

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



# **ВІСНИК**

**Східноукраїнського  
національного університету  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 8 (264)  
2020**

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

Сєвєродонецьк 2020

# ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

**№ 8 (264) 2020**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ

ВИХІД З ДРУКУ - ДВНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК

Засновник

Східноукраїнський національний університет  
імені Володимира Даля

Журнал зареєстровано

в Міністерстві юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію

серія КВ № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

# VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST  
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

**№ 8 (264) 2020**

THE SCIENTIFIC JOURNAL

WAS FOUNDED IN 1996

IT IS ISSUED TWELVE TIMES A YEAR

Founder

Volodymyr Dahl East Ukrainian National  
University

Registered by the Ministry

of Justice of Ukraine

Registration Certificate

KB № 15607-4079ПР

dated 18.08.2009

Журнал включено до Переліків наукових фахових видань України (Наказ МОН № 886 02.07.2020 р.), (Наказ МОН №1188 24.09.2020 р.), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних (122, 131, 132, 133, 141, 151, 161, 273) та економічних (051, 073, 075) наук відповідно.

Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus International (ICV 2018: 59.34).

ISSN 1998-7927

## Головна редакційна колегія:

*Поркуян О.В.*, докт. техн. наук (голова редакційної колегії),

Галгаш Р.А., докт. екон. наук, (заступник голови  
редакційної колегії),

Кудрявцев С.О., канд. техн. наук, (заступник голови  
редакційної колегії),

Білобородова Т.О. канд. техн. наук,

Глікін М.А., докт. техн. наук,

Глікіна І.М., докт. техн. наук,

Горбунов М.І., докт. техн. наук,

Грицюк В.Ю., канд. техн. наук,

Д'яченко Ю.Ю., докт. екон. наук,

Ковтанець М.В., канд. техн. наук,

Кравченко К.О., канд. техн. наук,

Лорія М.Г., докт. техн. наук,

Ноженко В.С., канд. техн. наук,

Носко О.П., канд. техн. наук,

Проказа О.І., канд. техн. наук,

Семененко І.М., докт. екон. наук,

Сергієнко О.В., канд. техн. наук,

Скарга-Бандурова І.С., докт. техн. наук,

Соколов В.І., докт. техн. наук,

Суворін О.В., докт. техн. наук,

Целіщев О. Б., докт. техн. наук

**Відповідальний за випуск: д.т.н., доцент Лорія М.Г.**

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 6 від 22 грудня 2020 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2020

© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2020

## З М І С Т

<b>Лисак В.В., Деркач М.В., Скарга-Бандурова І.С.</b> ІНТЕГРАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ТРАНСПОРТНОЇ ЛОГІСТИКИ ДЛЯ СЕРВІСУ ПАРКУВАННЯ .....	5
<b>Хорошун Г.М., Рязанцев А.О., Рязанцев О.І.</b> МЕТОДОЛОГІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ЩОДО ОЦІНКИ ВІДПОВІДНОСТІ ОПТИЧНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ ТЕХНІЧНИМ ВИМОГАМ .....	10
<b>Щербаков Є. В., Щербакова М. Є.</b> ОСОБЛИВОСТІ МАСШТАБУВАННЯ ВЕБ-ДОДАТКІВ .....	15
<b>Москалик В. М., Карпюк Л. В., Табунціков В. Г., Созонтов В. Г.</b> ДЕЯКІ АЕРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВОГО КЛАПАНА .....	20
<b>Dovhopoly A.S., Tokalin O.A., Biloborodov O.A.</b> SENSITIVITY OF SUPERCONDUCTING QUANTUM INTERFEROMETERS TO ROTATIONAL MOTIONS .....	27
<b>Грицюк В.Ю., Тимофеева О.А.</b> ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ДЕЗИНТЕГРАТОР МНОГОФАКТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА .....	34
<b>Романченко Ю.А., Мелконова І.В., Сухарєвська А.М.</b> ЧИСЕЛЬНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПОЛІГРАДІЄНТНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ .....	39
<b>Співак О.М., Ткаченко В.П., Мелконова І.В.</b> ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ВІДКРИТИХ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ МАГНІТНИХ СИСТЕМ .....	46
<b>Тараненко С.В., Пріступа С.В., Колесник В.В., Пастух О.В., Голубєва С.М.</b> УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ГРЕБНИМИ ЕЛЕКТРОРУШІЯМИ ПРИ ПЛАВАННІ В УМОВАХ ХИТАВИЦІ .....	51
<b>Філімоненко Н.М., Філімоненко К.В.</b> МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....	56
<b>Шевченко І.С., Морозов Д.М., Белоха Г.С.</b> «ПРЯМЕ» ВЕКТОРНЕ УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННОЮ МАШИНОЮ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ .....	62
<b>Шевченко О.І., Мелконов Г.Л.</b> ПРИСТРІЙ РОЗМАГНІЧУВАННЯ УСТАНОВКИ МАГНІТНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІ ОСІ КОЛІСНОЇ ПАРИ .....	66
<b>Асманкіна А.А., Лорія М.Г., Целішев О.Б. Гезеві Абдалхалех Гома Ахмед</b> АВТОМАТИЗАЦІЯ ОБ'ЄДНАНИХ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ .....	73
<b>Чумаков Л.Д., Мисов О.П., Савченко М.О., Кравець В.І., Тігова О.В.</b> ОЦІНКА ПЕРІОДИЧНОСТІ КОНТРОЛЮ СПРАВНОСТІ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ З РЕЗЕРВУВАННЯМ ТА ПОКАНАЛЬНИМ КОНТРОЛЕМ СПРАВНОСТІ НА ОСНОВІ ЗАДАНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ .....	78

---



---

## C O N T E N T S

<b>Lysak V.V., Derkach M.V., Skarga-Bandurova I.S.</b> INTEGRATION OF TRANSPORT LOGISTICS ALGORITHMS FOR PARKING SERVICE .....	5
<b>Khoroshun G.M., Riazantsev A.O., Ryazantsev O.I.</b> THE METHODOLOGY OF DECISION MAKING FOR EVALUATION OF OPTICAL LABORATORY ACTIVITY .....	10
<b>Shcherbakov E.V., Shcherbakova M.E.</b> SCALING FEATURES OF WEB APPLICATIONS.....	15
<b>Moskalyk V. M., Karpyuk L. V., Tabunshchikov V. G., Sozontov V. G.</b> SOME AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A GAS VALVE .....	20
<b>Dovhopoly A.S., Tokalin O.A., Biloborodov O.A.</b> SENSITIVITY OF SUPERCONDUCTING QUANTUM INTERFEROMETERS TO ROTATIONAL MOTIONS .....	27
<b>Grytsiuk V.Yu., Tymofieieva O.O.</b> ELECTROMECHANICAL DISINTEGRATOR OF MULTIFACTOR ACTION: MODELING AND EVALUATION.....	34
<b>Romanchenko J.A., Melkonova I.V., Sukharievskaya A.M.</b> NUMERICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCHES BY DETERMINATION OF THE EFFICIENCY OF AN IMPROVED POLYGRADIENT ELECTROMAGNETIC SEPARATOR .....	39
<b>Spivak O.M., Tkachenko V.P., Melkonova I.V.</b> PECULIARITIES OF CALCULATION OF MAGNETIC FIELD PARAMETERS OF OPEN EASYSYMETRIC MAGNETIC SYSTEMS.....	46
<b>Taranenko S.V., Pristupa S.V., Kolesnik V.V., Pastukh O.V., Golubieva S.M.</b> IMPROVEMENT OF THE CONTROL SYSTEM BY ROWING ELECTRIC MOTORS DURING SWIMMING IN ROLLING CONDITIONS .....	51
<b>Filimonenko N. M., Filimonenko K. V.</b> POSSIBILITY OF APPLICATION OF ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT FOR REACTIVE POWER COMPENSATION AND INCREASING THE RELIABILITY OF ELECTRICITY SUPPLY.....	56
<b>Shevchenko I.S., Morozov D.I., Belokha H.S.</b> "DIRECT" VECTOR CONTROL OF DOUBLY-FED INDUCTION MACHINE .....	62
<b>Shevchenko O.I., Melkonov H.L.</b> DEVICE FOR DEMAGNETIZATION OF MAGNETIC DEFECTOSCOPY UNIT OF WHEEL PAIR.....	66
<b>Asmankina A., Loria M., Tselishchev O. Ghezwi Abdulkhalegn Goma Ahmed</b> AUTONOMOUS ENERGYINDEPENDENCE COMBINE SYSTEMS LABORATORY SETTING AUTOMATION.....	73
<b>Chumakov L.D., Mysov O.P., Savchenko M.O., Kravets V.I., Titova E.V.</b> EVALUATION OF THE PERIODICITY OF MONITORING THE MALFUNCTION OF A TECHNICAL SYSTEM WITH RESERVATION AND PAN-CHANNEL MONITORING OF MALFUNCTION ON THE BASIS OF A SET EFFICIENCY .....	78

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-264-8-5-9>

УДК: 004.4'272

## ІНТЕГРАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ТРАНСПОРТНОЇ ЛОГІСТИКИ ДЛЯ СЕРВІСУ ПАРКУВАННЯ

Лисак В.В., Деркач М.В., Скарга-Бандурова І.С.

### INTEGRATION OF TRANSPORT LOGISTICS ALGORITHMS FOR PARKING SERVICE

Lysak V.V., Derkach M.V., Skarga-Bandurova I.S.

*У статті розглянута проблема пошуку місця для паркування, оскільки з підвищенням рівня урбанізації це стає все більш складним завданням, особливо в великих містах. Для пошуку оптимального маршруту до вільного центру паркування на найкоротшій відстані від водія, виключаючи ділянки дороги, де здійснюється максимальний рух транспорту, пропонується алгоритм, на основі інтеграції алгоритмів Дейкстри та Форда-Фалкерсона. В роботі розглянуто алгоритми транспортної логістики, а саме алгоритм пошуку максимально можливої пропускної здатності мережі, зокрема алгоритм Форда-Фалкерсона, та алгоритми пошуку найкоротшої відстані, такі як алгоритм Дейкстри, алгоритм Флойда — Уоршелла та алгоритм Суурбалле. Проведено тестування алгоритмів, для цього попередньо визначено транспортну мережу існуючих центрів паркування міста Северодонецьк. Оскільки в ході тестування визначено, що час виконання алгоритму Дейкстри швидше для всіх пошукових відстаней, то саме цей алгоритм інтегрується з алгоритмом пошуку максимально можливої пропускної здатності мережі. Це дає оптимальне рішення щодо шляху до найближчого парковочного центру, мінуючи найбільш навантажені ділянки дороги транспортної мережі на прикладі міста Северодонецьк і розширює функціонал сервісу. Крім того, сервіс паркування використовується для моніторингу та інформування про стан доступності кожного окремого центру паркування, а також здійснює управління місцем паркування, як безпосередньо власником автотранспорту, так і власником центру. Сервіс призначений для отримання інформації про кількість вільних місць для паркування в режимі реального часу; про час, коли доступні місця для паркування, щоб користувачі могли зарезервувати місце на вибраній автопарковці. Розробка спрямована на підвищення якості наданих послуг у сфері автотранспорту.*

**Ключові слова:** сервіс паркування, алгоритми транспортної логістики, інтеграція, відстань, час.

**Вступ.** Задля вирішення проблеми заторів транспортного руху та підвищення продуктивності у сфері надання послуг приватного транспорту, необхідно реалізувати пошук оптимального маршруту до вільного центру паркування. Існує безліч сервісів,

які використовуються для багатьох транспортних завдань, включаючи навігацію, моніторинг безпеки дорожнього руху, інформацію про паркування, збір даних про трафік, інформацію про подорож в реальному часі, планування маршруту і транспортну логістику [1].

