URL: <https://www.sparkfun.com> (дата звернення: 27.04.2022).
14. Чинков В.М. *Основи метрології та вимірювальної техніки*. Харків: НТУ «ХПІ», 2005. 524 с.

### References (transliterated)

1. Tekhnolohiia vyroshchuvannya krevetok [Technology of shrimp cultivation]. Available at: [http://sfera.fm/articles/rybnaya/vyrashchivanie-krevetok-za-tekhnologiei-uzv-budushchee\\_1709](http://sfera.fm/articles/rybnaya/vyrashchivanie-krevetok-za-tekhnologiei-uzv-budushchee_1709) (accessed 22.04.2022).
2. Feldkirchner M., Lutkus C. Process control networking – bridging between process control and information technology. *Conference record of 2019 IEEE IAS Pulp, paper and forest industries conference (ppfic)*, 2019, doi: 10.1109/ppfic43189.2019.9052379.
3. Wang X. H., Zhang Y. M. and Zhang X. Y. AVR fuzzy PID control system based on MCU. *Journal of computational methods in sciences and engineering*, 2019, no. 19 (4), pp. 1027–1036.

4. Belozubov E. M., Vasil'ev V. A., Chernov P. S. Metrological Self-Checking of Smart Sensors of Measurement and Control Systems. *Measurement techniques*, 2018, 61 (7), pp. 660–669.
5. Dominikowski B., Pacholski K. and Wozniak P. Fuzzy controller surface error in the intelligent automatic gain control system. *Przegląd elektrotechniczny*, 2018, no. 94 (9), pp. 62–67.
6. Markovic J., Zivcak J., Tarbajovsky P. New Generation of the Compact System for Performing Measurements of Sold Liquids by Gas Station Dispensers. *Journal of marine science and engineering*, 2022, no. 10 (4), doi: 10.3390/jmse10040524.
7. Hryhorenko I., Tverytnykova E., Hryhorenko S., Demidova Yu. The usage of statistical analysis methods for controlling the operational stability of gas treatment facility. *Ukrainian metrological journal*, Kharkiv, 2021, no. 1, pp. 26–32.
8. Hrihorenko Ihor, Hrihorenko Svitlana, Tverytnykova Elena. Improving the accuracy of the laser control system. *IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019*, Sozopol, Bulgaria, pp. 232–235, doi: 10.1109/CAOL46282.2019.9019456.
9. DS18B20. Опис роботи із датчиком температури [Description of work with the temperature sensor]. Available at: <http://www.e-voron.dp.ua/files/pdf/maxim/ds18b20.pdf> (accessed 26.04.2022).
10. Oxymax COS61. Available at: <https://eltaltd.com.ua/products/endress-hauser-oxy-max-w-cos61> (accessed 26.04.2022).
11. Memosens CPS16D. Available at: <https://trade-control.com.ua/products/endress-hauser-memosens-cps16d> (accessed 27.04.2022).
12. Мікроконтролер ATmega16. Available at: <https://greenchip.com.ua/24-0-214-0.html> (accessed 27.04.2022).
13. TsVP HD44780. Available at: <https://www.sparkfun.com> (accessed 27.04.2022).
14. Chynkov V.M. *Osnovy metrolohii ta vymirivulnoi tekhniki*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2005. 524 p.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Григоренко Ігор Володимирович** – кандидат технічних наук, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна. ORCID: 0000-0002-4905-3053. e-mail: [grigmaestro@gmail.com](mailto:grigmaestro@gmail.com)

**Ihor Hryhorenko** – PhD, Professor of the Department of information and measuring technologies and systems National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine. ORCID: 0000-0002-4905-3053. e-mail: [grigmaestro@gmail.com](mailto:grigmaestro@gmail.com).

**Григоренко Світлана Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна. ORCID: 0000-0002-5375-9534. e-mail: [sngloba@gmail.com](mailto:sngloba@gmail.com)

**Svitlana Hryhorenko** – PhD, Associate Professor of the Department of computer and radio-electronic control systems and diagnostics National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine. ORCID: 0000-0002-5375-9534. e-mail: [sngloba@gmail.com](mailto:sngloba@gmail.com)

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Григоренко І. В., Григоренко С. М. Розроблення системи контролю параметрів середовища при розведенні креветок. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 80-85. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.12.

*Please cite this article as:*

Hryhorenko I., Hryhorenko S. Development of a system for monitoring the parameters of the environment during shrimp breeding. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2 (12), pp. 80–85, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.12.

*Надійшла (received) 29.04.2022*

УДК 637.5.03

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.13

## РОЗРОБЛЕННЯ РЕЦЕПТУР М'ЯСНИХ ХЛІБІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СМАКО- АРОМАТИЧНИХ НАПОВНЮВАЧІВ

А. М. ХОЛОД<sup>1\*</sup>, В. М. ПАСІЧНИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>аспірант Національного університету харчових технологій, Київ, УКРАЇНА

<sup>2</sup>кафедра технології м'яса і м'ясних продуктів Національного університету харчових технологій, Київ, УКРАЇНА

\*e-mail: holodartem963@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** В останні роки спостерігається постійні зміни в якості м'ясної сировини, що характеризуються умовами утримання та відгодівлі сільськогосподарських тварин та птиці, зберігання та транспортування, технологією виробництва, що відповідним чином впливає на технологічні та споживчі характеристики м'яса та, відповідно, на якості м'ясних продуктів. Зміна властивостей м'ясної сировини, застосування інтенсивних способів його оброблення, використання харчових добавок при виготовленні м'ясних продуктів веде до зниження його органолептики. Все частіше виробники звертають увагу та підвищують вимоги до якості рецептурних компонентів, що надають продуктам традиційний смак та аромат. В порівнянні з вареними ковбасами м'ясні хліби мають більш щільну консистенцію, тим самим мають менший вміст волози та приємний особливий присмак. Вони є джерелом мікроелементів повноцінних білків та вітамінів, що гармонійно поєднує в собі смак, аромат, колір та форму. Перерахувавши вищезазначені позитивні сторони, даний вид продукту набуває все більшого попиту серед населення. У харчовій промисловості смако-ароматичні композиції є однією з важливих складових при виробництві м'ясних та ковбасних виробів. Їх застосування набуло широкого поширення на світовому ринку. Це сталося в результаті появи передових технологій, які пов'язані з отриманням харчових продуктів на основі переробки сировини. Одним із напрямків покращення органолептичних показників, а саме: смаку й аромату м'ясних хлібів є застосування смако-ароматичних композицій, а саме олеорезинів спецій, як альтернативних аналогів натуральних спецій і прянощів, гірчиці та кетчупу як біологічно цінних продуктів. За останнє десятиліття використання смако-ароматичних композицій, а саме олеорезинів спецій успішно «втісняє» натуральні мелені спеції в сфері виробництва харчових продуктів завдяки вагомим перевагам у застосуванні. Наведено можливі варіанти використання олеорезинів спецій, кетчупу та гірчиці у вигляді гелевих включень (надання ефекту «мраморності») для виготовлення м'ясних хлібів. М'ясні хліби з начинкою всередині дають можливість збагатити та урізноманітнити раціон споживачів, а також дозволяють виробнику підвищити вихід за рахунок введення наповнювача. Вибрано раціональну концентрацію олеорезинів на суміші носіїв (0,3–0,4%), концентрату молочного білка (10 – 20 г) та рисового борошна (10 – 20 г), що забезпечує формування найкращих смакових якостей у готовому продукті. Наведено дослідні дані для олеорезинів чорного перцю та наповнювача, з використанням яких розроблено модельні рецептури м'ясних хлібів. Наведені результати дають змогу порівняти ефективність використання натуральних спецій та інкапсульованих олеорезинів у технології виробництва м'ясних хлібів з м'ясом свинини напівжирної.

**Ключові слова:** олеорезин; кетчуп; гірчиця; гідроколюди; м'ясний хліб; натуральні спеції; харчова кров; концентрат молочного білка; рисове борошно

## DEVELOPMENT OF MEAT BREAD RECIPE USING TASTE - AROMATIC FILLERS

A. KHOLOD, V. PASICHNYI

<sup>1</sup>postgraduate, National University of Food Technologies, Kyiv, UKRAINE

<sup>2</sup>department of Technology of Meat and Meat Products, National University of Food Technologies, Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** In recent years, there have been constant changes in the quality of raw meat conditions for keeping and fattening farm animals and poultry, storage and transportation, production technology, which affects the technological and consumer characteristics of meat and, accordingly, the quality of meat products. Changing the properties of raw meat, the use of intensive methods of processing, and the use of food additives in the manufacture of meat products lead to a decrease in its organoleptic properties. Increasingly, manufacturers are paying attention to and increasing the quality requirements of prescription components that give products a traditional taste and aroma. Compared to cooked sausages, meat loaves have a denser texture and thus have a lower moisture content and a pleasant special taste. They are a source of trace elements, complete proteins and vitamins that harmoniously combine taste, aroma, color and form. Having listed the above advantages, this type of product is becoming increasingly popular among the population. In the food industry, flavoring compositions are one of the most important ingredients in the production of meat and sausage products. Their use has become widespread in the world market. This is due to the emergence of advanced technologies that are related to the production of food products based on the processing of raw materials. One of the ways to improve organoleptic indicators, namely: taste and aroma, meat loaves, is the use of flavoring compositions, namely spice oleoresin as alternative analogs of natural spices and spices, mustard and ketchup, as biologically valuable products. Over the last decade, the use of flavoring compositions, namely oleoresin spices, has successfully "supplanted" natural ground spices in the field

*of food production due to significant advantages in use. The possible uses of oleoresins, spices, ketchup and mustard in the form of gel inclusions (giving the effect of "marbling") for the manufacture of meat loaves are described. Meat breads with a filling inside provide an opportunity to enrich and diversify the diet of consumers, and also they allow the manufacturer to increase the yield by introducing filler. A rational concentration of oleoresins on a mixture of carriers (0.3-0.4%), milk protein concentrate (10-20 g) and rice flour (10-20 g) was chosen, which ensures the formation of the best taste qualities in the finished product. Experimental data for black pepper oleoresins with which model formulations of meat loaves are developed are given. These results make it possible to compare the effectiveness of the use of natural spices and encapsulated oleoresins in the technology of production of meat loaves with semi-fat pork.*

**Keywords:** oleoresin; meat bread; natural spices; edible blood; milk protein concentrate; rice flour

## Вступ

За останні роки асортимент та обсяги реалізованих ковбасних виробів в Україні значно збільшився завдяки використанню широкого асортименту смакових композицій [1]. На ринку реалізації ковбасних виробів, що користуються в українського споживача незмінним попитом користуються вироби вареної групи, зокрема м'ясні хліби, які традиційно виготовляються на основі м'яса яловичини, свинини та м'яса птиці [2]. Дана сировина потребує підбору спецій, які можуть підкреслити її натуральність. Тому у виробника виникає потреба пошуку ефективних смакових композицій, для розширення асортименту якісної продукції, що буде користуватись попитом у споживача.

Виріб з ковбасного фаршу без оболонки, запечений у формі з термостійкого матеріалу називають м'ясним хлібом [3]. На смак він схожий з смаком ковбаси вареної групи, але при цьому має особливий присмак, що характеризується процесом запікання. Даний продукт має насичений, рівномірно обсмажений колір скоринки, порівняно з виглядом на розрізі що дає змогу захистити виріб від висихання та псування. В порівнянні з вареними ковбасами м'ясні хліби мають менший відсоток вологи, мають приємний особливий присмак та більш щільну консистенцію. При цьому даний продукт гармонійно поєднує в собі форму, смак, аромат. З урахуванням вищенаведених характеристик даний виріб набув попиту серед населення як України так і країн ЄС.

## Мета роботи

Дослідження направлені на вдосконалення рецептур м'ясних хлібів шляхом підбору смако-ароматичних композицій для надання продукту відповідних смакових та ароматичних властивостей.

## Виклад основного матеріалу

В останні роки спостерігається стійкі зміни в якості м'ясної сировини, обумовлені особливістю умов утримання та відгодівлі сільськогосподарських тварин та птиці, технологією виробництва, зберігання та транспортування, що відповідним чином відображається на споживчих та технологічних характеристиках м'яса та, відповідно, на якості

м'ясних виробів. До зниження його органолептичних показників приводить застосування харчових добавок, використання інтенсивних способів його оброблення. Тому виробники все більше звертають увагу та підвищення вимог до якості рецептурних компонентів, що надають продуктам традиційний смак та аромат [4].