Незважаючи на велику різноманітність мобільних додатків і онлайн-сервісів, пов'язаних з транспортом, оптимальне рішення для паркувальних систем в нашій країні поки не реалізовано. З огляду на зростання міського населення і завантаженість доріг, а також підвищення якості послуг, розробка сервісу для центрів парковки є стратегічним питанням не тільки для дослідження, а й з економічної точки зору. Багато проблем з паркуванням і затори на дорогах можна вирішити, якщо водії будуть мати змогу заздалегідь володіти інформацією про центри паркування та наявність вільних місць на них, і що набагато зручніше отримати відомості про найближчий центр [2], шлях до якого виключає ділянки доріг з можливими пробками. Завдання пошуку безкоштовних місць для паркування є актуальним завданням, особливо для великих міст. І пошук вільних місць для паркування на найменшій відстані від поточного місцезнаходження клієнта є справді важливим. На території України такі послуги не є поширеними, що робить цей ринок відкритим для нових пропозицій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На практиці часто виникає проблема визначення максимального потоку транспортної мережі. Такого роду завдання вирішуються за допомогою алгоритмів, основа яких зводиться до пошуку максимально можливої пропускної здатності мережі, зокрема алгоритм Форда-Фалкерсона для галузі транспортних мереж. Це підтверджують роботи Noraini Abdullah, Ting Kien Hua, Biyuan Yao, Jianhua Yin, Hui Zhou, Wei Wu та інших вчених [3,4]. До транспортної задачі пошуку найкоротшої відстані належать такі алгоритми, як алгоритм Дейкстри, алгоритм Флойда

— Уоршелла та алгоритм Суурбалле. Протягом багатьох років науковці різних країн світу використовують перелічені алгоритми для рішення проблем транспортної логістики. Автори [5] порівнюють чотири найбільш популярні алгоритми оптимізації шляху / маршруту (алгоритм оптимізації колонії мурашок, алгоритм Дейкстри, алгоритм Беллмана-Форда та алгоритм Суурбалле) для оперативного переміщення обладнання та персоналу від бази до місця стихійного лиха для ефективного реагування на надзвичайні ситуації, особливо в контексті країн, що розвиваються. У роботі [6] алгоритм Дейкстри було перероблено для випадку, в якому більшість параметрів мережі є невизначеними і подані з точки зору нейтрософських чисел. Автори [7] запропонували нейтрософську версію алгоритму Беллмана-Форда з оцінкою трапецеїдального інтервалу, щоб абсолютно вирішити проблему найкоротшого шляху. У роботі [8] запропоновано гібрид алгоритмів Беллмана – Форда та Дейкстри, що покращує часовий інтервал роботи Беллмана – Форда для графів з розрідженим розподілом границь від'ємних витрат. Алгоритм повторює Дейкстру кілька разів без повторної ініціалізації орієнтовного значення у вершинах.

Але до сьогодні пошук оптимального шляху залишається досить складним завданням, це пов'язано з нераціональними дорожніми мережами, несправностями транспортних засобів та заторами на дорогах.

**Мета статті** – реалізувати алгоритм пошук оптимального маршруту до вільного центру паркування на найкоротшій відстані від водія, виключаючи ділянки дороги, де здійснюється максимальний рух транспорту, шляхом інтеграції алгоритмів Дейкстри та Форда-Фалкерсона.

**Основний зміст роботи.** Пошук найкоротшого шляху, максимального потоку, тобто оптимального маршруту, а також оцінка пройденого шляху або відстані, що залишилось подолати до контрольної точки, отримується завдяки алгоритмам транспортної логістики.

*Алгоритм Дейкстри.* Алгоритм на графах, що знаходить найкоротші шляхи від однієї з вершин графа до всіх інших. Алгоритм працює тільки для графів без ребер від'ємної ваги.

$$d(x) = \min\{d(x); d(y) + a_{y,x}\} \quad (1)$$

Кожній вершині  $X$  в ході алгоритму присвоюється число  $d(x)$ , яке дорівнює довжині найкоротшого шляху з вершини  $S$  в вершину  $X$  і включає тільки пофарбовані вершини. Спочатку передбачається  $d(s) = 0$  і  $d(x) = \infty$  для всіх інших вершин графа. Далі фарбуємо вершину  $S$  і вважаємо  $y = S$ , де  $y$  - остання пофарбована вершина. Для кожної нефарбованої вершини  $X$  перераховується величина  $d(x)$  за формулою (1). Якщо  $d(x) = \infty$  для всіх нефарбованих вершин, то алгоритм закінчується, тому що відсутні шляхи з вершини  $S$  в нефарбовані вершини. Інакше зафарбовується та вершина, для якої величина  $d(x)$  є

мінімальною. Зафарбовується і дуга, що веде в цю вершину і вважається  $y = x$ . Якщо  $y = t$ , найкоротший шлях з  $S$  в  $t$  знайдений. На кожному кроці обробляється найближча, ще необроблена вершина. При її обробці всі ще невідвідані сусіди додаються в чергу для відвідування.

*Алгоритм Флойда – Уоршелла.* Динамічний алгоритм для знаходження найкоротших відстаней між усіма вершинами зваженого орієнтованого графа.

$$d_{ij}^k = \min(d_{ij}^{k-1}, d_{ik}^{k-1} + d_{kj}^{k-1}) \quad (2)$$

Перед  $k$ -ою фазою ( $k=1..n$ ) вважається, що в матриці відстаней збережені довжини таких найкоротших шляхів, які містять в якості внутрішніх вершин тільки вершини з безлічі  $\{1, 2, \dots, k-1\}$ . На вхід програмі подається граф, заданий у вигляді матриці суміжності - двовимірною масиву розміру  $n \times n$ , в якому кожен елемент задає довжину ребра між відповідними вершинами. Передбачається, що якщо між двома якими-небудь вершинами немає ребра, то в матриці суміжності буде записано яке-небудь велике число; тоді це ребро завжди буде невідвідно брати, і алгоритм спрацює правильно.

*Алгоритм Суурбалле.* Алгоритм знаходження двох непересічних шляхів в орієнтованому графі з невід'ємними вагами, так що обидва шляхи пов'язують ту ж саму пару вершин і мають мінімальну загальну довжину. Основна ідея алгоритму Суурбалле - використання алгоритму Дейкстри для пошуку шляху, модифікація ваг ребер графа і потім прогін алгоритму Дейкстри вдруге. Вихід алгоритму формується шляхом комбінування двох шляхів, відкидання ребер, які проходяться в протилежних напрямках цими шляхами, і використання решти ребер для формування шляхів, які і служать виходом алгоритму.

Для тестування визначено транспортну мережу існуючих центрів паркування міста Северодонецьк за допомогою орієнтованого зв'язного графу без петель і паралельних ребер. Мережа, зображена на рис. 1, складається з 8 вузлів і 13 дуг.

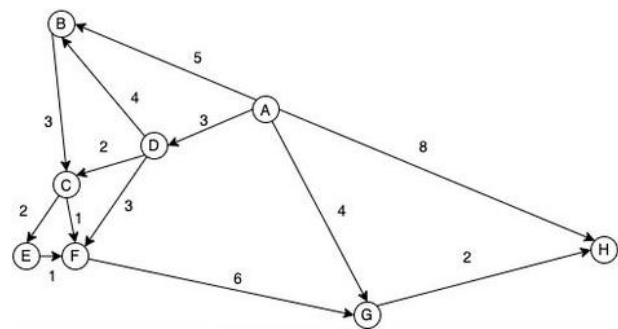


Рис. 1. Граф транспортної мережі

В ході тестування перелічені алгоритми порівняні за такими параметрами, як кількість операцій (рис. 2а) та час виконання алгоритму (рис. 2б).



Рис. 2. Отриманні результати порівняння алгоритмів

Алгоритм Флойда - Уоршелла (на рис. 2 - червоні стовпці) є ефективним для розрахунку всіх найкоротших шляхів в щільних графах, коли має місце велика кількість пар ребер між парами вершин. У разі розріджених графів з ребрами невід'ємної ваги кращим вибором вважається використання алгоритму Дейкстри (на рис. 2 - сині стовпці) для кожного можливого вузла. Такий же висновок отримуємо завдяки діаграмам на рис. 2. Незважаючи на те, що пошук найкоротшої відстані для різних тестових наборів згідно алгоритму Флойда - Уоршелла виконується за меншу кількість операцій, час виконання алгоритму Дейкстри швидше для всіх пошукових відстаней.

Тому саме алгоритм Дейкстри використовується для пошуку шляху від місцеперебування автовласника до найближчого парковочного центру. Для розглянутого графу отримано шлях крізь дуги (vA, vD), (vD, vC), (vC, vF).

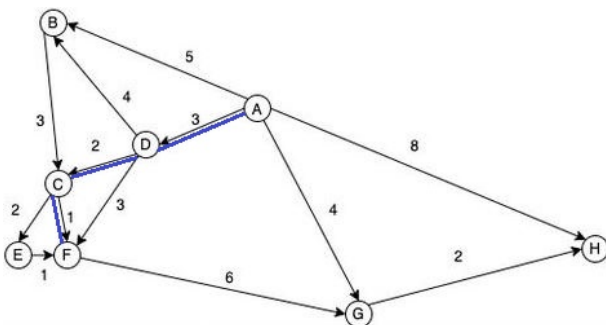


Рис. 3. Найкоротший шлях

*Алгоритм Форда-Фалкерсона.* Робота алгоритму полягає в знаходженні такої множині потоків по дугах, щоб величина  $Q(v_s)$  була максимальною:

$$Q(v_s) \rightarrow \max \quad (3)$$

що відповідає мінімальному розрізу графа  $S \rightarrow \min$ , де  $Q(v_s)$  - пропускна здатність транспортної мережі.

Перевіримо роботу алгоритму для тієї ж транспортної мережі існуючих центрів паркування міста Северодонецьк. В результаті, отримано максимальний потік, величина якого  $Q(v_s) = 10$ , дуги (vA, vG), (vG, vH), (vA, vH) утворюють мінімальний розріз, тим самим визначено найбільш навантажені ділянки дороги.

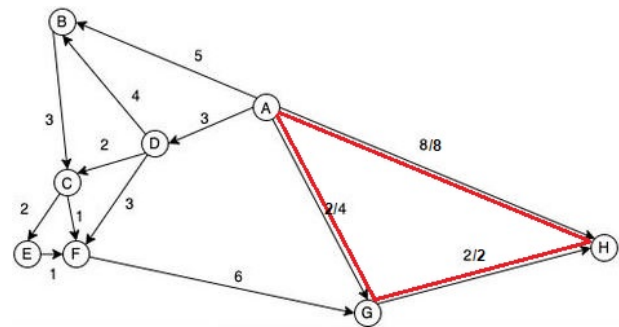


Рис. 4. Мінімальний розріз графу

Інтеграція двох вищезгаданих алгоритмів транспортної логістики з математичної точки зору виглядає наступним чином. Для транспортної системи міста застосовано графову модель:  $G=(V,E)$ , з множиною вузлів  $v \in V$ , з множиною дуг  $e \in E$ , де  $v$  - кількість вузлів,  $e$  - кількість дуг,  $|\cdot|$  - знак потужності множини. Результат роботи алгоритму Дейкстри виражається наступною множиною вузлів:  $vD=\{A, D, C, F\}$ , а результат роботи алгоритму Форда-Фалкерсона:  $vFF=\{A, G, H\}$ . Початковий вузол позначимо  $v_0$ , для розглянутого графу  $v_0=\{A\}$ . Тоді для того, щоб отримати оптимальне рішення щодо транспортного шляху, використовуємо вираз:  $(vD \cap vFF) \setminus v_0 = \emptyset$ . Отримуємо порожню множину, що свідчить про вільний від пробок шлях до найближчого центру паркування. В іншому випадку, якщо множина непорожня, отримуємо набір вузлів, через які проходять навантажені транспортним потоком ділянки доріг.

**Висновок.** Після інтеграції алгоритмів Дейкстри та Форда-Фалкерсона, отримано оптимальне рішення щодо шляху до найближчого парковочного центру, мінуючи найбільш навантажені ділянки дороги транспортної мережі на прикладі міста Северодонецьк. Це розширило функціонал сервісу, який надає інформацію про кількість вільних місць для паркування в режимі реального часу; про час, коли доступні місця для паркування, щоб користувачі могли зарезервувати місце на вибраній автопарковці.

**Л і т е р а т у р а**

1. Kondratenko Y. Synthesis of Intelligent Decision Support Systems for Transport Logistic / Y. Kondratenko, S. Encheva, E. Sidenko // Proceeding of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS'2011. - Vol. 2 (Sept. 15-17, 2011,

- Prague, Czech Republic). - pp.642-646.
2. Derkach M. Parking Guide Service for Large Urban Areas / M. Derkach, V. Lysak, I. Skarga-Bandurova, I. Kotsiuba // 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). - Metz, France, 2019. - pp. 567 – 571.
  3. Abdullah N. Using Ford-Fulkerson Algorithm and Max Flow-Min Cut Theorem to Minimize Traffic Congestion in Kota Kinabalu, Sabah / N. Abdullah, T. K. Hua // Journal of Information System and Technology Management (JISTM), 2017. - № 2(4). - P. 18-34.
  4. Yao B. Path Optimization Algorithms Based on Graph Theory / B. Yao, J. Yin, H. Zhou, W. Wu // International Journal of Grid and Distributed Computing, 2016. - Vol. 9, No. 6. - P. 137-148.
  5. Okonji C. A Comparative Analysis of Four Path Optimization Algorithms / C. Okonji, O.J. Omotosho, A.C. Ogbonna // International Journal of Communications and Networks, 2020, 3:8. DOI: 10.28933/ijcn-2020-03-1505
  6. Broumi S. Applying Dijkstra algorithm for solving neutrosophic shortest path problem / S. Broumi, A. Bakal, M. Talea, F. Smarandache, L. Vladareanu // International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), 2016, Melbourne, VIC, Australia. - pp. 412-416.
  7. Broumi S. Bellman-Ford Algorithm Under Trapezoidal Interval Valued Neutrosophic Environment / S. Broumi, D. Nagarajan, M. Lathamaheswari, M. Talea, A. Bakali, F. Smarandache // International Conference on Computing, 2019. - pp. 174-184.
  8. Dinitz Y. Hybrid Bellman-Ford-Dijkstra algorithm / Y. Dinitz, R. Itzhak // Journal of Discrete Algorithms, 2017. - pp. 35-44.

#### References

1. Kondratenko Y. Synthesis of Intelligent Decision Support Systems for Transport Logistic / Y. Kondratenko, S. Encheva, E. Sidenko // Proceeding of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS'2011. - Vol. 2 (Sept. 15-17, 2011, Prague, Czech Republic). - pp.642-646.
2. Derkach M. Parking Guide Service for Large Urban Areas / M. Derkach, V. Lysak, I. Skarga-Bandurova, I. Kotsiuba // 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). - Metz, France, 2019. - pp. 567 – 571.
3. Abdullah N. Using Ford-Fulkerson Algorithm and Max Flow-Min Cut Theorem to Minimize Traffic Congestion in Kota Kinabalu, Sabah / N. Abdullah, T. K. Hua // Journal of Information System and Technology Management (JISTM), 2017. - № 2(4). - P. 18-34.
4. Yao B. Path Optimization Algorithms Based on Graph Theory / B. Yao, J. Yin, H. Zhou, W. Wu // International Journal of Grid and Distributed Computing, 2016. - Vol. 9, No. 6. - P. 137-148.
5. Okonji C. A Comparative Analysis of Four Path Optimization Algorithms / C. Okonji, O.J. Omotosho, A.C. Ogbonna // International Journal of Communications and Networks, 2020, 3:8. DOI: 10.28933/ijcn-2020-03-1505
6. Broumi S. Applying Dijkstra algorithm for solving neutrosophic shortest path problem / S. Broumi, A. Bakal, M. Talea, F. Smarandache, L. Vladareanu // International

- Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), 2016, Melbourne, VIC, Australia. - pp. 412-416.
7. Broumi S. Bellman-Ford Algorithm Under Trapezoidal Interval Valued Neutrosophic Environment / S. Broumi, D. Nagarajan, M. Lathamaheswari, M. Talea, A. Bakali, F. Smarandache // International Conference on Computing, 2019. - pp. 174-184.
  8. Dinitz Y. Hybrid Bellman-Ford-Dijkstra algorithm / Y. Dinitz, R. Itzhak // Journal of Discrete Algorithms, 2017. - pp. 35-44.

#### Лысак В.В., Деркач М.В., Скарга-Бандурова И.С. Интеграция алгоритмов транспортной логистики для сервиса парковки

*В статье рассмотрена проблема поиска места для парковки, поскольку с повышением уровня урбанизации это становится все более сложной задачей, особенно в крупных городах. Для поиска оптимального маршрута к свободному центру парковки на кратчайшем расстоянии от водителя, исключая участки дороги, где осуществляется максимальное движение транспорта, предлагается алгоритм, на основе интеграции алгоритмов Дейкстры и Форда-Фалкерсона. В работе рассмотрены алгоритмы транспортной логистики, а именно алгоритм поиска максимально возможной пропускной способности сети, в частности алгоритм Форда-Фалкерсона, и алгоритмы поиска кратчайшего расстояния, такие как алгоритм Дейкстры, алгоритм Флойда - Уоршелла и алгоритм Суурбалле. Проведено тестирование алгоритмов, для этого предварительно определена транспортная сеть существующих центров парковки города Северодонецк. Поскольку в ходе тестирования установлено, что время выполнения алгоритма Дейкстры быстрее для всех поисковых расстояний, то именно этот алгоритм интегрируется с алгоритмом поиска максимально возможной пропускной способности сети. Это дает оптимальное решение относительно пути до ближайшего парковочного центра, минуя наиболее наруженные участки дороги транспортной сети на примере города Северодонецк, что расширяет функционал сервиса. Кроме того, сервис парковки используется для мониторинга и информирования о состоянии доступности каждого отдельного центра парковки, а также осуществляет управление местом парковки, как непосредственно владельцем автотранспорта, так и владельцем центра. Сервис предназначен для получения информации о количестве свободных мест для парковки в режиме реального времени; о времени, когда доступны места для парковки, чтобы пользователи могли зарезервировать место на выбранной автостоянке. Разработка направлена на повышение качества предоставляемых услуг в сфере автотранспорта.*

**Ключевые слова:** сервис парковки, алгоритмы транспортной логистики, интеграция, расстояние, время.

#### Lysak V., Derkach M. Skarga-Bandurova I. Integration of transport logistics algorithms for parking service

*The article considered the problem of choosing the optimal route when looking for a parking place. As the level of urbanization increases, the congestion of roads and their irrational use increase, the number of congestions on the roads, especially in large cities, and this becomes an increasingly difficult task. To find the optimal route to a free parking center at the shortest distance from the driver, excluding road sections where the maximum traffic is carried out, an algorithm is*

*proposed based on the integration of the Dijkstra and Ford-Fulkerson algorithms. To do this, the work considered transport logistics algorithms, namely, the algorithm for finding the maximum possible network bandwidth, in particular the Ford-Fulkerson algorithm, and algorithms for finding the shortest distance, such as Dijkstra's algorithm, Floyd-Warshall's algorithm and Suurballe's algorithm. The algorithms were tested, for this the transport network of the existing parking centers in Severodonetsk was preliminarily determined. Since it was found during testing that the execution time of Dijkstra's algorithm is faster for all search distances, it is this algorithm that is integrated with the algorithm for finding the maximum possible network bandwidth. This gives an optimal solution regarding the way to the nearest parking center, bypassing the most loaded sections of the road of the transport network on the example of the city of Severodonetsk, which expands the functionality of the service. In addition, the parking service is used to monitor and inform about the state of accessibility of each individual parking center, and also manages the parking space, both directly by the owner of the vehicle and by the owner of the center. The service is designed to receive information on the number of free parking spaces in real time; about the time when parking spaces are available*

*so that users can reserve a space in the selected car park. The development is aimed at improving the quality of services provided in the field of motor transport, which is a strategic issue not only for research, but also from an economic point of view.*

**Keywords:** *parking service, transport logistics algorithms, integration, distance, time.*

**Лисак В.В.** – здобувач вищої освіти Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: [logan83955@gmail.com](mailto:logan83955@gmail.com)

**Деркач М.В.** – доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: [gl459@gmail.com](mailto:gl459@gmail.com)

**Скарга-Бандурова І.С.** – д.т.н., профю, зав. кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: [skarga-bandurova@snu.edu.ua](mailto:skarga-bandurova@snu.edu.ua)

Стаття подана 08.11.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-264-8-10-14>

УДК 004.942:535.8

## МЕТОДОЛОГІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ЩОДО ОЦІНКИ ВІДПОВІДНОСТІ ОПТИЧНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ ТЕХНІЧНИМ ВИМОГАМ.