Серед представлених на ринку смако-ароматичних інгредієнтів особливе місце посідають олеорезини та екстракти спецій та ароматичні жирові композиції [4-6]. Так як застосування натуральних сухих спецій має ряд недоліків виробники все частіше надають перевагу екстрактам спецій. Так, сухі подрібнені спеції, є досить забрудненими різними мікроорганізмами, можуть містити токсичні хімічні сполуки - пестициди, важкі метали, нітрити, нітрозозаміни та ін. Сировина може піддаватися дії плісняви, що є наслідком неправильного зберігання, різного роду бактерій та грибків. Також одним з мінусів є те, що на зберігання традиційних натуральних спецій потрібні спеціально обладнані складські приміщення із професійними системами пожежогашіння і вентиляції. Спеції псують вигляд та колір ковбасних виробів на розрізі за рахунок великої фракції. В сухих спеціях, крім того, лєвова частка легкої фракції міститься в зв'язаному стані. Дані сполуки визволяються при гідролізі попередників, наприклад, при термічній обробці продуктів, але цей процес протікає не до кінця й ефективна концентрація легких компонентів спецій завжди менша, ніж у виділених олеорезинах та екстрактах [7,8]. Виробник кожний раз вносить в продукт різний обсяг ароматичних речовин вживаючи однакову кількість спецій, що є наслідком різного смаку та запаху.

Основним компонентом м'ясних хлібів в Європі є свинина. Вона має велику засвоюваність, до складу даного виду м'яса входять вітаміни групи В, а також біологічно-повноцінні білки та жири в легкодоступній формі. В складі рецептур хлібів, як наповнювачі виступають соуси (кетчуп, гірчиця), що збільшують харчову цінність та покращують смакові якості продукту. Кетчуп має у своєму складі таку речовину, як антиоксидант лікопін, володіє яскраво вираженими антиоксидантними властивостями [9]. Він здатний знищувати вільні радикали, які провокують розвиток серцево-судинних захворювань та передчасне старіння організму. Теплова обробка

позитивно впливає на лікопін, він починає краще засвоюватися. По цій причині у кетчупі його більше, ніж у свіжих помідорах. Гірчиця розщеплює жири та покращує перетравлення білкової їжі, при цьому активізується обмін речовин.

У ході наукових досліджень було виявлено, що використання гідроколоїдів дозволяє стабілізувати функціонально-технологічні та реологічні показники продукції [10,11] при використанні м'ясної сировини з технологічними вадами.

Змінюючи дозування і вид використовуваних сумішей гідроколоїдів, можна отримувати системи з необхідними структурно-механічними і реологіями властивостями. Навіть при дуже низьких дозуваннях гідроколоїди здатні сформувати щільну структуру готового продукту з високими органолептичними показниками.

Технологічні властивості цього виду стабілізаторів забезпечують підвищення в'язкості при нагріванні і швидку фіксацію гелю, що утворюється. При цьому зберігається стабільність емульсії [12,13].

#### Обговорення результатів

Зниження собівартості м'ясопродуктів відбувається за рахунок зменшення вмісту м'ясного компонента та введення до складу продукту наповнювача. До того ж, отриманий виріб дозволяє споживачеві заощадити за рахунок того, що не потрібно купувати додаткові соуси та приправи. Завдяки своїм функціональним характеристикам м'ясні хліби зручні у вживанні та можуть користуватися високим попитом з боку молоді, співробітників офісів, аматорів швидкого перекусу, мереж фаст-фуду та інших купівельних сегментах.

Технологія введення наповнювача здійснюється в процесі куттерування фаршу. Застиглий наповнювач на основі карагінану з кетчупом або гірчицею нарізають на шматки масою не більше 2 кг, закладають у куттер за 1 - 2 хв до закінчення процесу куттерування і продовжують перемішувати до рівномірного розподілу наповнювача в масі фаршу з розміром крапель шматочків не більше 3-5 мм.

Завдяки своєму хімічному складу наповнювачі кетчуп та гірчиця позитивно впливають не тільки на органолептичні показники, а й підвищують харчову цінність продукту. Крім того, введення наповнювачів дозволяє збільшити вихід продукту до 143%, що позитивно позначиться на ціні м'ясних хлібів. Можна зробити висновок, що використання кетчупу або гірчиці у складі виробів дозволить зберегти баланс між смаком, якістю та прийнятною ціною для споживача [14-16].

В процесі розроблення рецептур було проведено дослідження для порівняння олеорезину чорного перцю та чорного перцю меленого. Носій

олеорезину повинен не виявляти реакційної здатності з ароматичними речовинами, добре розчинятися у воді, при високій концентрації мати низьку в'язкість, сприяти повному вивільненню основи аромату в будь-яких процесах, що потребують розчинення, характеризуватися високими емульгуючими, плівкоутворюючими властивостями, ефективне розподілення в об'ємі продукту при заданих параметрах часу та місця. Для вивільнення аромату. Носіями, зазвичай, виступають вуглеводи: крохмалі, мальтодекстрини, сухі цукрові сиропи.

Здатність цих носіїв зв'язувати леткі речовини доповнюється їх поширеністю використанн та низькою ціною в харчових технологіях. Вуглеводи проявляють низьку в'язкість за високих концентрацій твердих речовин та мають високу розчинність, але характерною ознакою для них є відсутність міжфазових властивостей, що необхідні для збільшення ефективності процесу інкапсуляції. Але вони мають свої недоліки, а саме: відсутність емульгуючих властивостей і невисокий рівень утримання летких компонентів.

Традиційними спеціями, що використовуються у виробництві м'ясопродуктів є перець чорний і білий, мускатний горіх, кардамон, коріандр, перець духмяний [4].

Зі збільшенням попиту в даний час на спеції в м'ясній галузі технологічним та перспективним є інкапсуляція олеорезинів та екстрактів. Інкапсуляція дає здатність модулювати багатоманітні смако-ароматичні композиції, які дають змогу створювати смакові характеристики готових продуктів з урахуванням застосування сировини різного походження та впливу різних технологічних вимірів.

Але й олеорезини мають ряд недоліків, які потрібно враховувати при їх використанні. Під впливом повітря, світла, високих температур, води вони виявляють схильність до руйнування та мають короткий термін зберігання у випадку зберігання в невідповідних умовах, що потребує забезпечення належного рівня логістичного супроводу [18].

Виготовлення м'ясного хліба передбачає підготовку м'ясної сировини, сухої молочної сироватки, борошна рисового, концентрату білка молочного, яєць, смакових інгредієнтів, води питної, підготування форм, подрібнення та соління м'ясної сировини, витримання, приготування фаршу в куттері з додавання солі, води, різних смакових інгредієнтів, наповнення фаршем спеціальних форм, термобробка та охолодження [17]. В даному дослідженні як смакові інгредієнти використовували спеції в натуральному вигляді й олеорезини відповідних спецій та різні прянощі, які нанесені на обраного носія. На початковій стадії, згідно з поставленим завданням і метою, були підібрані рецептурні складники м'ясних хлібів з акцентом на застосування м'яса свинини напівжирної. Даний вид



м'яса має достатній вміст жиру, високий рівень доступності системи травлення [19,20], що надає соковитість готовому виробу і традиційно використовується в рецептурах ковбасних виробів з чорним перцем. Вивчалась зміна смакових властивостей модельних м'ясних хлібів, для підняття смакових якостей даного продукту, різних олеорезинів при варіації концентрації на комбінованому носії. Після проведення відповідних лабораторних досліджень було визначено доцільний склад суміші концентрату молочного білка (дозволяє збалансувати амінокислотний склад білка продукту, збільшує в'язкість, покращує консистенцію та смак готового продукту) та рисового борошна (використовується як згущувач).

При використанні олеорезину чорного перцю і натуральних спецій було проведено порівняльний аналіз смакових якостей м'ясних хлібів.

Табл. 1 показує нам рецептурний склад модельних м'ясних хлібів із застосуванням спецій в натуральній формі та олеорезину перцю чорного.

Приготування фаршу проходило у лабораторії на спеціальному блендері. Подрібнювали до однорідної маси. Заздалегідь підготовлені форми за допомогою лабораторного шприца вручну наповнювали.

У формі поверхню фаршу робили товарну відмітку розгладжуючи відповідно до нумерації досліджуваних зразків. Форми з фаршем після цього запікали в термокамері при температурі 130 - 140 °С до досягнення температури в центрі хліба 72 °С. Готовий м'ясний хліб остиджували до температури в середині хліба (0—15 °С) та виконували подальші дослідження.

Таблиця 1 - Склад модельних м'ясних хлібів з використанням олеорезину чорного перцю

Сировина	Склад за варіантами рецептур, %			
	№1	№2	№3	№4
Свинина н/ж	87,0	84,0	83,0	83,0
Суша молочна сироватка	3,0	3,0	3,0	3,0
Концентрат білка молочного	3,0	6,0	3,0	3,0
Борошно рисове	3,0	3,0	6,0	6,0
Яйця курячі	2,0	2,0	2,0	2,0
Кров харчова свиняча	2,0	2,0	3,0	3,0
Олерезин спецій	0,4	0,4	0,3	0,3
Нітрит натрію	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Вода питна	40,0	40,0	30,0	30,0

На рис. 1 наведено зміну температури всередині продукту при температурній обробці, які свідчать про відсутність суттєвого впливу

У табл. 2, 3 представлено зміну значень пластичності і фізико-хімічних показників модельних фаршевих систем до та після запікання.

При оцінці смакових характеристик визначали типівість смаку для даного продукту, встановлювали наявність специфічних нехарактерних смакових присмаків.

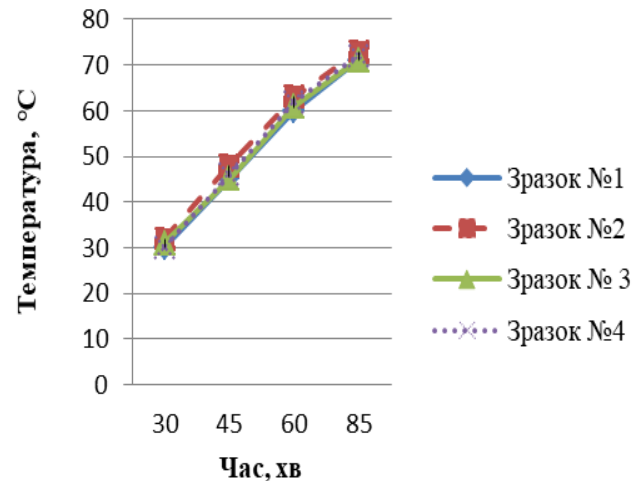


Рис. 1 - Зміна температури центральної зони хлібів при термічній обробці

Таблиця 2 - Функціонально-технологічні показники фаршевих систем модельних рецептур м'ясних хлібів до запікання

Показники	pH	Вміст вологи, %	Вміст солі, %	Пластичність, м <sup>2</sup> /мг	ВЗЗ,а %
Зразок №1	6,4	62,6	1,9	16,4	99,1
Зразок №2	6,5	59,16	1,9	15,8	99,1
Зразок №3	6,5	65,17	1,8	18,2	86,6
Зразок №4	6,5	60,06	1,85	17,6	86,9

Якісне визначення смаку проводили не лише за основними смаковими відчуттями (кислого, солоного чи гіркового), але і їх гармонійним поєднанням з, пекучістю та гостротою смаку характерними додаванням до рецептур натуральних спецій або олеорезинів. Кінцевим етапом було зрівняння зовнішнього вигляду, запах, вигляд на розрізі, смак, кольору та консистенції досліджуваних зразків хлібів. Оцінювання хлібів проводили за 5-бальною шкалою.

Таблиця 3 - Функціонально-технологічні показники фаршевих систем модельних рецептур м'ясних хлібів після запікання

Показники	pH	Вміст вологи, %	Вміст солі, %	Вміст нітриту натрію, %	Пластичність, см <sup>2</sup> /мг	ВЗЗа, %
Зразок №1	6,5	64,7	1,9	<0,0005	17,8	89,2
Зразок №2	6,5	63,8	1,9	<0,0005	17,2	90,1
Зразок №3	6,4	68,6	1,8	<0,0005	19,8	78,4
Зразок №4	6,4	71	1,85	<0,0005	19,3	76,3

По табл. 2 і 3 можна зробити висновок, що зростання частини внесеної вологи при розумному внесенні сухих речовин є наслідком збільшення пластичності. В першому та другому варіанті досягаються високі показники ВЗЗа. Також в даних варіантах при правильному розподіленні рисового борошна та концентрату молочного білка помітно вища в'язкість, та краща консистенція та загальний вигляд готового виробу.