Хорошун Г.М., Рязанцев А.О., Рязанцев О.І.

### THE METHODOLOGY OF DECISION MAKING FOR EVALUATION OF OPTICAL LABORATORY ACTIVITY.

Khoroshun G.M., Riazantsev A.O., Ryazantsev O.I.

*В роботі розроблена методологія прийняття рішення щодо оцінки відповідності оптичної лабораторії технічним вимогам за допомогою FMEA – аналізу. Проведена адаптація методу FMEA до аналізу якості проведення вимірювань в оптичних лабораторіях. Визначені критерії оцінки якості вимірювань, зібрані та оброблені статистичні дані з п'яти різних науково-дослідних лабораторій. Розроблена блок-схема оцінки відповідності оптичної лабораторії технічним вимогам з методами підтримки прийняття рішень на трьох етапах. На першому етапі відбувається відбір лабораторій, які підтвердили здатність забезпечувати результативність, ефективність та надійність вимірювань. На другому етапі визначається відповідність технічних характеристик встановленим критеріям згідно класифікації лабораторій за вимогами для кожного значення параметру пріоритетного числа ризику  $ПЧР_i \leq ПЧР_{зр}$ . Наведені рекомендації з бази знань щодо дій по покращенню рівня вимірювань. Запропоновано шкалу оцінки якості проведення вимірювань в лабораторії. На третьому етапі наведено метод підтримки прийняття рішення для керівництва лабораторії.*

**Ключові слова:** методологія прийняття рішення, оптична лабораторія, пріоритетне число ризику, оцінка відповідності вимогам, FMEA аналіз

**Постановка та аналіз проблеми.** Європейська інтеграція України є значною подією для майбутнього нашої країни та викликом щодо перебудови у сферах освіти, науки, виробництва та інших. Задля просування української продукції на міжнародний ринок необхідно забезпечити визнання результатів її вимірювань і випробувань. Наразі, затверджені переліки національних стандартів, що ідентичні гармонізованим європейським стандартам та розроблюються нові нормативні документи з урахуванням європейських вимог. Порядок перевірки точності результатів вимірювань у вимірювальних лабораторіях встановлено завдяки відповідній інструкції [1] комітету України з питань

стандартизації, метрології та сертифікації. Одним з рекомендованих способів оцінки технічної компетентності та достовірності результатів випробувальної лабораторії є її участь у раундах міжлабораторних порівняльних випробувань [2].

Вимірювальною оптичною лабораторією може бути організація чи окремий підрозділ організації, підприємства, що здійснює вимірювання фізичних величин, визначення хімічного складу, фізико-хімічних, фізико-механічних та інших властивостей і показників речовин, матеріалів і продукції за допомогою оптичних методів і оптичних приладів. Технічну компетентність випробувальної лабораторії характеризують: організація та управління лабораторією; персонал лабораторії; приміщення та навколишнє середовище; випробувальне обладнання та засоби вимірювання; методи випробувань та процедури; система забезпечення якості; організація роботи з виробами та продукцією, що випробовується.

Існує багато методів внутрішнього аудиту лабораторій [4-6]. Забезпечити процедуру оцінки якості вимірювань в оптичній лабораторії, кінцевим продуктом якої є інформація отримана з зображення, пропонується завдяки застосуванню методу FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Можливість застосування та адаптації методики FMEA обумовлюється тим, що спосіб представлення результатів комплексного аналізу відповідає цілям і способу представлення результатів якісного аналізу ризиків проведення вимірювань. Методологія підтримки прийняття рішення щодо оцінки відповідності оптичної лабораторії технічним вимогам за допомогою FMEA-аналізу дозволяє враховувати можливі види невідповідностей, визначати їх величину для різних оптичних лабораторій, оцінювати пріоритетне число ризику, яке є ключовим в системі підтримки прийняття рішення, а також надавати рекомендації стосовно подальших дій для керівника лабораторій та для інвестора стосовно обсягу фінан-

сування для виведення лабораторії на задовільний, добрий або відмінний рівень.

**Підготовка даних для FMEA аналізу.** FMEA метод являє собою систематизований комплекс дій аналіз видів та наслідків відмов, що був розроблений в 50-х роках ХХ століття і спочатку застосовувався для авіаційної і космічної техніки. Зараз застосування FMEA є обов'язковим вимогою стандарту ISO автомобільної, аерокосмічної та авіаційної промисловості [7].




FMEA аналіз проводиться для того, щоб:

- виявити невідповідності продукції та процесів, а також наслідки виникнення цих невідповідностей, і дати їм кількісну оцінку;

- створити ранжируваний список видів і причин невідповідностей для планування коригувальних і запобіжних дій;

- визначити коригувальні та запобіжні дії, які могли б усунути або знизити ймовірність виникнення невідповідностей;

- документувати дані за результатами аналізу для накопичення в базі знань.

	A	B	C	D	E
1	No image	Image	MAX	MIN	ZERO
2					
3					
4					

а

A	B	C	D	E	F
№	Дії оператора / недолік	Привести до співвідносності	Зафіксувати потужніше кріплення	Використати додаткові елементи	Замінити рівноцінними елементами
1	Тремтіння зображення	0	1	0	0
2	Шум	0	0	0	0
3	Контраст	0	0	1	0
4	Артефакти	0	0	0	1
5	Аберації	1	0	1	1
6	Роз'юстування	1	1	0	0

б

Рис. 1. Фрагменти бази даних теоретичних зображень (а) та бази знань (б) в програмі Excel

Для застосування методу аналізу видів і наслідків потенційних невідповідностей за допомогою FMEA необхідно задовольняти наступним вимогам: командна робота, ієрархічність, ітеративність, реєстрація даних. Командна робота забезпечується силами спеціально підібраної багатофункціональної команди експертів з п'яти науково-дослідних лабораторій, які приймали участь, як в проведенні вимірювань, так і в обговоренні результатів. Вимога іє-

рархічності задовольнялась завдяки аналізу процесу вимірювань в цілому (визначення схеми та методу реєстрації) та його складових (операцій кріплення та юстування). Ітеративність методу забезпечена багаторазовим аналізом роботи вимірювання завдяки чому розроблена база даних та база знань [8], які містять статистичні дані про операції та характеристики зображень, а також рекомендації стосовно дій у разі виникнення невідповідностей. База даних та база знань постійно доповнюються новою інформацією. Аналіз видів і наслідків потенційних невідповідностей і його результати оформлені документально у вигляді таблиць в базі даних (Рис. 1а) та рекомендацій у базі знань (Рис. 1б).

**Проведення FMEA аналізу.** FMEA аналіз дозволяє визначити пріоритетне число ризику (ПЧР), що є узагальненою кількісною характеристикою ризику невідповідності лабораторії загальним виразом. ПЧР розраховується множенням рангів значимості S (severity), виникнення O (occurrence) і виявлення D (detection) невідповідностей, які визначаються як на основі статистичних даних, так і думок експертів за допомогою відповідних типових шкал. Приклад такої шкали наведений у таблиці 1.

Таблиця 1

Типова шкала балів виникнення невідповідності O

Імовірність невідповідності	Можлива частота невідповідності	Бал O
Дуже висока: постійні невідповідності	> 100 на 1000	10
	50 на 1000	9
Висока: часті невідповідності	20 на 1000	8
	10 на 1000	7
Помірна: випадкові невідповідності	5 на 1000	6
	2 на 1000	5
Низька: відносно мало невідповідностей	1 на 1000	4
	0,5 на 1000	3
Мала: невідповідність малоімовірна	0,1 на 1000	2
	< 0,01 на 1000	1

Перелік дій необхідних для проведення FMEA аналізу адаптованого для оцінювання якості вимірювань в оптичній лабораторії наведено на блок-схемі (Рис. 2). По-перше, необхідно вибрати лабораторії для аналізу даних за принципами можливості проведення однакових вимірювань та узгодити з керівництвом подальше використання отриманих результатів. Вимірювання мають відповідати таким стандартам якості, як результативність (досягнуто бажаний результат), ефективність (відповідність часовому критерію, наявність ресурсів) та надійність (висока вірогідність повторювання експерименту).

Кількісні оцінки значущості невідповідності S, що впливає на якість вимірювань визначимо з результатів попередніх робіт по аналізу зображень за допомогою статистичного методу [9], методів Ісікави та Парето [10]. Виберемо лише ті невідповідності, що суттєво впливають на реєстрацію зображення

і отримання його кількісних характеристик та присвоєно їм максимальну значущість  $S=10$ , а саме: тремтіння зображення, шум, контраст, артефакти, аберації, роз'юстування. Вірогідність детектування  $D$  або виявлення невідповідності також виберемо максимальну  $D=10$ , враховуючи попередню перевірку кожного елемента і наявність інформації щодо його недоліків. Якщо недолік не детектується, то він не заважає реєстрації та не є значущим для дослідження. Встановлення частоти виникнення ризику  $O_i$  визначається окремо за кожним параметром за статистичними даними при проведенні серії вимірювань з урахуванням змін робочого середовища та згідно з частотою детектування за таблицею 1. Розрахунок пріоритетного числа ризику  $ПЧР_i$  відбувається за формулою:

$$ПЧР_i = O_i \cdot S \cdot D = 100 \cdot O_i \quad (1)$$

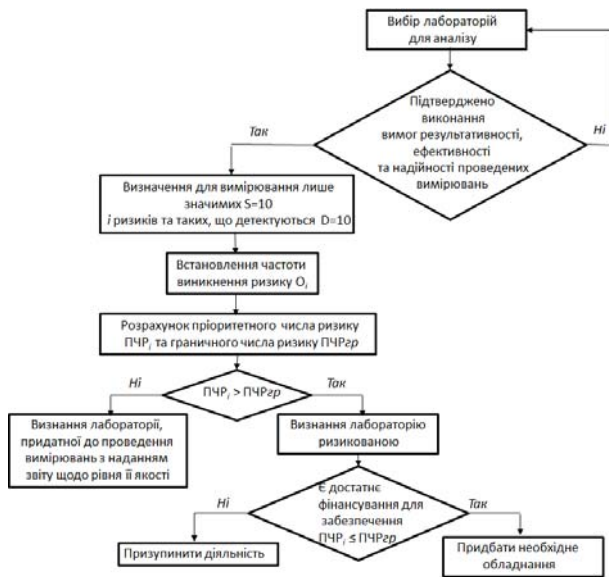


Рис. 2. Блок-схема оцінки відповідності оптичної лабораторії технічним вимогам та прийняття рішення щодо подальших дій керівника лабораторії та інвестора

Встановити значення граничного числа ризику  $ПЧР_{гр}$  можна різними методами, але ми скористаємося інформацією з таблиці 1 та встановимо величину  $ПЧР_{гр} = 100 \cdot 6 = 600$ , яка забезпечує помірну появу випадкових невідповідностей. Така величина  $ПЧР_{гр}$  є однаковою для всіх значимих параметрів зображення.

**Прийняття рішення щодо оцінки відповідності оптичної лабораторії технічним вимогам. Звітність та рекомендації.** На оптичних зображеннях визначені невідповідності для параметрів: тремтіння зображення, шум, контраст, артефакти, аберації, роз'юстування (Таблиця 2) шляхом розрахунку  $ПЧР_i$  за формулою (1). Визначене середнє значення  $ПЧР$  в колонці Н, що характеризує ступінь ризику в колонці І та якість вимірювань  $J$  в цілому в лабораторії. Якість вимірювання пропонується оцінювати за наступною шкалою: висока якість відповідатиме значенню середнього  $ПЧР - 1,2$ ; добра –  $3,4$ ; задовільна –  $5,6$ ; - незадовільна –  $7,8$ . Лабораторії з показниками  $ПЧР$  9 та 10 не фігурують у аналізі, як такі, що не довели свою результативність, ефективність та надійність на попередньому етапі. У разі якщо фактичне значення  $ПЧР_i$  перевищує граничне значення  $ПЧР_{гр}$ , то необхідно удосконалювати схему, її компоненти та кріплення і звернутися до бази знань в краткому форматі (Рис. 16) та в розгорненому вигляді, який наведено в роботі [10].

Рекомендації щодо подальшого використання наведених оптичних лабораторій такі.

Лабораторії під номером 1,3,4 мають все необхідне обладнання для виконання стандартних дифракційних та інтерференційних експериментів. Їх результати відповідають стандартам та вимогам замовника з високою вірогідністю.

Лабораторія під номером 2 може продовжувати метрологічну діяльність з дифракції та простішим різновидом завдань з інтерферометрії. Для підвищення якості отриманих результатів рекомендується покращити системи кріплення оптичних елементів.

Лабораторія під номером 5 має недостатньо якісне обладнання для проведення як дифракційних, так і інтерференційних досліджень. Її метрологічна діяльність має бути призупинена до моменту встановлення кріплень та елементів відповідної якості.

Таблиця 2

Аналіз величини невідповідностей на оптичних зображеннях та визначення ступеня ризику вимірювань в лабораторії

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
ПЧР <sub>i</sub> *100 / № лабораторії	Тремтіння зображення	Шум	Контраст	Артефакти	Аберації	Роз'юстування	Середнє	Ризик	Якість вимірювань
1	3	2	3	3	3	3	3	Малий	Добра
2	6	3	3	5	4	6	5	Помірний	Задовільна
3	3	3	2	1	1	3	2	Малий	Висока
4	2	3	2	1	1	3	2	Малий	Висока
5	9	6	5	8	5	6	7	Високий	Низька

Наявність інвестора дозволить кардинально вирішити існуючі проблеми для 2-ої та 5-ої лабораторій: знизити ризики та підняти рівень лабораторії до бажаного стандарту.

**Висновки.** В роботі розроблена методологія прийняття рішення щодо оцінки відповідності оптичної лабораторії технічним вимогам за допомогою FMEA – аналізу. Проведена адаптація методу FMEA до аналізу якості проведення вимірювань в оптичних лабораторіях. Визначені критерії оцінки якості вимірювань, зібрані та оброблені статистичні дані з п'яти різних науково-дослідних лабораторій. Розроблена блок-схема оцінки відповідності оптичної лабораторії технічним вимогам з методами підтримки прийняття рішень на трьох етапах. На першому етапі відбувається відбір лабораторій, які підтвердили здатність забезпечувати результативність, ефективність та надійність вимірювань. Для оптичних зображень визначені значимі параметри, що детектуються завжди. Для них оброблені статистичні дані та встановлені бали появи невідповідностей. Визначено пріоритетне число ризику для кожного параметру та середнє ПЧР. Обрано граничне значення ПЧР<sub>гр</sub>. На другому етапі визначається відповідність технічних характеристик встановленим критеріям згідно класифікації лабораторій за вимогами для кожного значення параметру пріоритетного числа ризику ПЧР<sub>і</sub> ≤ ПЧР<sub>гр</sub>. Наведені рекомендації з бази знань щодо дій по покращенню рівня вимірювань. Запропоновано шкалу оцінки якості проведення вимірювань в лабораторії. На третьому етапі наведені рекомендації для прийняття рішення керівництвом лабораторій. Надається звіт за яким визначається тип дифракційних та інтерференційних експериментів, що може проводитись в лабораторії. Вказана вірогідність відповідності результатів вимірювань стандартам та вимогам замовника.

### Література

1. «Інструкція про порядок перевірки точності результатів вимірювань у вимірювальних лабораторіях» [Про затвердження Інструкції про п... | від 12.08.1999 № 99 \(rada.gov.ua\)](#)
2. [Міжлабораторні раунди \(vetlabresearch.gov.ua\)](#)
3. [Внутренний аудит системы менеджмента и контроль качества результатов испытаний](#)
4. Новиков В.Н., Никитюк А.А. Постоянное совершенствование и обратная связь с заказчиком в рамках требований ИСО/МЭК 17025:2005 // Методы оценки соответствия. — 2007. — № 9. — С. 38—40.
5. Основы аудиту в лабораториях, ВМ Новіков, ОА Никитюк - К.: Нора-прінт, 2004
6. Никитюк, О. А., and В. В. Новіков. "Шляхи прискорення процесів підготовки та акредитації лабораторій." Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості 2 (9) (2016): 12-14.
7. [FMEA-методология для качественной оценки рисков инвестпроектов \(cfin.ru\)](#)
8. Скурідіна Т.Г., Лунякін Р.О., Рязанцев А.О., Хорошун Г.М., Рязанцев О.І., База даних характеристик дифрак-

ційного поля // Збірник науково-практичних праць V молодіжного форуму «IT-ІДЕЯ 2019», Северодонецьк, 7 грудня, 2019, 104-105

9. Ryazantsev O., Khoroshun G., Riazantsev A., Ivanov V., Baturin A. Statistical Optical Image Analysis for Information System // Proceedings of 2019 7th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW), Istanbul, Turkey, IEEE 2019, pp. 130-134
10. Хорошун Г. М., Методи підтримки прийняття рішень при проведенні оптичних досліджень, Сучасні Інформаційні Системи. В друці Т.4, № 4, (2020)

### References

1. "Instructions on the procedure for checking the accuracy of measurement results in measuring laboratories". [Про затвердження Інструкції про п... | від 12.08.1999 № 99 \(rada.gov.ua\)](#)
2. Interlaboratory rounds (vetlabresearch.gov.ua)
3. Internal audit of the management system and quality control of test results (<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18293355>)
4. Новиков В.Н., Никитюк А.А. Постоянное совершенствование и обратная связь с заказчиком в рамках требований ИСО/МЭК 17025:2005 // Методы оценки соответствия. — 2007. — № 9. — С. 38—40.
5. Fundamentals of audit in laboratories, VM Novikov, OA Nikityuk - K.: Nora-print, 2004
6. Nikityuk, OA, and VV Novikov. "Ways to accelerate the process of preparation and accreditation of laboratories." Collection of scientific works of the Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality 2 (9) (2016): 12-14.
7. FMEA-methodology for qualitative risk assessment of investment projects (<https://www.cfin.ru/finanalysis/invrisk/FMEA-methodology.shtml>)
8. Skuridina TG, Lunyakin RO, Ryazantsev AO, Khoroshun GM, Ryazantsev OI, Database of diffraction field characteristics // Collection of scientific and practical works of the V youth forum "IT- IDEA 2019 ", Severodonetsk, December 7, 2019, 104-105
9. Ryazantsev O., Khoroshun G., Riazantsev A., Ivanov V., Baturin A. Statistical Optical Image Analysis for Information System // Proceedings of 2019 7th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW), Istanbul, Turkey, IEEE 2019, pp. 130-134
10. Khoroshun GM, Methods of decision support in conducting optical research, Modern Information Systems. In print Vol.4, № 4, (2020)

**Хорошун А.Н., Рязанцев А.А., Рязанцев А.И. Методология принятия решения по оценке соответствия оптической лаборатории техническим требованиям.**

*В работе разработана методология принятия решения по оценке соответствия оптической лаборатории техническим требованиям с помощью FMEA - анализа. Проведена адаптация метода FMEA к анализу качества проведения измерений в оптических лабораториях. Определены критерии оценки качества измерений, собранные и обработанные статистические данные из пяти различных научно-исследовательских лабораторий. Разработана блок-схема оценки соответствия оптической лаборатории техническим требованиям с методами поддержки принятия решений на трех этапах. На первом этапе про-*

исходит отбор лабораторий, подтвердили способность обеспечивать результативность, эффективность и надежность измерений. На втором этапе определяется соответствие технических характеристик установленным критериям согласно классификации лабораторий по требованиям для каждого значения параметра приоритетного числа риска  $ПЧР_i \leq ПЧР_{гр}$ . Приведенные рекомендации базы знаний по действиям по улучшению уровня измерений. Предложено шкалу оценки качества проведения измерений в лаборатории. На третьем этапе приведен метод поддержки принятия решения для руководства лабораторией.

**Ключевые слова:** методология принятия решения, оптическая лаборатория, приоритетное число риска, оценка соответствия требованиям, FMEA анализ

**Khoroshun G.M., Riazantsev A.O., Ryzantsev O.I.**  
**The methodology of decision making for evaluation of optical laboratory activity.**

The paper develops a methodology for decision - making to assess the compliance of the optical laboratory with technical requirements using FMEA - analysis. The FMEA method has been adapted to the analysis of the quality of measurements in optical laboratories. Criteria for assessing the quality of measurements are determined, statistical data from five different research laboratories are collected and processed. The block diagram of assessment of conformity of optical laboratory to technical requirements with methods of decision support in three stages is developed. The first stage is the selection of laboratories that have confirmed the ability to ensure the effectiveness, efficiency and reliability of measurements. The choice is made only of those discrepancies that significantly affect the registration of the image and obtain its quantitative characteristics are of maximum importance, namely: image jitter, noise, contrast, artifacts, aberrations, misalignment. The probability of detecting or revealing a discrepancy is also chosen to be maximum, taking into account the preliminary inspection of each element and the availability of information about its shortcomings. The frequency of risk

for each parameter is defined according to statistics when conducting a series of measurements taking into account variations on the working environment. The priority number of risk for each parameter and the average PCR are determined. The limit value of PCR<sub>gr</sub> is chosen. At the second stage, the compliance of the technical characteristics with the established criteria according to the classification of laboratories according to the requirements for each value of the parameter of the priority number of PCR risk  $\leq PCR_{gr}$  is determined. Recommendations from the knowledge base on actions to improve the level of measurements are given. A scale for assessing the quality of measurements in the laboratory is proposed. The third stage provides a method of decision support and recommendations for further management of the laboratory. A report is defined the type of diffraction and interference experiments that can be performed in the laboratory. The probability of measurements results conformity to standards and requirements of the customer is specified.