Результати проведенної органолептичної оцінки м'ясних хлібів для розроблених рецептур наведено на рис. 2.

Отримані результати органолептичного оцінювання (рис. 2) підтверджують ефективність використання інкапсульованого олеорезину чорного перцю для отримання високих смакових показників м'ясних хлібів при використанні олеорезинів спецій в кількості від 0,3 до 0,4 % до маси сировини. Контрольні зразки мали високі органолептичні показники, проте олеорезини спецій у концентрації 0,3—0,4% до маси основної сировини не відрізнявся від контролю за смаком та ароматом.

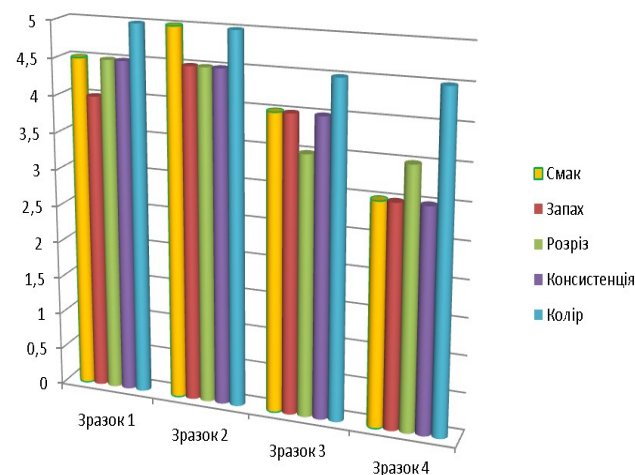


Рис. 2 - Органолептичні показники м'ясних хлібів з використання олеорезину чорного перцю

Провівши низку експериментів можна стверджувати, що підвищення концентрації олеорезинів негативно впливає на смакові властивості зразків. Зміни смакових властивостей хлібів при дослідженні виявили, що додавання концентрату молочного білка (6,0%), та рисового борошна (3,0 %) позитивно впливає на консистенцію, в'язкість та вигляд продукту на розрізі. За органолептичними показниками краще себе зарекомендував зразок № 2.

## Висновки

Підтверджена можливість використання інкапсульованої форми олеорезину чорного перцю у виробництві м'ясних хлібів та визначено, що використання олеорезинів в кількості 0,3—0,4%, концентрату молочного білка (3,0 - 6,0%), рисового борошна (3,0 - 6,0%) є раціональним відсотком для забезпечення високих смакових показників м'ясних хлібів, що виробляються за традиційною технологією.

В майбутньому планується проведення експериментальних досліджень з спільним використанням в складі м'ясних хлібів з олеорезином чорного перцю наповнювачів кетчупу та гірчиці.

### Список літератури

1. Klumbyte N. The Soviet sausage renaissance. *American Anthropologist*. 2010. 112(1). P. 22-37.
2. Abdolghafour B., Saghir A. Development in sausage production and practices-A review. *Journal of meat science and technology*. 2014. 2(3). P. 40-50.
3. Montonen J., Boeing H., Fritsche A., Schleicher E., Joost H. G., Schulze M. B., Pischon T. Consumption of red meat and whole-grain bread in relation to biomarkers of obesity, inflammation, glucose metabolism and oxidative stress. *European journal of nutrition*. 2013. 52(1). P. 337-345. doi: 10.1007/s00394-012-0340-6.
4. Umaraw P., Chauhan G., Mendiratta S. K., Verma A. K., Arya A. Effect of oregano and bay as natural preservatives in meat bread for extension of storage stability at ambient temperature. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020. 44(4). P. e14375. doi: 10.1111/jfpp.14375.
5. Bozhko N., Pasichnyi V., Marynin A., Tischenko V., Strashynskiy I., Kyselov O. The efficiency of stabilizing the oxidative spoilage of meat-containing products with a balanced fat-acid composition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 3(11-105). P. 38-45. doi: 10.15587/1729-4061.2020.205201.
6. ДСТУ 4436:2005. Ковбаси варені, сосиски, сардельки, хліби м'ясні. Київ: Держспоживстандарт України, 2006.
7. Божко Н. В., Тищенко В. І., Пасічний В. М. Екстракт журавлини в технології варених ковбас з м'ясом водоплавної птиці. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені СЗ Жицького. Серія: Харчові технології*. 2017. 19. № 75. P. 106-109.
8. Kotliar Y., Topchiy O., Kyshenia A., Polumbryk M., Garbazyh K., Lanzhenko L., Honcharenko T. Development of a technology of vitaminized blended vegetable oils and their identification by the fatty acid and vitamin contents. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 3 (11). P. 32-43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.131971.
9. Bozhko N., Tischenko V., Pasichnyi V., Marynin A., Polumbryk M. Analysis of the Influence of Rosemary and Grape Seed Extracts on Oxidation the Lipids of Peking Duck Meat. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 4(11). P. 4-9. doi: 10.15587/1729-4061.2017.108851.
10. Gorlov I. F., Slozhenkina M. I., Bozhkova S. E., Grigoryan L. F., Andryushchenko D. S. Method for producing sausages, lycopine enriched. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 548. No. 8. P. 082047. doi: 10.1088/1755-1315/548/8/082047.
11. Hollingworth C. S. Hydrocolloids – How to choose? Brenntag Food & Nutrition Europe. 2011. 1. P. 2–9.
12. Андрющенко Д. С., Капанецкая А. М., Григорян Л. Ф. Полезный продукт фаст-фуда-сосиски с наполнителем. *Перспективные аграрные и пищевые инновации*. 2019. P. 45-48.
13. Козлова Т. А. Исследование влияния пищевых красителей природного происхождения на физико-химические свойства вареных колбасных изделий.

- Russian Journal of Agricultural and SocioEconomic Sciences*. 2012. No. 2 (2). P. 34–39.
14. Чем вреден кетчуп. Электрон. текстовые дан. Москва. 2018. URL: <http://medic-03.ru/chem-vredenketchup/> (дата звернення: 19.03.2019).
  15. Технология производства колбасных изделий. URL: <https://studfiles.net/preview/5612026/page:9/>
  16. Технология хранения и транспортирования колбас. URL: <http://mirznanii.com/a/131684/tekhnologiya-khraneniya-i-transportirovaniya-varyenykh-kolbas>
  17. Українець А. І., Пасічний В. М., Шведюк Д. А., Мацук Ю. А. Дослідження здатності до протеолізу м'ясних січених напівфабрикатів функціонального призначення. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені СЗ Жицького. Серія: Харчові технології*. 2017. 19, № 75. P. 129-133.
  18. Страшинський І. М., Фурсік О. П., Ришканіч Р. О., Ромазан О. В. Якість свинини, що переробляє ТОВ Тернопільський м'ясокомбінат. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2019. 1. P. 199-214.

### References (transliterated)

1. Klumbyte N. The Soviet sausage renaissance. *American Anthropologist*, 2010, 112(1), pp. 22-37.
2. Abdolghafour B., Saghir A. Development in sausage production and practices-A review. *Journal of meat science and technology*, 2014, 2(3), pp. 40-50.
3. Montonen J., Boeing H., Fritsche A., Schleicher E., Joost H. G., Schulze M. B., Pischon T. Consumption of red meat and whole-grain bread in relation to biomarkers of obesity, inflammation, glucose metabolism and oxidative stress. *European journal of nutrition*, 2013, 52(1), pp. 337-345, doi: 10.1007/s00394-012-0340-6.
4. Umaraw P., Chauhan G., Mendiratta S. K., Verma A. K., Arya A. Effect of oregano and bay as natural preservatives in meat bread for extension of storage stability at ambient temperature. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(4), pp. e14375, doi: 10.1111/jfpp.14375.
5. Bozhko N., Pasichnyi V., Marynin A., Tischenko V., Strashynskiy I., Kyselov O. The efficiency of stabilizing the oxidative spoilage of meat-containing products with a balanced fat-acid composition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, 3(11-105), pp. 38-45, doi: 10.15587/1729-4061.2020.205201.
6. DSTU 4436:2005. Kovbasy vareni, sosysky, sardelky, khliby miasni. Kyiv. Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2006.
7. Bozhko N. V., Tyshchenko V. I., Pasichnyi V. M. Ekstrakt zhuravlyny v tekhnologii varenykh kovbas z miasom vodoplavnoi ptytsi. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnologii imeni SZ Gzhytskoho. Seriya: Kharchovi tekhnologii*, 2017, 19, 75, pp. 106-109.
8. Kotliar Y., Topchiy O., Kyshenia A., Polumbryk M., Garbazyh K., Lanzhenko L., Honcharenko T. Development of a technology of vitaminized blended vegetable oils and their identification by the fatty acid and vitamin contents. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, 3 (11), pp. 32-43, doi: 10.15587/1729-4061.2018.131971.

9. Bozhko N., Tischenko V., Pasichnyi V., Marynin A., Polumbryk M. Analysis of the Influence of Rosemary and Grape Seed Extracts on Oxidation the Lipids of Peking Duck Meat. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, 4(11), pp. 4-9, doi: 10.15587/1729-4061.2017.108851.
10. Gorlov I. F., Slozhenkina M. I., Bozhkova S. E., Grigoryan L. F., Andryushchenko D. S. Method for producing sausages, lycopine enriched. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, Vol. 548, No. 8, p. 082047, doi: 10.1088/1755-1315/548/8/082047.
11. Hollingworth C. S. Hydrocolloids – How to choose? *Brenntag Food & Nutrition Europe*, 2011, 1, pp. 2–9.
12. Andriushchenko D. S., Kapanetskaia A. M., Hryhorian L. F. Polezni produkt fast-fuda-sosyisky s napolnytelem. *Perspektyvnyie ahrarnie y pyshchevie ynnovatsyy*, 2019, pp. 45-48.
13. Kozlova T. A. Issledovanie vliyaniya pischevyih krasiteley prirodnoho proishozhdeniya na fiziko-himicheskie svoystva varennyih kolbasnyih izdeliy. *Russian Journal of Agricultural and SocioEconomic Sciences*, 2012, No. 2 (2), pp. 34–39.
14. Chem vreden ketchup. Elektron. tekstovyye dan. Moskva. 2018. Available at: <http://medic-03.ru/chem-vredenketchup/> (accessed: 19.03.2019).
15. Tekhnolohiya proyzvodstva kolbasnykh yzdelyi. Available at: <https://studfiles.net/preview/5612026/page:9>.
16. Tekhnolohiya khraneniya y transportyrovaniya kolbas. Available at: <http://mirznanii.com/a/131684/tekhnologiya-khraneniya-i-transportirovaniya-varyenykh-kolbas>
17. Ukrainets A. I., Pasichnyi V. M., Shvediuk D. A., Matsuk Yu. A. Doslidzhennia zdatnosti do proteolizu miasnykh sichenykh napivfabrykativ funktsionalnoho pryznachennia. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnolohii imeni SZ Gzhytskoho. Seriya: Kharchovi tekhnolohii*, 2017, 19, 75, pp. 129-133.
18. Strashynskyi I. M., Fursik O. P., Ryshkanych R. O., Romazan O. V. Yakist svynyny, shcho pererobliaie TOV Ternopilskyi miasokombinat. *Prohresyvni tekhnika ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnystv restorannoho hospodarstva i t orhivli*, 2019, 1, pp. 199-214.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Холод Артем Михайлович** – аспірант, Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна; e-mail: [holodartem963@gmail.com](mailto:holodartem963@gmail.com).

**Kholod Artem** - postgraduate, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

**Пасічний Василь Миколайович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології м'яса та м'ясних продуктів Національного університету харчових технологій, Київ, Україна, e-mail: [pasww1@ukr.net](mailto:pasww1@ukr.net)

**Pasichnyi Vasyl** - doctor of technical sciences, Professor, Department of Technology of Meat and Meat Products, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

Холод А. М., Пасічний В. М. Розроблення рецептури м'ясних хлібів з додаванням смакоароматичних композицій. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2022. № 2 (12). С. 86-92. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.13.

*Please cite this article as:*

Kholod A., Pasichnyi V. Development of a recipe for meat loaves with the addition of flavoring compositions. *Bulletin of the National Technical University «HPI»*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU «HPI», 2022, no. 2(12), pp. 86–92, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.13.