**Keywords:** decision-making methodology, optical laboratory, risk priority number, compliance assessment, FMEA analysis

**Хорошун Ганна Миколаївна** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії, доцент кафедри будівництва, урбаністики та просторового планування, Східноукраїнський Національний Університет імені Володимира Даля, [an-khor@i.ua](mailto:an-khor@i.ua)

**Рязанцев Олександр Іванович** – доктор технічних наук, професор, кафедра комп'ютерних наук та інженерії, Східноукраїнський Національний Університет імені Володимира Даля, [a\\_ryazantsev@ukr.net](mailto:a_ryazantsev@ukr.net)

**Рязанцев Андрій Олександрович** – аспірант кафедри комп'ютерних наук та інженерії, Східноукраїнський Національний Університет імені Володимира Даля, [drew.ryazancev@gmail.com](mailto:drew.ryazancev@gmail.com)

Стаття подана 09.10.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-264-8-15-19>

УДК 004.4'236

## ОСОБЛИВОСТІ МАСШТАБУВАННЯ ВЕБ-ДОДАТКІВ

Щербаков Є. В., Щербакова М. Є.

### SCALING FEATURES OF WEB APPLICATIONS

Shcherbakov E.V., Shcherbakova M.E.

*Node.js - це відносно нова платформа для розробки веб-додатків, серверів додатків, будь-якого типу мережевих серверних або клієнтських модулів, а також розробки програм загального призначення. Вона спроектована з можливістю максимальної масштабованості мережевих додатків завдяки оригінальному поєднанню можливостей серверної мови JavaScript, асинхронного введення-виведення і асинхронного програмування. У той час, коли в багатьох платформах потоки широко використовуються для масштабування додатків з метою максимального завантаження CPU, Node.js уникає потоків через їх внутрішню складність і великі накладні витрати при безкінечних переключеннях між ними. Додатки на платформі Node.js зазвичай потребують масштабування раніше, ніж традиційні веб-сервери, щоб забезпечити можливість користування всіма ресурсами додатка. Це змушує розробників розглядати можливість масштабування на самих ранніх етапах розробки її пересвідчуватися, що додаток не покладається на ресурси, які не можуть спільно використовуватися декількома процесами або комп'ютерами. Екземпляри додатків не повинні зберігати інформацію на ресурсах, які не підтримують спільного використання, таких як пам'ять або диск, що фактично є обов'язковою умовою масштабування. Масштабування сприятливо діє на інші характеристики додатка, зокрема, на надійність і відмовостійкість, бо дозволяє гарантувати певний рівень обслуговування навіть при наявності неполадок і збоїв. Коли запускається кілька екземплярів одного і того ж додатка, формується надлишкова система, тобто, якщо один з екземплярів припинить роботу, інші продовжать обслуговування запитів. Цю схему легко реалізувати за допомогою модуля cluster в додатках Node.js. Альтернативою використання модуля cluster є запуск декількох автономних екземплярів одного і того ж додатка, які прослуховують різні порти або виконуються на різних комп'ютерах, і використання зворотного проксі-сервера для доступу до екземплярів і розподілу трафіку між ними. Ще одним варіантом є розподіл додатку на відносно автономні компоненти, які оформлені як окремі, незалежні додатки, що мають власні бази даних. В статті показано, що можна виконувати масштабування веб-додатків шляхом їх декомпозиції на підставі виконуваних ними функцій і сервісів. Ця методика дозволяє масштабувати не тільки пропускну здатність додатків, але, що головніше, їх складність.*

**Ключові слова:** JavaScript, веб-сервер, Node.js, масштабування додатків, розподілені системи

**Вступ.** Характерні особливості платформи Node.js роблять її ідеальною для реалізації розподілених систем, які складаються з вузлів, взаємодіючих по мережі. Одного потоку виконання, який раціонально використовує неблокуюче введення/виведення, цілком достатньо для додатків, що обробляють помірне число запитів, зазвичай, кілька сотень в секунду (багато в чому залежить від особливостей додатка). Яким би потужним не було апаратне забезпечення, пропускну здатність одного потоку виконання все одно обмежена, тому якщо потрібно використовувати Node.js для створення високонавантажених додатків, виникає необхідність у масштабуванні платформи для використання в додатках кількох процесів і комп'ютерів [1].

Однак високе навантаження - не єдина причина масштабування додатків на платформі Node.js; фактично, використовуючи ті ж прийоми, можна поліпшити інші характеристики додатка, такі як надійність і стійкість до збоїв. Крім того, поняття «масштабованість» відноситься також до розміру і складності додатка, оскільки створення архітектури, здатної розширюватися, грає важливу роль при розробці програмного забезпечення. Тим більше, що використання JavaScript зобов'язує розробників зберігати додаток простим і розбивати його на керовані частини, що полегшує масштабування і розподіл навантаження [2].

**Клонування і розподіл навантаження в Node.js.** Традиційні багатопотокові веб-сервери зазвичай масштабуються, тільки коли неможливо наростити ресурси комп'ютера, або коли це є більш дорогою операцією, ніж підключення до роботи ще одного комп'ютера. Використовуючи механізм багатопотоковості, традиційні веб-сервери можуть задіяти всю обчислювальну потужність сервера, використовуючи всі доступні процесори і пам'ять.

Додатки на платформі Node.js зазвичай починають потребувати масштабування набагато раніше, ніж традиційні веб-сервери, навіть в одному ком-

п'ютері з тим, щоб мати можливість користуватися всіма його ресурсами [3].

Не варто вважати це недоліком. Навпаки, практично вимушене масштабування сприятливо діє на інші характеристики додатка, зокрема на надійність і відмовостійкість. Справді, масштабування додатка Node.js шляхом клонування є відносно простим і часто реалізується, навіть якщо немає необхідності задіяти більше ресурсів, а тільки з метою забезпечення надлишковості і стійкості до збоїв.

**Модуль cluster.** Базовий механізм для розподілу навантаження додатка між декількома екземплярами Node.js, запущеними на одному комп'ютері, заснований на модулі cluster, що входить до складу бібліотеки ядра. Модуль cluster спрощує розгалуження програми на кілька процесів і автоматично розподіляє між ними вхідні з'єднання, як це показано на схемі рис. 1.

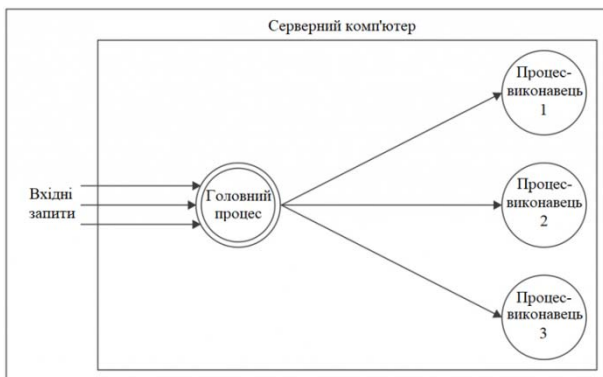


Рис. 1. Масштабування розгалуженням процесу

Головний процес (master process) відповідає за породження ряду процесів-виконавців (worker processes), кожен з яких представляє собою екземпляр масштабованого додатка. При цьому всі вхідні запити розподіляються між процесами-виконавцями, використовуючи циклічний алгоритм, який гарантує рівномірний розподіл навантаження між усіма процесами-виконавцями.

**Створення простого HTTP-сервера.** В якості прикладу створимо HTTP-сервер app.js, а потім здійснимо його клонування і розподіл навантаження за допомогою модуля cluster:

```
const http = require('http');
const pid = process.pid;
http.createServer((req, res) => {
  // Імітація інтенсивної роботи процесора
  let i = 1e7; while (i > 0) { i-- }
  console.log('Обробка запиту ${pid}');
  res.end('Hello from ${pid}\n');
}).listen(8080, () => {
  console.log('Стартував ${pid}');
});
```

У відповідь на будь-який запит HTTP-сервер буде повертати повідомлення з його ідентифікатором процесу (PID), що дозволяє визначити екземп-

ляр додатку, який обробляє запит. Крім того, для імітації навантаження на центральний процесор передбачено виконання 10 мільйонів порожніх циклів, без чого сервер не буде мати практично ніякого навантаження, крім невеликих тестових видач.

Для того, щоб масштабувати додаток app.js за допомогою модуля cluster, створимо ще один модуль clusteredApp.js:

```
const cluster = require('cluster');
const os = require('os');
if(cluster.isMaster) {
  // 1
  const cpus = os.cpus().length;
  console.log('Кластеризація на ${cpus} CPU');
  for (let i = 0; i < cpus; i++) {
    cluster.fork();
  }
} else {
  // 2
  require('./app');
}
```

Як видно, використання модуля cluster не вимагає особливих зусиль. Пояснимо, що відбувається:

1. Запуск модуля clusteredApp з командного рядка фактично означає запуск головного процесу. Змінна cluster.isMaster автоматично отримує значення true, і вся робота зводиться до розгалуження процесу викликом методу cluster.fork(). У приведеному прикладі визначається кількість процесорів в системі і запускається така ж кількість робочих процесів, що дозволяє задіяти всі доступні обчислювальні потужності.

2. Виклик методу cluster.fork() в головному процесі здійснює повторний запуск все того ж головного модуля (clusteredApp), але на цей раз у вигляді процесу-виконавця (змінна cluster.isWorker отримує значення true, а змінна cluster.isMaster - значення false). Коли додаток запускається як процес-виконавець, він може почати виконувати якусь реальну роботу. В даному прикладі завантажується модуль app.js, що призводить до запуску нового HTTP-сервера.

Важливо не забувати, що кожен виконавець - це окремий процес Node.js з власним циклом подій, простором пам'яті і завантаженими модулями.

Внутрішньо модуль cluster використовує метод child\_process.fork(), тому автоматично утворюються комунікаційні канали між головним процесом і процесами-виконавцями. Екземпляри процесів-виконавців доступні через змінну cluster.workers, тому для відправки всім їм повідомлення досить наступних рядків коду:

```
Object.keys(cluster.workers).forEach(id => {
  cluster.workers[id].send('Привіт від головного процесу');
});
```

**Масштабування за допомогою зворотного проксування.** Використання модуля cluster - не єдиний спосіб масштабування веб-додатків на платформі Node.js. Фактично традиційні методи часто виявляються кращими, оскільки забезпечують більш повний контроль і ширші можливості в середовищах з високою доступністю.