*Надійшла (received) 03.06.2022*

УДК 664.7

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.14

## РОЗРОБКА МОБІЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ СОРТУВАННЯ ЗЕРНОВИХ ВІДХОДІВ

**Ю. О. ЧУРСІНОВ, І. М. КУДРЯВЦЕВ, М. В. ЛУЦЕНКО\***

*кафедра технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, УКРАЇНА*

*\*e-mail: maryna.lutsenko11@gmail.com*

**АНОТАЦІЯ** Розглянуто проблему недосконалості процесу очищення зернових мас під час доробки до базисних показників якості. Показано, що зернові відходи містять значну кількість зернової та олійної домішки. Описано стан генерації відходів на підприємствах елеваторної, зернопереробної та оліє-жирової промисловості. Проаналізовано перспективи їх переробки як сировини для виробництва харчових продуктів - круп, олій та інше. Акцентовано увагу, що в умовах оголошеного військового стану в Україні, вилучення «цінних фракцій» із зернових відходів є фінансово актуальним. Розроблено мобільну установку для сортування зернових відходів та проведено її виробничі випробування. Зазначено раціональна продуктивність такої машини – не більше 48 тон за добу (для зернових відходів). Це дозволить забезпечити переробку сміття соняшнику до 1000 тон насіння соняшнику на добу, та переробку сміття зернових культур до 800 тон зерна на добу. Наведено, що доцільно використовувати розроблену сортувальну машину в умовах невеликих приватних фермерських господарств, де обсяг сміття зернових культур становить 140-150 кг за годину, а сміття та лушпиння соняшнику – 100-120 кг за годину. В умовах Товариства з обмеженою відповідальністю Науково виробниче підприємство «Сортувальні машини» м. Дніпро проведено дослідження процесу сортування зернових відходів на розробленій мобільній установці. Результати випробувань підтвердили продуктивність сортувальної машини. Описано будову основного вузла мобільної установки для сортування зернових мас – сепараційного каналу. Запропоновано доробки конструкції сортувальної машини та розроблено пакет комп'ютерних програм для сортування відходів соняшнику, пшениці, сої, амаранту, конопель, ріпаку. В ході досліджень доведено необхідність використання протиадгезійного покриття та спеціальної форми вібраційного живильника розробленої машини. Це дає змогу скоротити час очищення живильника, виключити ущільнення сировини та ліквідувати зони скучення зернового матеріалу. В програмі роботи сортувального агрегату розроблено модуль очищення сепараційного каналу, який має два режими – періодичність і тривалість вмикання продувки каналу. Наведено опис та технічні характеристики розробленої мобільної установки для сортування зернових відходів.

**Ключові слова:** відходи; зерно; аеродинамічне сортування; мобільна установка; зернова домішка; олійна домішка

## CREATION OF A MOBILE INSTALLATION FOR SORTING GRAIN IMPURITIES

**Y. TCHURSINOV, I. KUDRIAVTSEV, M. LUTSENKO\***

*Department of Technology, Saving and Processing of Agricultural Products, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, UKRAINE*

**ABSTRACT** The problem of the imperfection of the process of cleaning grain masses in time for refinement to basic quality indicators is considered. It is shown that grain waste contains a significant amount of grain and oilseed admixture. The state of waste generation at the enterprises of the elevator, grain processing and oil and fat industries is described. An analysis was made of the prospects for their processing as raw materials for the production of food products – cereals, vegetable oils and others. It is emphasized that in the conditions of the declared state of war in Ukraine, the allocation of "valuable fractions" from grain waste is financially relevant. A mobile plant for sorting grain waste has been developed and its production tests have been carried out. The rational productivity of such a machine is noted - no more than 48 tons per day (for grain waste). This will ensure the processing of sunflower waste up to 1000 tons of sunflower seeds per day, and the processing of grain crop waste – up to 800 tons of grain per day. It is shown that the developed sorting machine is advisable to use in small farms, where the volume of grain waste is 140-150 kg per hour, and sunflower waste and husks – 100-120 kg per hour. In the conditions of the Limited Liability Company Scientific and Production Enterprise "Sorting Machines" in the city of Dnipro, a study was made of the process of sorting grain waste on a developed mobile unit. The test results confirmed the productivity of the sorting machine. The design of the main unit of a mobile unit for sorting grain masses – a channel for sorting – is described. Improvements in the design of the sorting machine have been proposed and a package of computer programs has been developed for sorting sunflower, wheat, soybean, amaranth, hemp, and rapeseed waste. In the course of research, the necessity of using an anti-adhesive coating and a special form of a vibrating feeder of the developed machine was proved. This allows you to reduce the cleaning time of the feeder, eliminate the compaction of raw materials and eliminate areas of accumulation of grain material. In the program of the sorting unit, a separation channel cleaning module has been developed, which has two modes - the frequency

*and duration of the channel purge. The description and technical characteristics of the developed mobile machine for sorting grain waste are given.*

**Keywords:** *impurities; seeds; grain; aerodynamic sorting; mobile sorting machine; grain impurities; seeds impurities*

### Вступ

Зменшення зернових відходів є актуальним повсякденним завданням переробної промисловості. Процес очищення зернових мас регламентовано нормативними документами України. Наприклад, Інструкцією [1] визначена необхідність додаткового сортування зернових відходів при вмісті в них зернової домішки 10% і більше. Проте, через відсутність обладнання для тонкого сортування зернових відходів та, відповідно, низької вартості одержаних продуктів – рекомендовані нормативи не можливо реалізувати в умовах реального виробництва. Воєнне сьогодніня пропонує високу ціну на зерно олійних і зернових культур, тому оператори ринку звертають пильну увагу на можливості скорочення відходів та повернення їх до основного процесу або додаткових можливостей виробництва нових продуктів із зернового сміття [2,3]. В умовах складного економічного становища України вилучення зернової/олійної домішки із зернових відходів для отримання харчових продуктів є одним із напрямків підтримки харчової безпеки країни.

### Мета роботи

Авторами статті на основі вивчення стану питання про генерацію та переробку зернових відходів (2015 – 2022 рр.), а також аналітичного дослідження наукових праць стосовно вказаної проблеми, розроблено мобільну установку для сепарування зернових відходів з метою виділення з них «цінних» фракцій для умов використання у приватних та фермерських господарствах з добовою генерацією зернових відходів до 50 тон.

### Виклад основного матеріалу

Україна має значний потенціал у галузі сільськогосподарського виробництва. Національний рекорд урожайності соняшника досягає 52 центнера з гектару при середній врожайності 25 центнерів з гектару. При таких темпах зростання слід очікувати генерацію відходів після очищення олійних культур – більше ніж у 2 рази. Аналогічна ситуація також і у виробництві зернових та бобових культур.

Сміття, яке вилучають із зернової суміші в процесі доробки до нормативних показників, має 40-60% зернової/олійної домішки, яка за гранулометричними та біохімічними властивостями відповідає основному зерну. Науковці Національного університету харчових технологій довели недоцільність вилучення зернової домішки при

сортових помелах пшениці [4]. Державним стандартом технічних умов регламентують повернення 50% зернової домішки до складу основного зерна [5]. Все це підтверджує раціональність переробки зернових відходів з метою вилучення з них «цінних» фракцій – щуплого або битого зерна, яке можна використовувати в технологічних процесах виробництва харчових продуктів.

Створення машини для сортування зернових відходів стримувалось низькою економічною ефективністю використання отриманих продуктів та відсутністю фундаментальних досліджень властивостей компонентів зернових/олійних домішок. Тільки нещодавно вчені країн, де розвинений агропромисловий комплекс почали проводити дослідження властивостей складових зернових мас, бо постала задача раціонального використання ресурсів, в тому числі і переробки (а не утилізації) зернових відходів. Отримані дані досліджень вчені-агроінженери використовують при конструюванні нових моделей сортувальних машин [6-10].

Протягом останніх років автори статті проводили низку досліджень способів сепарування зернових відходів. Встановлено, що найбільш ефективним способом проведення цього процесу, який дозволяє досягати найбільшої технологічної ефективності є аеродинамічне сортування у вертикальному висхідному повітряному потоці [11]. Виробничі випробування зазначеного способу переробки зернових відходів на підприємствах України дозволили зробити висновок про недоцільність розробки сортувальної машини продуктивністю більше 48 тон за добу (для зернових відходів). Сортувальна машина з такою продуктивністю забезпечує переробку сміття соняшника на підприємстві, яке переробляє до 1000 тон насіння соняшника на добу, та переробку сміття зернових культур на підприємстві, яке переробляє до 800 тон зерна на добу.

Аналіз відомих досліджень показав, що застосування пневмосепаруючих каналів глибиною понад 300 мм призводить до зниження ефективності поділу матеріалу через збільшення нерівномірності швидкості повітряного потоку [12,13]. Тому автори статті прийшли до висновку про доцільність розробки високоефективного аеродинамічного сортувального каналу, який забезпечує максимальну технологічну ефективність сортування зернових відходів за рахунок зменшення продуктивності процесу сортування.

Дослідженням ринкової ситуації виділено доцільний сегмент використання розробленої сортувальної машини – для умов приватних та

фермерських господарств та у господарствах з невеликим обсягом добової генерації сміття, при цьому рекомендована раціональна номінальна продуктивність становить: 50 кг за годину для пшениці, 140-150 кг за годину для сміття зернових культур, 100-120 кг за годину для сміття та лущиння сояшника. Відносно збільшення продуктивності агрегату для сортування, вченими доведено недоцільність ускладнення конструкції пневмосепаруючого каналу шляхом додаткового встановлення бар'єрів, а запропоновано виготовлення модульних сортувальників, що дає змогу точного підбору необхідної продуктивності виходячи з конкретних потреб виробників/замовників [14].

### Обговорення результатів

В умовах оголошеного військового стану авторами була розроблена експериментальна мобільна установка для сортування зернових відходів продуктивністю до 150 кг на годину або 3,6 тон на добу (рис. 1), а також у Товаристві з обмеженою відповідальністю Науково виробниче підприємство «Сортувальні машини», м. Дніпро проведені дослідження процесу сортування відходів пшениці, сояшнику, ріпаку, та очищення насіння кукурудзи, коноплі, амаранту та інше.

Сепараційний канал 7 представляє собою аеродинамічний канал вертикального висхідного повітряного потоку і складається з 5 функціональних частин:

- оголовок колони, в якій знаходиться зона розряджання і відбувається відбір легкого сміття;
- траверса колони, де знаходиться зона відбору олійної/зернової домішки;
- стовбур колони, в якій знаходиться зона утворення псевдозрідженого шару і поділ зернової суміші за комплексом ознак розподільності зернової суміші (за аеродинамічними ознаками і ознаками питомої ваги);
- зчленування віброживильника і колони із зоною введення зернової суміші від віброживильника в стовбур сепараційної колони;
- база колони, з якої проводиться введення повітряного потоку;
- скидувач, де є зона вивантаження очищеної олійної/зернової домішки та знаходиться люк відбору проб.

Дослідження процесу сортування зернових відходів проводили наступним чином. Наважку зернової культури (20 кг) засипали в бункер 2. Потім включали в роботу генератор повітряного струму 9 і після стабілізації режиму його роботи встановлювали необхідну витрату повітря на пульті управління 1, що відповідає початку поділу сміття на легкі та важкі фракції. Далі за допомогою пульту управління здійснювали дозування подачі наважки сміття у вертикальний

аеродинамічний канал 7. Частинки, для яких сила тяжіння менше сили повітряного потоку, переміщалися разом з повітряним потоком в розширювальну камеру 4 і потрапляли до бункера легкої фракції 5, а частинки компонента, у яких сила тяжіння більша за силу повітряного потоку, осідали у збірник важкої фракції, який встановлено на платформу тензометричних ваг для важкої фракції 8. Після проходження всієї наважки через аеродинамічний канал, за допомогою вбудованого програмного забезпечення роздруковували звіт про сортування, або надсилали результати зважування до бази даних сортування.

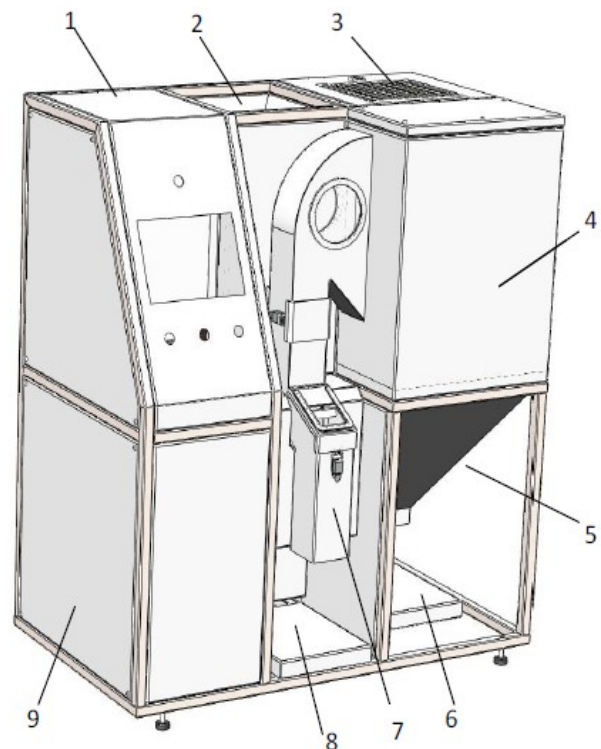


Рис. 1 – Мобільна установка для сортування зернових відходів:

- 1 – пульт управління, 2 – бункер для вхідної сировини,
- 3 – запобіжна сітка для повітря, 4 – розширювальна камера, 5 – бункер для легкої фракції, 6 – платформа тензометричних ваг для легкої фракції,
- 7 – сепараційний канал, 8 – платформа тензометричних ваг для важкої фракції,
- 9 – генератор повітряного потоку

Показники швидкості та витрати кількості повітря паралельно виміряли термоанемометром електронним Venetech GM-8903, який вимірює температуру, швидкість повітряного потоку, а також об'ємну витрату повітря у важкодоступних місцях (вузьких невеликих об'ємах сепараційних каналів). Термоанемометр оснащено надчутливим датчиком «нагріта струна», що забезпечує високу точність

вимірювання швидкості потоку повітря. Чутливість вимірювання 0,001 м/с.

Попередньо встановлено налаштування вібраційного живильника за трьома параметрами: амплітуда 2мм, частота коливань 400Гц; кут нахилу лотка живильника 10°, а також встановлено налаштування вентилятора на повітряний потік 3,3-5,6 м/с. Після запуску вентилятора вмикали живильник та заблокований з живильником секундомір. Для виключення помилок, пов'язаних з коливанням напруги електричної мережі, був встановлений стабілізатор, який забезпечив стабілізацію напруги  $\pm 1\%$ .

Випробовування підтвердили продуктивність сортувальної машини, окреслили недоліки її окремих складових. Запропоновано наступні доробки конструкції: агрегат має бути оснащений модулями аеродинамічного, аспіраційного, пневматичного, повітряного сортування у вертикальному висхідному повітряному потоці; сепараційний канал повинен забезпечувати зональний розподіл швидкості повітряного потоку вздовж сепараційного каналу; агрегат повинен мати пристрої для аеродинамічної стабілізації повітряного потоку; сепараційний канал повинен забезпечувати зону створення та підтримки псевдозрідженого шару для зниження внутрішнього опору сировини; джерело повітряного потоку повинно бути генератором ламінарного повітряного потоку; агрегат повинен мати можливість автоматично налагоджувати технологічний режим сортування при зміні виду та партії сировини, для вирішення завдання був розроблений пакет програм для сортування сміття пшениці, ріпаку, сої, амаранту, соняшнику. Технічні характеристики розробленої мобільної установки для сортування зернових відходів наведено в табл. 1.

Зважаючи на властивості сировини був розроблений спеціальний зразок вібраційного живильника, який має протиадгезивне покриття та спеціальну форму. Це виключає ущільнення сировини та ліквідацію «мертвих» зон скупчення; скорочує час очищення живильника; виключає зупинку сортувальної установки для повторного налаштування. На основі отриманих даних в програмі роботи сортувального агрегату розроблено модуль очищення каналу, який має дві опції – періодичність і тривалість вмикання продувки. Також було експериментально встановлено оптимальний період автоматичного очищення сортувального каналу, який не перевищує одного разу на добу [15].

Для підтвердження ефективності розробленої установки провели порівняльне сортування відходів зернових та олійних культур з різних агропромислових підприємств (табл. 2). Провели аналіз отриманих даних відповідно інформації з наукових джерел [16-18]. Зразки сміття насіння та лущиння соняшника відібрано на підприємствах олійножирової галузі: Приватне акціонерне

товариство «Дніпропетровський олійноекстракційний завод», м. Дніпро; Товариство з обмеженою відповідальністю «Потоки», м. Дніпро; Товариство з додатковою відповідальністю «Укроліяпродукт», м.Зміїв, Полтавська область; Товариство з обмеженою відповідальністю SUNPRO, м. Кривий Ріг; Товариство з обмеженою відповідальністю «Олсидз Блэк Си», порт «Південний» та інші. Зразки сміття насіння зернових культур відібрано у Товаристві з обмеженою відповідальністю «ДМК «Дніпромлин», м. Дніпро; Товариство з обмеженою відповідальністю «Беліс», м. Уральськ, Казахстан.

Таблиця 1 – Технічні характеристики мобільної установки для сортування зернових відходів

№	Назва показника	Одиниця вимірювання	Значення
1	Габаритні розміри, не менше - довжина - ширина - висота	м	0,88 0,50 0,90
2	Маса комплексу поставки, не більше	кг	50
3	Напруга живлення; частота струму	В; Гц	220; 50
4	Енергоспоживання машини, не більше	кВт·год	0,2
5	Продуктивність (номінальна)	кг/год	50
6	Кількість робочих каналів	шт	1
7	Витрата повітря на сепарацію	м <sup>3</sup> /год	200
9	Загальний обсяг сировини, яку завантажують	м <sup>3</sup>	0,02
10	Вологість сировини, не більше	%	9

Ручне розбирання зразків та порівняльне сортування було проведено на пневмосепараційному столі ПСС в лабораторії ТОВ «Потоки»; ручне розбирання зразків та фотоелектронне сортування на фотосепараторі компанії ТАУНО у кондитерському цеху с. Дмухайлівка, Дніпропетровської області; ручне розбирання зразків та аеродинамічне сортування на аеродинамічному сортувальнику САД-1 у цеху підготовки сировини – ФОП «Остапенко О.» у м. Синельникове, Дніпропетровської області.

Дані табл. 2 підтверджують, що обраний аеродинамічний метод сортування зернових відходів має найближче значення вмісту олійної/зернової домішок порівняно з результатами ручного сортування. Впровадження розробленої мобільної установки у виробничі процеси на підприємствах України може значно скоротити час



проведення аналізів якості зернової сировини «з поля» та на всіх стадіях переробки зернових та олійних культур.

Таблиця 2 – Результати порівняльного сортування зернових відходів

Спосіб сортування	Одиниця вимірювання	Показник вмісту зернової/олійної домішки		
		вміст зернової домішки у смітті зерна пшениці	вміст олійної домішки у смітті насіння соняшника	вміст олійної домішки у лушпинні насіння соняшника
Ручне сортування	%	25-40	35,0-45,0	5,0-10,0
Ситове сортування	%	3-4	1,5-2,0	1,5-2,0
Аеродинамічне сортування	%	21-30	40,0	4,0-9,0
Пневматичне сортування	%	Блокування фідера та злежування суміші		
Фотоелектронне сортування	%	Відмова обладнання		

### Висновки

Маючи відсоток олійної/зернової домішки у смітті 40-60%, доцільно використовувати домішки для виробництва харчових продуктів або для потреб тваринництва. Обладнання для сортування сміття має бути спеціально пристосовано під специфіку сміття, мати можливість тонкого налаштування параметрів повітряного потоку та живильника сміття. Сортувальні машини продуктивністю до 5 тон на добу можуть бути використані не тільки для потреб фермерських господарств, але і для потреб зернових лабораторій підприємств для вилучення сміттевої домішки, а також для контролю налаштувань технологічного обладнання (шеретувальні машини, розсів, бітер сепаратори, і т. і.).

### Список літератури

1. Інструкція про ведення обліку та оформлення операцій із зерном та продуктами його переробки на хлібоприймальних та зернопереробних підприємствах. Наказ № 661 від 13.10.2008. Міністерство аграрної політики та продовольства України. К.: Офіц. вид-

во, 2008. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1111-08#Text>.

2. Ovcharuk Oleh, Hutsol Taras, Ovcharuk Olena, Rudskiy Vadym, Mudryk Krzysztof, Jewiarz Marcin, Wrybel Marek, Styks Jakub. Prospects of Use of Nutrient Remains of Corn Plants on Biofuels and Production Technology of Pellets. *Renewable Energy Sources:Engineering, Technology, Innovation*. 2020. 1. P. 293-300. doi: 10.1007/978-3-030-13888-2\_29.
3. Gołbiewski Jarosław. Regional diversification of the productivity of the biomass sector in Poland in the context of the development of the bio-economy. Hradec Economic Days 2018. 2018. January 30-31 2018. Hradec Králové. Czech Republic. University of Hradec Králové. Part I. P. 286-298. doi: 10.36689/uhk/hed/2018-01-028.
4. Верещинський О. П. *Наукові основи і практика підвищення ефективності сортів хлібопекарських помелів пшениці*. Автореферат дисертації на здобуття ступеня доктора технічних наук. Київ: НУХТ, 2013. 37 с.
5. Пшениця. Технічні умови. ДСТУ 3768:2019. К: ДП "УкрНДНЦ", 2019. 23 с.
6. Алієв Е. Б. *Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику*. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Харків: НААН України, Інститут олійних культур, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, 2020. 530 с.
7. Алієв Е. Б., Дудін В. Ю., Гаврильченко А. С., Івлєв В. В. Моделювання процесу сепарації сипкого матеріалу залежно від його фізико-механічних властивостей. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. Миколаївський національний аграрний університет. 2019. № 4. С. 114-121. doi: 10.31521/2313-092X.
8. Алієв Е. Б., Шевченко І. А. Дослідження аеродинамічних властивостей насіння олійних культур. *Вісник аграрної науки*. 2017. № 3 (769). С. 63-65. doi: 10.31073/agrovisnyk201703-09.
9. Mykhailov Ye., Golebiewski J., Kiurchev S., Hutsol T., Kolodii O., Nurek T., Glowacki Sz., Zadosna N., Verkholtantseva V., Palianychka N., Kucher O. *Economic and technical efficiency of sunflower seed processing*. Monograph. Warszawa, 2020. 158 p. doi: 10.22630/SGGW.WE.9788375839340.
10. Задосна Н. О. *Обґрунтування параметрів та режимів роботи жалюзійного повітророзподільника сепаратора олійної сировини соняшника*. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Мелітополь, 2020. 260 с.
11. Патент на корисну модель №145744, Україна, МПК А01F 12/44, В07В 4/02. Аеродинамічний сепаратор колонного типу для тонкого очищення насінневих матеріалів/ Бардадим В.К., Бардадим Б.О., Кудрявцев М.І., Ярошкін В.П.; №2020 06728; заявл. 29.12.20; опубл. 28.12.20, Бюл.№24.
12. Хамуєв В. Г. *Обоснование параметров глубокого пневмосепарационного канала для очищения зерна от трудноотделимых примесей*. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2008. 24 с.