Альтернативою використанню модуля cluster є запуск декількох автономних екземплярів одного і того ж додатка, які прослуховують різні порти або виконуються на різних комп'ютерах, і використання зворотного проксі-сервера (або шлюзу) для доступу до екземплярів і розподілу трафіку між ними [4]. У такій конфігурації відсутній головний процес, який розподіляє запити між процесами-виконавцями, натомість є багато автономних процесів, запущених на виконання на одному комп'ютері (таких, що прослуховують різні порти) або розкиданих по декількох комп'ютерах в мережі. Роль єдиної точки доступу до додатка грає зворотний проксі-сервер - спеціальний модуль або сервіс, що знаходиться між клієнтами і екземплярами додатка, який приймає всі запити, передає їх кінцевому серверу і повертає результат клієнтові, ніби він сам його створив. У цьому випадку зворотний проксі-сервер використовується також в якості балансувальника навантаження, розподіляючи запити між екземплярами додатка.

На рис. 2 зображена схема типової конфігурації зворотного проксі-сервера, який виступає в ролі балансувальника навантаження між кількома процесами, запущеними на кількох комп'ютерах.

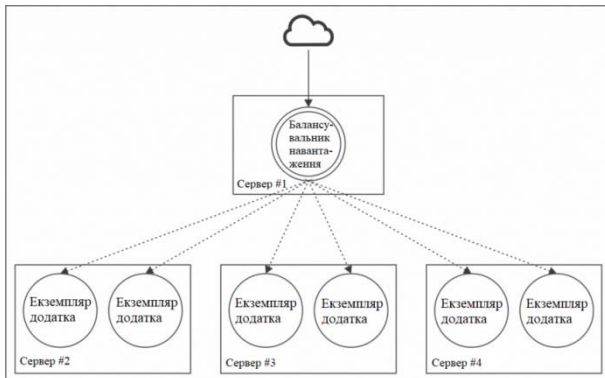


Рис. 2. Типова конфігурація зворотного проксі-сервера

**Декомпозиція складних додатків.** Можна виконати масштабування додатка шляхом його декомпозиції на підставі виконуваних ним функцій і сервісів. Ця методика дозволяє масштабувати не тільки пропускну здатність додатка, але, що головніше, його складність.

**Монолітна архітектура.** Монолітна архітектура програмного комплексу не завжди означає систему без модулів, в якій всі служби взаємопов'язані і практично нероздільні. Часто монолітні системи мають модульну архітектуру і гарний розподіл внутрішніх компонентів.

Хорошим прикладом є ядро Linux, яке відноситься до категорії так званих монолітних ядер (що

суперечить принципам екосистеми і філософії Unix). Ядро Linux містить тисячі сервісів і модулів, які можна завантажувати і вивантажувати динамічно, навіть під час роботи системи. Однак всі вони виконуються в режимі ядра, що може приводити до неминучого краху операційної системи при виникненні збою в будь-якому з них.

Альтернативою монолітній архітектурі є мікроядерна архітектура, в якій тільки основні сервіси операційної системи працюють в режимі ядра, а всі інші виконуються в режимі користувача і, як правило, кожен в своєму власному процесі. Основна перевага такого підходу в тому, що збій в будь-якому з цих сервісів зазвичай призводить тільки до краху цього сервісу, не впливаючи на стабільність всієї системи.

Сучасні монолітні додатки можна порівняти з монолітними ядрами ОС. Збій в будь-якому компоненті впливає на всю систему, тобто, якщо перевести в терміни платформи Node.js, це означає, що всі сервіси є частиною однієї кодової бази і виконуються в одному процесі (якщо не клонуються).

На рис. 3 зображений приклад монолітної архітектури веб-додатка.

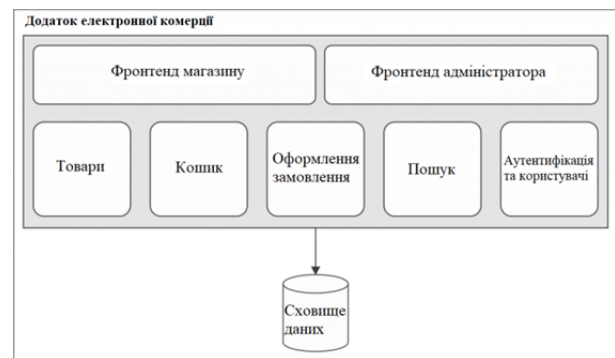


Рис. 3. Приклад монолітної архітектури типового веб-додатка

Представлений додаток має модульну структуру. У ньому передбачені два різні інтерфейси: один - основний - для магазину і другий - для адміністрування. Є також чіткий поділ сервісів, кожен з яких відповідає за конкретну частину бізнес-логіки: товари, кошик, оформлення замовлення, пошук і аутентифікацію користувачів. Однак його архітектура є монолітною, оскільки всі модулі, по суті, є частиною однієї і тієї ж кодової бази і запускаються як частина одного додатка. Збій в будь-якому з компонентів, наприклад, не перехоплений виняток, може привести до краху всього інтернет-магазину.

**Мікросервісна архітектура.** Ідея полягає в тому, щоб розділити додаток на відносно автономні компоненти, оформивши їх як окремі, незалежні додатки. Це повна протилежність концепції монолітної архітектури. На рис. 4 зображена схема додатка електронної комерції з мікросервісною архітектурою.



Рис. 4. Приклад мікросервісної архітектури веб-додатка

Кожен з основних компонентів електронної комерції тепер є самостійною незалежною сутністю, знаходиться в окремому контексті і має власну базу даних. Всі компоненти є незалежними додатками, які надають групу пов'язаних між собою сервісів (висока зчепленість).

Володіння сервісом власними даними є важливою характеристикою мікросервісної архітектури. Ось чому база даних також повинна розділятися для підтримки належного рівня ізоляції та незалежності. Якщо використовується загальна база даних, сервісам стане набагато легше працювати разом; однак це також призводить до зв'язності між сервісами (загальні дані), зводячи нанівець деякі переваги існування різних додатків.

**Висновок.** Поділ великого монолітного додатка на ряд невеликих сервісів дозволяє створювати незалежні одиниці, які без особливих зусиль можуть повторно використовуватися.

Головною перевагою мікросервісів є те, що рівень приховування інформації в них, як правило, набагато вище в порівнянні з монолітним додатком. Це стає можливим через те, що взаємодія зазвичай відбувається через віддалений інтерфейс, наприклад, через веб-сервіс або брокер повідомлень, що робить набагато простішим приховування деталей реалізації і захист клієнта від впливу змін в реалізації або розгортанні сервісу. Наприклад, щоб викликати веб-сервіс, не потрібно знати особливості масштабування його інфраструктури, якою мовою програмування він написаний, яка база даних використовується і таке інше.

#### Література

1. Herron D. Node.js Web Development. Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK, 2020. 765 p.
2. Casciaro M., Mammino L. Node.js Design Patterns, Third Edition. Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK, 2020. 661 p.
3. Node.js v15.1.0 Documentation [Електронний ресурс] URL: <https://nodejs.org/dist/latest-v15.x/docs/api/>
4. Thomas Hunter II. Distributed Systems with Node.js. O'Reilly Media: Sebastopol, California, 2021. 557 p.

#### References

1. Herron D. Node.js Web Development. Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK, 2020. 765 p.
2. Casciaro M., Mammino L. Node.js Design Patterns, Third Edition. Packt Publishing Ltd.: Birmingham, UK, 2020. 661 p.
3. Node.js v15.1.0 Documentation [Electronic resource] URL: <https://nodejs.org/dist/latest-v15.x/docs/api/>
4. Thomas Hunter II. Distributed Systems with Node.js. O'Reilly Media: Sebastopol, California, 2021. 557 p.

#### Щербаков Е.В., Щербакова М.Е. Особенности масштабирования веб-приложений

*Node.js - это относительно новая платформа для разработки веб-приложений, серверов приложений, любого рода сетевых серверных или клиентских модулей, а также разработки программ общего назначения. Она спроектирована с возможностью максимальной масштабируемости сетевых приложений благодаря оригинальному сочетанию возможностей серверного языка JavaScript, асинхронного ввода-вывода и асинхронного программирования. В то время, когда во многих платформах потоки широко используются для масштабирования приложений с целью максимальной загрузки CPU, Node.js избегает потоков из-за их внутренней сложности и больших накладных расходов при бесконечных переключениях между ними. Приложения на платформе Node.js обычно требуют масштабирования ранее, чем традиционные веб-серверы, чтобы обеспечить возможность использования всех ресурсов приложения. Это вынуждает разработчиков рассматривать возможность масштабирования на самых ранних этапах разработки и удостовериться, что приложение не полагается на ресурсы, которые не могут совместно использоваться несколькими процессами или компьютерами. Экземпляры приложений не должны хранить информацию на ресурсах, которые не поддерживают совместное использование, таких как память или диск, что фактически является обязательным условием масштабирования. Масштабирование благоприятно воздействует на другие характеристики приложения, в частности, надежность и отказоустойчивость, так как позволяет гарантировать определенный уровень обслуживания даже при наличии неполадок и сбоев. Когда запускается несколько экземпляров одного и того же приложения, формируется избыточная система, то есть, если один из экземпляров прекратит работу, другие продолжат обслуживание запросов. Эту схему легко реализовать с помощью модуля cluster в приложениях Node.js. Альтернативой использования модуля cluster является запуск нескольких автономных экземпляров одного и того же приложения, которые прослушивают различные порты или выполняются на разных компьютерах, и использование обратного прокси-сервера для доступа к экземплярам и распределения трафика между ними. Еще одним вариантом является распределение приложения на относительно автономные компоненты, которые оформлены как отдельные, независимые приложения, имеющие собственные базы данных. В статье показано, что можно выполнять масштабирование веб-приложений путем их декомпозиции на основании выполняемых ими функций и сервисов. Эта методика позволяет масштабировать не только пропускную способность приложений, но, что главное, их сложность.*

**Ключевые слова:** JavaScript, веб-сервер, Node.js, масштабирование приложений, распределенные системы

**Shcherbakov E.V., Shcherbakova M.E. Scaling features of web applications**

*Node.js is a relatively new platform for developing web applications, application servers, any type of network server or client modules, and developing general-purpose applications. It is designed to maximize the scalability of network applications thanks to the original combination of JavaScript server language capabilities, asynchronous I/O and asynchronous programming. While on many platforms threads are widely used to scale applications to maximize CPU usage, Node.js avoids threads because of their intrinsic complexity, as well as the high overhead of endless switching between them. Applications on the Node.js platform typically need to be scaled earlier than traditional web servers to ensure all application resources can be used. This forces developers to consider scaling at the earliest stages of development and make sure the application does not rely on resources that cannot be shared by multiple processes or computers. Application instances should not store information on resources that do not support sharing, such as memory or disk, which is actually a prerequisite for scaling. Scaling has a positive effect on other application characteristics, in particular, on reliability and fault tolerance, because it guarantees a certain level of service even when malfunctions and failures happens. When multiple instances of the same application are launched, a redundant system is formed, so if one instance stops working, the others will continue to service requests. This scheme is easy to implement using the cluster module in Node.js applications. An*

*alternative to using the cluster module is to run multiple stand-alone instances of the same application that listen on different ports or run on different computers, and use a reverse proxy server to access instances and distribute traffic between them. Another option is to divide the application into relatively stand-alone components, which are designed as separate, independent applications with their own databases. The article shows possibility to scale web applications by decomposing them on the basis of their functions and services. This technique allows to scale not only the bandwidth of applications, but most importantly, their complexity.*

**Keywords:** JavaScript, web server, Node.js, application scaling, distributed systems

**Щербаков Є.В.** – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, e-mail: gkvarc@gmail.com

**Щербакова М. Є.** – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, e-mail: m.shcherbakova432@gmail.com

Стаття подана 10.11.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-264-8-20-26>

УДК 66.021.1

## ДЕЯКІ АЕРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВОГО КЛАПАНА

Москалик В. М., Карпюк Л. В., Табунщиків В. Г., Созонтов В. Г.