13. Кюрчев С. В., Колодій О. С. Результаты исследования рациональных размеров вертикального аспирационного канала сепаратора семян сельскохозяйственных культур. *Motrol "Motorization and energetics in agriculture"*. Lublin-Rzeszow. 2013. Vol. 15. № 2. P. 169-175.
14. Пашинова Н. В. Совершенствование процесса сепарации зерна в вертикальных пневмоканалах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Улан-Уде: Digital Science & Education LP, 2013. 134 с.
15. Kudryavtsev I. M., Chursinov Y. O., Lutsenko M. V. Innovative sorting equipment for the food industry. *Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів ТАСХ-2022: Матеріали I Міжнародної наукової конференції, що присвячена 100-річчю Дніпровського державного аграрно-економічного університету*. Дніпро: "Середняк Т.К.", 2022. С. 117-119.
16. Mikhailov Evgeniy, Postnikova Marina, Zadosnaia Natalia, Afanasyev Oleg. *Methodological aspects of determining parameters of a scalper-type air-sieved separator airflow*. W. (eds.) Springer, Heidelberg. LNCS. 2019. Vol. 2. P. 133-137.
17. Задосная Н. А. Аспекты обоснования параметров и режимов работы пневмосепаратора масличного сырья подсолнечника. *MOTROL Commission of Motorization and Power industry in Agriculture Polish Academy of Sciences Branch in Lublin*. 2015. Vol. 17. № 9. P. 43-49.
18. Rakowska Joanna, Gołębiewski Jarosław. EU regional policy support for bioenergy sector in Poland in 2007-2013 (2015). *Proceedings of the International Scientific Conference: Rural Development*. 2017. P. 385-390. doi: 10.15544/RD.2017.196.
19. *pomeliv pshenytsi*. Avtoreferat dysertatsiyi na здобуття ступеня доктора технічних наук. Kyiv. NUKHT, 2013. 37 p.
20. Pshenytsya. *Tekhnichni umovy*. DSTU 9252-2016. K. DP "UkrNDNC", 2019. 23 p.
21. Aliyev E. B. *Mekhaniko-tekhnologichni osnovy protsesu pretsyziynoyi separatsiyi nasimnyevoho materialu sonyashnyku*. Dysertatsiya na здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Kharkiv. NAAN Ukrainu, Instytut oilynux kyltur, Xarkivskuy nazionalnuy texnichuy universitet silskogo gospodarstva imeni Petra Vasulenko, 2020. 530 p.
22. Alyev É. B., Dudyn V. Yu., Havryl'chenko A. S., Yvlev V. V. Modelyrovanye protsesa separatsyyi sypucheho materyala v zavysymosti ot eho fizyko-mekhanicheskyykh svoystv. *Visnyk ahrarnoyi nauky Prychornomor'ya*. Mykolayivs'kyy natsional'nyy ahrarnyy universitet, 2019, Vol. 4, pp. 114-121, doi: 10.31521/2313-092X.
23. Aliyev E. B., Shevchenko I. A. Doslidzhennya aerodynamichnykh vlastyvostry nasinnya oliynykh kul'tur. *Visnyk ahrarnoyi nauky*, 2017, 3 (769), pp. 63-65, doi: 10.31073/agrovisnyk201703-09.
24. Mykhaylov Ye., Holebievski Ya., Ivanyshyn V., Kyurchev S., Hutsol T., Kolodiy O., Nuryk T., Hlovatski Sh., Zadosna N., Verkholantseva V., Palyanychka N., Kucher O. Ekonomichna i tekhnichna efektyvnist' obrobky nasinnya sonyashnyku. Monohrafiya. *Warsaw University of Life Sciences Press*, 2020, p. 158, doi: 10.22630/SGGW.WE.9788375839340.
25. Zadosna N. O. *Obhruntuvannya parametriv ta rezhymiv roboty zhalyuziynoho povitrorozpodil'nyka separatora oliynoyi syrovyny sonyashnyka*. Melytopol'. 2020. Dysertatsiya na здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. 260 p.
26. Patent na korysnu model' №145744, Ukrayina, MPK A01F 12/44, V07V 4/02. Aerodynamichnyy separator kolonnoho typu dlya tonkoho ochyshchennya nasimnyevykh materialiv/Bardadym V.K., Bardadym B.O., Kudryavtsev M.I., Yaroshkin V.P. № 2020 06728; zayavl. 29.12.20; opubl. 28.12.20, Byul. №24.
27. Khamuev V. H. *Obosnovanie parametrov glybokogo pnevmoseparazionnogo kanala dlia ochishenia ot trudnootdilimux primesey*. Avtoreferat dysertatsiyi na здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. M. 2008. 24 p.
28. Kyurchev S. V., Kolodiy O. S. Rezul'taty yssledovannya ratsyonal'nykh razmerov vertykal'noho aspyratsyonnoho kanala separatora semyan sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. *Motrol "Motorization and energetics in agriculture"*, Lublin-Rzeszow, 2013, Vol. 15, No 2, pp. 169-175.
29. Pashynova N. V. *Sovershenstvovanye protsesa separatsyyi zerna v vertykal'nykh pnevmokanalakh*. Dysertatsiya na soyskanye uchenoy stepeny kandidata tekhnicheskyykh nauk. Ulan-Ude. Digital Science & Education LP, 2013. 134 p.
30. Kudryavtsev I. M., Chursinov Y. O., Lutsenko M. V. Innovative sorting equipment for the food industry. *Teoretychni ta eksperymental'ni aspekty suchasnoyi khimiyi ta materialiv TASKH-2022: Materialy I Mizhnarodnoyi naukovoyi konferentsiyi, shcho prysvyachena 100-*

### References (transliterated)

1. Instruktsiya pro vedennya obliku ta oformlennya operatsiy iz zernom ta produktamy yoho pererobky na khlibopryymal'nykh ta zernopererobnykh pidpryyemstvakh: Nakaz №661 vid 13.10.2008. Ministerstvo ahrarnoyi polityky ta prodovol'stva Ukrayiny., K: 2008. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1111-08#Text>.
2. Ovcharuk Oleh, Hutsol Taras, Ovcharuk Olena, Rudskiy Vadym, Mudryk Krzysztof, Jewiarz Marcin, Wrybel Marek, Styks Jakub. Prospects of Use of Nutrient Remains of Corn Plants on Biofuels and Production Technology of Pellets. *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation*, 2020, 1, pp. 293-300, doi: 10.1007/978-3-030-13888-2\_29.
3. Gołębiewski Jarosław. Regional diversification of the productivity of the biomass sector in Poland in the context of the development of the bio-economy. *Hradec Economic Days 2018*, 2018, January 30-31, 2018, Hradec Králové, Czech Republic. 2018, University of Hradec Králové, part I, pp. 286-298, doi: 10.36689/uhk/hed/2018-01-028.
4. Vereshchyns'kyu O. P. *Naukovi osnovy i praktyka pidvyshchennya efektyvnosti sortovykh khlibopekars'kykh*

- richchyu Dniprovskoho derzhavnoho ahrarno-ekonomichnoho universytetu. Dnipro. "Serednyak T.K.", 2022, pp. 117-119.*
16. Mikhailov Evgeniy, Postnikova Marina, Zadosnaia Natalia, Afanasyev Oleg. *Methodological aspects of determining parameters of a scalper-type air-sieved separator airflow*. W. (eds.) Springer, Heidelberg. LNCS, 2019, Vol. 2, pp. 133-137.
17. Zadosnaya N. A. *Aspekty obosnovanyya parametrov y rezhymov raboty pnevmoseparatora maslychnoho syr'ya* podsolnechnyka. *MOTROL Commission of Motorization and Power industry in Agriculture Polish Academy of Sciences Branch in Lublin*, 2015, Vol. 17, 9, pp. 43-49.
18. Rakowska Joanna, Gołębiewski Jarosław. *EU regional policy support for bioenergy sector in Poland in 2007-2013 (2015). Proceedings of the International Scientific Conference: Rural Development*, 2017, pp. 385-390, doi: 10.15544/RD.2017.196.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Чурсінов Юрій Олексійович** – доктор технічних наук, професор, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. С. Єфремова 25, м. Дніпро, Україна, 49000; +38 (050) 229-48-95; ORCID: 0000-0001-4251-6375; chursinov8888@gmail.com.

**Tchursinov Yuriy** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Dnipro State Agrarian and Economic University, Sergiy Yefremov str., 25, Dnipro, Ukraine, 49600; +38 (050) 229-48-95; ORCID: 0000-0001-4251-6375; chursinov8888@gmail.com

**Кудрявцев Ігор Миколайович** – аспірант, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. С. Єфремова 25, м. Дніпро, Україна, 49000; +38 (096) 609-11-79; ORCID: 0000-0002-9939-7014; kudravcevigor898@gmail.com.

**Kudriavtsev Ihor** – postgraduate student, Dnipro State Agrarian and Economic University, Sergiy Yefremov str., 25, Dnipro, Ukraine, 49600; +38 (096) 609-11-79; ORCID: 0000-0002-9939-7014; kudravcevigor898@gmail.com.

**Луценко Марина Василівна** – кандидат технічних наук, доцент, вул. Шолохова 19, м. Дніпро, Україна, 49080; +38 (099) 068-97-13; ORCID: 0000-0002-0924-5157; maryna.lutsenko11@gmail.com.

**Lutsenko Maryna** – PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Sholokhova St. 19, Dnipro, Ukraine, 49080; +38 (099) 068-97-13; ORCID: 0000-0002-0924-5157; maryna.lutsenko11@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

Чурсінов Ю. О., Кудрявцев І. М., Луценко М. В. Розробка мобільної установки для сортування зернових відходів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 93-99. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.14.

*Please cite this article as:*

Tchursinov Y., Kudriavtsev I., Lutsenko M. Creation of a mobile installation for sorting grain impurities. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2(12), pp. 93–99, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.14.

*Надійшла (received) 30.05.2022*

УДК 621.316.99

doi:10.20998/2413-4295.2022.02.15

## КОМБІНОВАНА МЕТОДИКА ЗОНДУВАННЯ ҐРУНТУ В РАМКАХ КОНТРОЛЮ СТАНУ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

Д. Г. КОЛУШКО, С. С. РУДЕНКО \*

НДПКИ «Молнія», НТУ «ХПІ», м.Харків, УКРАЇНА  
\*e-mail: nio5\_molniya@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Результатом вертикального електричного зондування є визначена геоелектрична структура ґрунту. Процедура зондування ґрунту регламентована в низці національних та міжнародних стандартів з випробування систем заземлення. Використання традиційної чотириелектродної симетричної установки Веннера дозволяє проводити дослідження на глибину до 1/3 величини розносу струмових електродів, чого недостатньо для коректного розрахунку параметрів системи заземлення. Альтернативою може бути використання установки Шлюмберже. Показано, що особливості цієї установки при використанні в рамках випробування систем заземлення стають недоліками: чутлива до локальних включень та вертикальної неоднорідності, складні формули для інтерпретації, відсутність прямої залежності між рознесенням електродів та глибиною зондування, а отже неможливість побудови універсальних палеток інтерпретації. Тому виникла необхідність створення методики зондування ґрунту в рамках контролю стану заземлювального пристрою з більшою глибинністю. В роботі було обґрунтовано необхідність такої розробки. На основі аналізу сформовано вимоги до процедури зондування ґрунту, яка має відповідати методиці електромагнітної діагностики систем заземлення. Показано, що однією з головних вимог є представлення результатів зондування у вигляді багатопарової геоелектричної структури з плоско-паралельними горизонтальними границями поділу. Запропоновано комбінований спосіб виконання зондування ґрунту, який засновано на поетапному використанні установок Веннера та Шлюмберже, що дозволило поєднати переваги та зменшити впливи недоліків цих установок в рамках контролю стану ЗП. Запропонована комбінована методика зондування ґрунту дозволяє збільшити глибину зондування від 1/3 величини розносу струмових електродів до 1/2 без залучення додаткових вимірювальних приладів, програмних засобів для інтерпретації та електротехнічного персоналу. При цьому тривалість виконання зондування для діючої підстанції буде становити 30-90 хвилин, що не збільшить загальну тривалість електромагнітної діагностики.

**Ключові слова:** підстанція; заземлювальний пристрій; вертикальне електричне зондування; геоелектрична структура; ґрунту; установка Веннера; установка Шлюмберже; комбінована методика

## COMBINED TECHNIQUE SOIL SOUNDING IN THE FRAMEWORK OF MONITORING THE CONDITION OF THE GROUNDING SYSTEM

D. KOLIUSHKO, S. RUDENKO

Research and Design Institute "Molniya", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The result of vertical electrical sounding is the determined geoelectrical structure of the soil. The soil probing procedure is regulated in a number of national and international standards for testing grounding systems. The use of a traditional four-electrode symmetrical Wenner array configuration allows conducting research to a depth of up to 1/3 of the distance between current electrodes, which is not enough for the correct calculation of the parameters of the grounding system. An alternative can be the use of a Schlumberger array configuration. It is shown that the features of this array configuration, when used as part of the testing of grounding systems, become disadvantages: it is sensitive to local inclusions and vertical heterogeneity, necessary the complex formulas for interpretation, the absence of a direct relationship between the separation of electrodes and the probing depth, and therefore the impossibility of building universal palettes of interpretation. Therefore, there was a need to create a technique of probing the soil within the framework of monitoring the state of the grounding system with a greater depth. The work justified the need for such development. Based on the analysis, the requirements for the soil probing procedure were formed, which should correspond to the methodology of electromagnetic diagnostics of grounding systems. It is shown that one of the main requirements is the presentation of sounding results in the form of a multilayer geoelectrical structure with plane-parallel horizontal separation boundaries. A combined method of performing soil sounding is proposed, which is based on the step-by-step use of Wenner and Schlumberger array configurations, which made it possible to combine the advantages and reduce the effects of the disadvantages of these installations within the framework of monitoring the state of the grounding. The proposed combined technique of soil sounding allows to increase the depth of probing from 1/3 of the distance of the current electrodes to 1/2 without the involvement of additional measuring devices, interpretation software and electrical personnel. At the same time, the duration of procedure for an operating substation will be 30-90 minutes, which will not increase the total duration of electromagnetic diagnostics of grounding system.

**Keywords:** substation; grounding system; vertical electrical sounding; geoelectrical structure; soil; Wenner array configuration; Schlumberger array configuration; combined technique.

### Вступ

Метою проведення вертикального електричного зондування (ВЕЗ) в рамках контролю

стану заземлювального пристрою (ЗП) [1-3] є визначення параметрів геоелектричної структури [2-11] шляхом інжектування випробувального струму генератором та вимірювання падіння напруги на

певній ділянці поверхні ґрунту. Електрофізичні характеристики ґрунту (кількість шарів, їх питомий опір та потужність) розраховуються з використанням різних засобів інтерпретації (палеток або спеціальних розрахункових програм) [7-10]. Результати ВЕЗ є вихідними даними для визначення нормованих електричних параметрів ЗП. Фактично від якості виконання ВЕЗ залежить точність розрахунку напруги дотику та опору ЗП.

Апаратура, методика проведення ВЕЗ та засоби інтерпретації є добре розвиненими як теоретично, так і практично в рамках проведення геологічних вишукувань [9]. Відомо, що кожна установка ВЕЗ окрім особливого розташування вимірювальних електродів, характеризується глибинністю (глибиною зондування при однаковій величині розносу струмових електродів) та відповідним математичним апаратом, необхідним для інтерпретації результатів.

В рамках контролю стану ЗП широкое розповсюдження отримала симетрична чотириелектродна установка Шлюмберже (див. рис. 1), що пов'язано із особливостями представлення ґрунту у вигляді геоелектричної структури з плоско-паралельними границями поділу в математичних моделях для розрахунку параметрів ЗП.

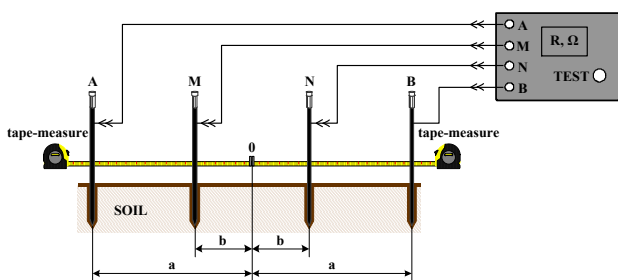


Рис. 1 – Зондування ґрунту чотириелектродною симетричною установкою

Відповідно до даних, наведених у роботах з геофізичних досліджень, глибинність в долях від розносу струмових електродів для установки Шлюмберже змінюється від  $(1/10) L_{AB}$  до  $(1/2) L_{AB}$ , при цьому в літературі [44] відомі випадки, коли глибинність зменшується до  $(1/200) L_{AB}$  під впливом макроанізотропії та відношення ПЕО шарів.

Тим не менш вказане зменшення глибинності установки Шлюмберже, як правило спостерігається при екстремальних співвідношеннях ПЕО, й в практиці виконання ВЕЗ при тестуванні ЗП приймається, що глибинність установки Шлюмберже –  $1/2 L_{AB}$ .

Проте особливості цієї установки при використанні в рамках випробування ЗП стають недоліками: чутлива до локальних включень та вертикальної неоднорідності, складні формули для інтерпретації, відсутність прямої залежності між рознесенням електродів та глибиною зондування, а отже неможливість побудови універсальних палеток інтерпретації.

В Україні в рамках електромагнітної діагностики ЗП (ЕМД ЗП) використовується установка Веннера, яка фактично є частковим випадком установки Шлюмберже. Для неї характерні однакова відстань між сусідніми вимірювальними електродами (тобто  $a = b$  на рис. 1), однозначна залежність між величиною розносу електродів та глибиною зондування і відносно прості вирази для інтерпретації результатів.

Крім того установка Веннера, характеризується рядом таких переваг, як:

- високий рівень сигналу;
- висока чутливість до горизонтальних меж розділу шарів;
- слабка чутливість до вертикальних границь, яка послаблює вплив нетипових включень, що мають локальний характер і не надають значного впливу на розтікання струмів з ЗП.

Проте істотним недоліком установки Веннера є відносно мала глибина зондування, яка орієнтовно дорівнює  $1/3$  від величини рознесення струмових електродів [12]. Враховуючи, що навколо електричних станцій та підстанцій, розташованих в стислій міській чи промисловій забудові, відсутній вільний простір для виконання ВЕЗ на глибину не менше однієї діагоналі ЗП, актуальним є розробка методики зондування ґрунту з більшою глибинністю. Необхідність розробки такої методики була аргументована авторами ще в 2014 р. [1].

Крім того, актуальність такої методики зростає в зв'язку з можливістю проведення експериментальних вимірювань лише на території енергетичного об'єкту, а не навколо нього, через наслідки військових дій на території України (де ще менше вільного від комунікацій, заземлювачів, будівель та споруд простору).

### Мета роботи

Створення методики зондування ґрунту в рамках контролю стану заземлювального пристрою з більшою глибинністю.

### Формування вимог до нової методики ВЕЗ

На даний час існує низка установок для проведення ВЕЗ, які дозволяють вирішувати вузькоспрямовані геологічні задачі. Найбільш точним та глибинним є так званий томографічний метод, який використовує десятки вимірювальних електродів та спеціалізовані георозвідувальні станції. В цілому цей метод є комбінацією використання різних установок ВЕЗ та зміщення їх відносно центру в різних напрямках з метою побудови складної 3D картини геоелектричної структури. Однак використання будь-якої з методик томографії з більшою глибинністю ніж в установки Веннера неможливо через відсутність вільної від заземлювачів та обладнання ділянки на території енергетичного об'єкту (простір для виконання вимірів дорівнює площі об'єкту). Якщо проводити томографію поруч зі станцією чи

підстанцією, результат в переважній більшості випадків не буде відповідати безпосередньо ґрунту об'єкту. Крім того, отримана 3D картина ґрунту не зможе використовуватися для розрахунків через відсутність необхідної математичної моделі. Таким чином, новий спосіб виконання ВЕЗ має базуватися на установці, що використовується в рамках ЕМД ЗП, та відповідати певним критеріям.

Тому сформуємо вимоги до нового способу ВЕЗ:

- простота та практичність виконання (ВЕЗ виконується в польових умовах діючої електроустановки незалежно від погодних умов, тож методика повинна бути максимально алгоритмізована та спрощена);

- час виконання 30–90 хв. персоналом з двох осіб (ВЕЗ є однією з вимірювальних процедур експериментального етапу ЕМД ЗП, тривалість якого складає 30-60 хв, заміна методики ВЕЗ не повинна збільшити загальну тривалість ЕМД ЗП);

- можливість виконання ВЕЗ тими ж приладами, що й зондування установкою Веннера;

- представлення результатів ВЕЗ у вигляді багат шарової геоелектричної структури з плоско-паралельними горизонтальними границями поділу (вимога пояснюється математичними моделями ЗП та проведенням ВЕЗ поблизу електроустановки, а не на її території);

- висока чутливість до верхніх шарів ґрунту (саме вони найбільше впливають на значення напруги дотику).

Враховуючи вищесказане, авторами запропоновано спосіб проведення ВЕЗ на базі установок Веннера та Шлюмберже для оптимального використання їх переваг (див. рис. 1).

### Створення нового способу ВЕЗ

Спосіб представляє собою комбінацію проведення вимірювань за допомогою установок Веннера та Шлюмберже (див. рис. 1) у вигляді двох етапів, які умовно можна назвати:

- «прямий хід»;
- «зворотній хід».

При «прямому ході» зондування виконується установкою Веннера при поступовому симетричному збільшенні відстані між струмовими електродами на максимально можливу відстань. Це дозволяє дослідити ґрунт на глибину 1/3 величини розносу струмових електродів з мінімальним впливом локальних включень та вертикальних неоднорідностей та з доброю роздільною здатністю щодо горизонтальної шаровості ґрунту.

Після закінчення вимірювань на останній точці розпочинається «зворотній хід», при якому струмові електроди залишаються на місці, а потенціальні поступово переміщуються до центру у зворотному порядку (тобто встановлюються у попередніх точках). Таким чином, вимірювання «зворотного ходу»

виконується установкою Шлюмберже, й саме для глибинних шарів, де вплив її недоліків практично мінімізоване.

При виконанні вимірювань відстань встановлення потенціальних електродів відносно центру симетрії установки  $L_i$  лежить в діапазоні від мінімально допустимої (див. т. 0 на рис.1)  $L_{min}$  до максимально можливої відстані  $L_{max}$ . При цьому  $L_{max}$  складає 1/6 максимального розміру вільної ділянки для проведення ВЕЗ, а  $L_{min}$  має відповідати умовам [20] (вказані вимоги є спільними для обох установок):

$$\begin{cases} L_{min} > 3d_e; \\ L_{min} > 3t_e, \end{cases} \quad (1)$$

де  $d_e$  та  $t_e$  – діаметр та глибина занурення у ґрунт вимірювальних електродів відповідно.

Таким чином, запропонована комбінована методика виконання ВЕЗ є наступною:

#### 1. Підготовка до вимірювань

1.1 Вимір питомого опору ґрунту необхідно виконувати на рівному майданчику, вільному від опор високовольтних ліній, залізничних шляхів та підземних металевих комунікацій (трубопроводів, кабелів).

1.2 Розтягнути дві рулетки Р1 та Р2 на максимальну довжину від місця розташування тестера заземлення під кутом  $180^0$  один до одного;

1.3 Зібрати вимірювальну схему згідно з інструкцією до тестера заземлення та ввімкнути його.

#### 2. Прямий хід

2.1 Встановити потенційні та струмові електроди на мінімально допустимій відстані за умови, що  $a=3b$  й глибина забивки потенційних електродів та їх діаметр не повинні перевищувати значення  $b/3$ . Рекомендується:  $b = 0,1$  м і  $a = 0,3$  м;

2.2 Провести вимірювання опору установки  $R_{аттау}$ ;

2.3 Зафіксувати виміряне значення  $R_{аттау}$  на відповідній відстані  $a$  та  $b$ ;

2.4 Встановити потенційні та струмові електроди на більшій відстані за умови, що  $a=3b$ . Повторити пп. 2.2–2.4. Рекомендується встановлювати значення  $b$  з [0,13; 0,17; 0,22; 0,33; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,3; 1,7; 2,2; 3,3; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10; 13; 17 і т.д.] м до виходу на максимально можливу відстань. Глибина забивки має відповідати умові (2), тобто  $b/3$ .

#### 3. Зворотній хід

3.1 Встановити потенційні електроди на попередню відстань згідно ряду з п. 2.5, залишаючи струмові на місці. Глибина забивки потенційних електродів не повинна перевищувати значення  $b/3$ .

3.2 Провести вимірювання опору установки  $R_{аттау}$ ;

3.3 Зафіксувати виміряне значення  $R_{аттау}$  на відповідній відстані  $a$  та  $b$ .

3.4 Повторити пп. 3.1–3.5 до досягнення величини  $b = 1,0$  м (рекомендоване значення), т.я. подальше зменшення слабко впливає на збільшення глибини зондування.

#### 4. Розібрати вимірвальну схему.

Використання комбінованої методики замість традиційних дозволяє збільшити глибину зондування з  $1/3 L_{AB}$  до  $1/2 L_{AB}$ , зберігаючи при цьому чутливість до горизонтальних шарів та слабку чутливість до локальних включень.

Для побудови кривої ВЕЗ необхідно визначити значення уявного питомого електричного опору  $\rho_y$  в залежності від відстані між струмовим та потенційним електродом за наступним виразом:

$$\rho_y = \frac{\pi(a^2 - b^2)}{2b} R_{array}. \quad (2)$$

Зважаючи на те, що фактично установка Веннера є частковим випадком установки Шлюмберже, то побудову кривої ВЕЗ та її інтерпретацію можна виконати за допомогою одного й того ж геометричного коефіцієнту та математичного апарату. Авторами було вирішено задачу щодо інтерпретації результатів ВЕЗ для чотиришарового ґрунту [1].

Після практичної апробації пропонується внести зміни до додатку СОУ, в частині виконання ВЕЗ з метою оптимізації процедури ЕМД ЗП.

#### Висновки

Проаналізовано та доведено практичну необхідність розробки способу вертикального електричного зондування ґрунту з більшою глибинністю в рамках діагностики стану заземлювального пристрою.

Сформовано вимоги до розробки нового способу зондування ґрунту.

Запропоновано комбінований спосіб виконання зондування ґрунту, який засновано на поетапному використанні установок Веннера та Шлюмберже, що дозволило поєднати переваги та зменшити впливи недоліків цих установок в рамках контролю стану ЗП. Запропонована комбінована методика зондування ґрунту дозволяє збільшити глибину зондування від  $1/3$  величини розносу струмових електродів до  $1/2$  без додаткових матеріальних затрат.

Сформовано методику зондування ґрунту за комбінованим способом, для використання вимірвальними лабораторіями та експлуатуючим персоналом електричних станцій та підстанцій.

#### Список літератури

1. *Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок*. Типова інструкція. СОУ 31.2-

21677681-19:2009. К.: Мінпаливенерго України, 2010. 54 с.

2. *IEEE Std 80-2013. Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York, IEEE, 2013. 206 p. doi: 10.1109/IEEEESTD.2015.7109078.
3. *IEEE Std 81-2012. Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. New York, IEEE, 2012. 86 p. doi: 10.1109/IEEEESTD.2012.6392181.
4. Rencher A. C., Christensen W. F. *Methods of multivariate analysis, Third Edition*. John Wiley & Sons, Inc., 2012. 768 p. doi: 10.1002/9781118391686.
5. Cavka D., Mora N., Rachidi F. A Comparison of Frequency Dependent Soil Models: Application to the Analysis of Grounding Systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2014. Vol. 56. no. 1. P. 177-187. doi: 10.1109/TEMC.2013.2271913.
6. Md. Abdus Salam, Quazi Mehbubar Rahman, Swee Peng Ang, Fushuan Wen. Soil resistivity and ground resistance for dry and wet soil. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*. 2017. no. 5. P. 290–297. doi: 10.1007/s40565-015-0153-8.
7. Alotto P., Torchio R., Andolfato R., Cuccarollo D. Identification of multilayer soil models for grounding systems from surface measurements. *XGSLab: Technical Report*. 2018. 9 p. doi: 10.13140/RG.2.2.35135.15526.
8. Uhlmann G. Electrical impedance tomography and Calderón's problem. *Inverse Problems*. 2009. Vol. 25. P. 2-41. doi: 10.1088/0266-5611/25/12/123011.
9. Chow Y. T., Ito K., Zou J. A direct sampling method for electrical impedance tomography. *Inverse Problems*. 2014. Vol. 30. no. 9. P. 1-25. doi: 10.1088/0266-5611/30/9/095003.
10. Pereira W. R., Soares M. G., Neto L. M. Horizontal multilayer soil parameter estimation through differential evolution. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. Vol. 31. no. 2. P. 622–629. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2980875.
11. Колиушко Г. М., Колиушко Д. Г., Руденко С. С. К вопросу повышения точности расчета нормируемых параметров заземляющих устройств действующих электроустановок. *Електротехніка і електромеханіка*. 2014. no. 4. С. 65-70. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13.
12. Koliushko D. G., Rudenko S. S., Asmolova L. V., Tkachova T. I. Determination of the soil sounding depth for the earthing resistance calculation of substations 35 kV. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020, no 1. P. 52-55. doi: 10.20998/2074-272X.2020.1.08.
13. Koliushko D. G., Rudenko S. S., Saliba A. N. Method of integro-differential equations for interpreting the results of vertical electrical sounding of the soil. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. no. 5. P. 67–70. doi: 10.20998/2074-272X.2021.5.09.

#### References (transliterated)

1. *Test and control devices, electrical grounding*. Standard instruction. SOU 31.2-21677681-19:2009. Kyiv, Minenergougillya Ukrainy Publ., 2010. 54 p.
2. *IEEE Std 80-2013. Guide for Safety in AC Substation Grounding*. New York, IEEE, 2013. 206 p. doi: 10.1109/IEEEESTD.2015.7109078.
3. *IEEE Std 81-2012. Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a*

- Grounding System*. New York, IEEE, 2012. 86 p. doi: 10.1109/IEEEESTD.2012.6392181.
4. Rencher A. C., Christensen W. F. *Methods of multivariate analysis, Third Edition*. John Wiley & Sons, Inc., 2012. 768 p., doi: 10.1002/9781118391686.
  5. Cavka D., Mora N., Rachidi F. A Comparison of Frequency Dependent Soil Models: Application to the Analysis of Grounding Systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, Vol. 56, no. 1, pp. 177-187, doi: 10.1109/TEMC.2013.2271913.
  6. Md. Abdus Salam, Quazi Mehbubar Rahman, Swee Peng Ang, Fushuan Wen. Soil resistivity and ground resistance for dry and wet soil. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*. 2017, no. 5, pp. 290–297, doi: 10.1007/s40565-015-0153-8.
  7. Alotto P., Torchio R., Andolfato R., Cuccarollo D. Identification of multilayer soil models for grounding systems from surface measurements. *XGSLab: Technical Report*, 2018. 9 p., doi: 10.13140/RG.2.2.35135.15526.
  8. Uhlmann G. Electrical impedance tomography and Calderón's problem. *Inverse Problems*, 2009, Vol. 25, pp. 2-41, doi:10.1088/0266-5611/25/12/123011.
  9. Chow Y. T., Ito K., Zou J. A direct sampling method for electrical impedance tomography. *Inverse Problems*, 2014, Vol. 30, no. 9, pp. 1-25, doi:10.1088/0266-5611/30/9/095003.
  10. Pereira W. R., Soares M. G., Neto L. M. Horizontal multilayer soil parameter estimation through differential evolution. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, Vol. 31, no. 2, pp. 622–629, doi: 0.1109/ACCESS.2020.2980875.
  11. Koliushko G. M., Koliushko D. G., Rudenko S. S. On the problem of increasing computation accuracy for rated parameters of active electrical installation ground grids. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2014, no. 4, pp. 65-70, doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.13.
  12. Koliushko D. G., Rudenko S. S., Asmolova L. V., Tkachova T. I. Determination of the soil sounding depth for the earthing resistance calculation of substations 35 kV. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 1, pp. 52-55, doi: 10.20998/2074-272X.2020.1.08.
  13. Koliushko D. G., Rudenko S. S., Saliba A. N. Method of integro-differential equations for interpreting the results of vertical electrical sounding of the soil. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 5, pp. 67–70, doi: 10.20998/2074-272X.2021.5.09.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Коліушко Денис Георгійович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту "Молнія", м. Харків, Україна; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net

**Denis Koliushko** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher, Senior researcher of the Department of Automated electromechanics systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0003-3112-4260; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net

**Руденко Сергій Сергійович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник Науково-дослідного та проектно-конструкторського інституту "Молнія", м. Харків, Україна; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net

**Serhii Rudenko** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior researcher of Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0002-2544-1545, e-mail: nio5\_molniya@ukr.net

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Коліушко Д. Г., Руденко С. С. Комбінована методика зондування ґрунту в рамках контролю стану заземлювального пристрою. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 2 (12). С. 100-104. doi:10.20998/2413-4295.2022.02.15.

*Please cite this article as:*

Koliushko D., Rudenko S. Combined technique soil sounding in the framework of monitoring the condition of the grounding system. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 2(12), pp. 100–104, doi:10.20998/2413-4295.2022.02.15.

*Надійшла (received) 03.06.2022*



## ЗМІСТ

### ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

<i>Вакулєнко С. В.</i> Теоретичне дослідження ефективності використання спеціального різцетримача з орієнтованим положенням центра жорсткості	3
<i>Гогасєв К. О., Подрєзов Ю. М., Волощенко С. М., Аскєров М. Г., Мінаков М. В., Шуригін Б. В.</i> Підвищення опору зношуванню при легуванні марганцем ADI	10
<i>Петраков Ю. В., Сікайло М. О.</i> Імітаційне моделювання динаміки 2.5D фрезерування кінцевими фрезами	17
<i>Рудик А. В., Рудик В. А.</i> Вибір режимів ефективного шліфування валів при керуванні міжосьовою відстанню верстата	25
<i>Сліпчук А. М., Яким Р. С., Кук А. М.</i> Дослідження покращеного з'єднання «зубок-шарошка» шляхом введення додаткового елемента для бурових доліт	33

### ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

<i>Строкань О. В., Назаров Є. М.</i> Система управління «Розумний будинок» на основі технології Internet of Things	42
<i>Сюань Ч., Вербицький Є. В.</i> Система дистанційного керування кроковим двигуном на базі плати розробника ESP32	48
<i>Цибульник С. О., Бідник Д. С., Півторак Д. О.</i> Розроблення автоматизованої бібліографічної системи	54
<i>Цибульник С. О., Накорик В. В., Рупіч С. С., Півторак Д. О.</i> Моделювання повітряного потоку в районі української антарктичної станції	61

### ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Баранова А. О., Новожилова Т. Б., Літовка А. І., Білоусов М. В.</i> Проблема забруднення світового океану пластиковими відходами	69
<i>Витяганєць В. С., Байрачний В. Б., Пітак І. В., Баранова А. О.</i> Дослідження інтенсифікації процесів сепарації з використанням тепла відходящих газів	74
<i>Григорєнко І. В., Григорєнко С. М.</i> Розроблення системи контролю параметрів середовища при розведенні креветок	80
<i>Холод А. М., Пасічний В. М.</i> Розроблення рецептури м'ясних хлібів з додаванням смакоароматичних композицій	86
<i>Чурсінов Ю. О., Кудрявцев І. М., Луценко М. В.</i> Розробка мобільної установки для сортування зернових відходів	93

### ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕМС ТА БЛИСКАВКОЗАХИСТ

<i>Коліушко Д. Г., Руденко С. С.</i> Комбінована методика зондування ґрунту в рамках контролю стану заземлювального пристрою	100
--	-----

## CONTENTS

### ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

<i>Vakulenko S.</i> Theoretical study of the efficiency of using a special cutter tool holder with an oriented position of center of rigidity	3
<i>Gogaev K., Podrezov Y., Voloshchenko S., Askerov M., Minakov N., Shurigin B.</i> Increase in wear resistance due to manganese alloying of ADI cast iron	10
<i>Petrakov Y., Sikailo M.</i> Simulation modeling of 2.5D milling dynamic by end mills	17
<i>Rudyk A., Rudyk V.</i> The regime choice with effective grinding by the way control inter-axis distance machine tools	25
<i>Slipchuk A., Jakym R., Kuk A.</i> Investigation of the improved "insert cutter – cone" connection by introducing an additional element for roller cone bits	33

### INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

<i>Strokan O., Nazarov Ye.</i> Smart house control system based on Internet of Things technology	42
<i>Xuan C., Verbytskyi I.</i> Remote control system of stepper motor based on the ESP32 developer board	48
<i>Tsybulnyk S., Bidnyk D., Pivtorak D.</i> Development of an automated bibliographic system	54
<i>Tsybulnyk S., Nakoryk V., Rupich S., Pivtorak D.</i> Development of an automated bibliographic system	61

### CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY

<i>Baranova A., Novozhilova T, Litovka A., Bilousov M.</i> The problem of plastic waste pollution in the World Ocean	69
<i>Vytiaganets V., Bairachnyi V., Pitak I., Baranova A.</i> Investigation of the intensification of separation processes using the heat of exhaust gases	74
<i>Hryhorenko I., Hryhorenko S.</i> Development of a system for monitoring the parameters of the environment during shrimp breeding	80
<i>Kholod A., Pasichnyi V.</i> Development of a recipe for meat loaves with the addition of flavoring compositions	86
<i>Tchursinov Y., Kudriavtsev I., Lutsenko M.</i> Creation of a mobile installation for sorting grain impurities	93

### ELECTROPHYSICAL TECHNOLOGIES, EMC AND LIGHTNING PROTECTION

<i>Koliushko D., Rudenko S.</i> Combined technique soil sounding in the framework of monitoring the condition of the grounding system	100
---	-----

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ".  
СЕРІЯ: НОВІ РІШЕННЯ В СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

Збірник наукових праць

**№ 2(12)' 2022**

Відповідальний редактор: Є. І. Сокол, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна  
Технічний редактор: С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Україна  
Відповідальний секретар: Р. С. Томашевський, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна  
С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск: д-р техн. наук, проф. Р. С. Томашевський

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ:** 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».  
Рада молодих вчених, тел. (057)707-69-37, e-mail: [vestnik.nsm@gmail.com](mailto:vestnik.nsm@gmail.com)

Підп. до друку «08» липня 2022 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. Друк цифровий.  
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 13,0. Облік.вид.арк. 7,0.  
Тираж 50 прим. Зам. № 204. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію  
суб'єкта видавничої справи ДК №5478 від 21.08.2017  
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

---