### SOME AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A GAS VALVE

Moskalyk V. M., Karpyuk L. V., Tabunshchikov V. G., Sozontov V. G.

*Розроблений на основі синергетичного підходу новий газовий розподільник дозволяє створити рівномірний профіль швидкості в промисловому апараті в широкому діапазоні його роботи. Основним елементом газового розподільника служить газовий клапан – трубка з розміщеними в ній короткими дифузорами. Принцип роботи газового клапана заснований на його здатності частково відбивати набігаючий потік газу. Розроблені експериментальна установка і методика дослідження аеродинаміки газового клапана, що дало можливість провести ґрунтовне вивчення часткового відбиття повітря газовим клапаном. Для оцінки ефективності роботи газового клапана введено поняття коефіцієнта відбиття потоку газовим клапаном, який характеризує здатність газового клапана частково відбивати потік газу і тим самим за рахунок перерозподілу газу між газовими клапанами розподільника формувати рівномірний профіль швидкості. Чим більший коефіцієнт відбиття потоку газовим клапаном, тим більша здатність розподільника до формування рівномірного профілю швидкості і, навпаки, чим менший коефіцієнт відбиття потоку газовим клапаном, тим менша здатність розподільника до формування рівномірного профілю швидкості. Встановлено, що найбільший коефіцієнт відбиття потоку газовим клапаном спостерігається в досить вузькому діапазоні відносної відстаней короткого дифузора від зрізу трубки, що дорівнює 0,75-2,2 її діаметрам. Виявлено, що збільшення ступеня розширення короткого дифузора в газовому клапані призводить до стрибкоподібного зростання коефіцієнта відбиття потоку газовим клапаном, а вплив відносної довжини і кута розширення несуттєво. При цьому у всіх випадках з ростом числа Рейнольдса спостерігається зменшення за ступеневою залежністю коефіцієнта відбиття потоку газовим клапаном. Рекомендується при конструюванні газового клапана розміщувати в ньому кількість коротких дифузоров не більше трьох, але не менше двох, при цьому направляючі отвори коротких дифузоров повинні утворювати конфузур, що відповідає винаходу. Отримані узагальнені експериментальні дані по аеродинаміці газового клапана забезпечать надійне проектування конструкцій розподільників газу для промислових апаратів.*

**Ключові слова:** аеродинаміка, газовий клапан, короткий дифузур, швидкість газу, розподільник газу.

**Вступ.** Знання про характер розподілу потоку газу в шарі каталізатора необхідне для проектування конструкції реактора. Характер розподілу газу в шарі каталізатора істотно залежить від сформованого його виду на вході спочатку. Розрізняють два способи формування газу на вході в шар каталізатора: перший спосіб заснований на створенні додаткового гідравлічного опору, наприклад, ґратами і другий спосіб – на розподілі газу направляючими лопатками [1, 2]. Прикладами використання вказаних способів відповідно можуть служити контактний апарат виробництва азотної кислоти і реактор синтезу метанолу при низькому тиску [3].

Запропонований нами новий спосіб [4], заснований на синергетичному підході, здатний сформувати рівномірний потік газу в промисловому апараті в широкому діапазоні його роботи, що принципово відрізняє його від відомих способів і робить конкурентоспроможним. Пристрій розподілу газу всередині апарату конструктивно являє собою набір газових клапанів, за якими внаслідок самоорганізації відбувається перерозподіл потоку. Газовий клапан це трубка з розміщеними в ній короткими дифузорами. Принцип роботи газового клапана заснований на його здатності частково відбивати потік газу, що набігає. Ефект досягається формуванням вхідного змінного газового перерізу внаслідок виникнення зворотних струмів газу між внутрішньою стінкою трубки і зовнішньою стінкою короткого дифузора. Чим більша кількість газу набігає на газовий клапан, тим менший формується переріз для проходу газу і навпаки, чим менша кількість газу набігає на газовий клапан, тим більший формується переріз для проходу. В результаті газ порівну перерозподіляється між газовими клапанами розподільного пристрою і створює рівномірний профіль швидкості газу після нього, наприклад, на вході в шар каталізатора.

Промислове застосування нового розподільника газу повинно ґрунтуватися на детальному вивченні пристрою з виробленням практичних рекомендацій щодо його застосування. З цією метою

проведено [5, 6] ґрунтовні аеродинамічні дослідження короткого дифузора, що є основним елементом газового клапана, і отримані залежності його коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса і основних геометричних параметрів дифузора, а саме, кута розширення, ступеня розширення і відносної довжини.

**Мета дослідження.** Мета даної роботи полягала у вивченні та узагальненні інформації щодо відбиття потоку газовим клапаном. Оскільки основним конструктивним елементом газового клапана є короткий дифузор, вмонтований в трубку, то дослідженню піддавали вплив основних геометричних параметрів дифузора, а саме, кута розширення, ступеню розширення та відносної довжини на відбиття потоку газовим клапаном в залежності від кількості набігаючого на нього повітря. Також інтерес представляв вплив на відбиття потоку повітря кількості коротких дифузорів та їх взаємне розташування у газовому клапані.

**Опис лабораторної експериментальної установки та методики експерименту.** Експериментальні дослідження проводилися на лабораторній установці, принципова схема якої представлена на рис. 1. В якості робочого середовища використовували повітря, що подавалось поршневым компресором 1. Кількість повітря регулювали вентилям 2 за показаннями ротаметра 3. Повітря від компресора 1, пройшовши вентиль 2 і ротаметр 3, надходило в патрубок подачі повітря 4, функція якого полягала у формуванні потоку, що набігає на газовий клапан 5. Патрубок подачі повітря 4 мав внутрішній діаметр 24 мм і довжину 122 мм. Основним елементом дослідження установки був газовий клапан 5, встановлений співвісно з патрубком подачі повітря 4. Газовий клапан 5 представляв собою порожню трубку завдовжки 122 мм, в яку монтували короткі дифузори відповідно до заявленого винаходу [4]. Короткі дифузори всередині трубки чергувалися з мірними по довжині кільцями внутрішнім діаметром 24 мм, що давало можливість набирати дифузори в будь-якому конструктивному варіанті, цікавому для дослідження, з попередньо відомими геометричними розмірами. Набрана таким чином конструкція газового клапана жорстко утримувалася внутрішньою стопорною пружиною.

У всіх експериментах відстань між патрубком подачі повітря 4 і газовим клапаном 5 фіксували незмінним за допомогою калібрувальної пластини, рівною за товщиною 6 мм. У цьому випадку площа щілини, що утворювалася між патрубком подачі повітря і газовим патрубком, дорівнювала площі поперечного перерізу трубки подачі повітря. Швидкість повітря, що проходило через газовий клапан, визначалася механічним анемометром 6 чашкового типу. У анемометрі 6 приймачем повітря служили три напівсферичні чашки, симетрично насаджені на хрестоподібні спиці ротора, що оберталися на вертикальній осі. Обертання ротора передавалося на механічний лічильник, що показувало швидкість повітря,

яке пройшло через газовий клапан 5. Знаючи швидкість повітряного потоку і внутрішній діаметр газового клапана, рівний 24 мм, можна легко визначити об'ємну витрату повітря  $V_a$ , що проходить через газовий клапан.

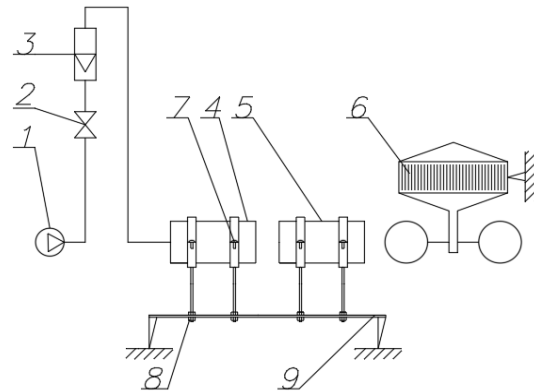


Рис. 1. Схема лабораторної експериментальної установки:  
1 – компресор; 2 – вентиль; 3 – ротаметр;  
4 – патрубок подачі повітря; 5 – газовий клапан;  
6 – анемометр; 7, 8 – регулювальні гвинт з гайками;  
9 – стільниця лабораторного стола

Вся конструкція лабораторної експериментальної установки збиралася на стільниці лабораторного стола 9. Остаточні налаштування і доведення положення елементів і пристроїв установки здійснювалися регулюючими гвинтами з гайками 7, 8. Загальний вигляд лабораторної експериментальної установки показаний на рис. 2.

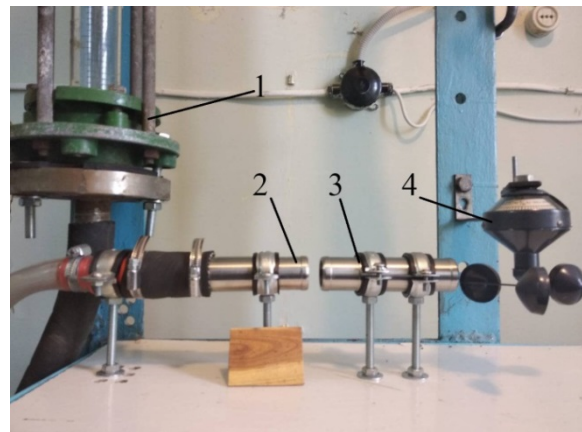


Рис. 2. Основні елементи лабораторної експериментальної установки:  
1 – ротаметр; 2 – патрубок подачі повітря;  
3 – газовий клапан; 4 – анемометр

Відповідно до винаходу [4] внутрішнім елементом газового клапана є короткий дифузор. Досліджували відбивну здатність газового клапана з короткими дифузорами геометричними розмірами яких представлені на рис. 3. Відомо, що основними геометричними параметрами дифузора є: кут розширення  $\alpha$ , ступінь розширення  $n=F_1/F_0$  і відносна

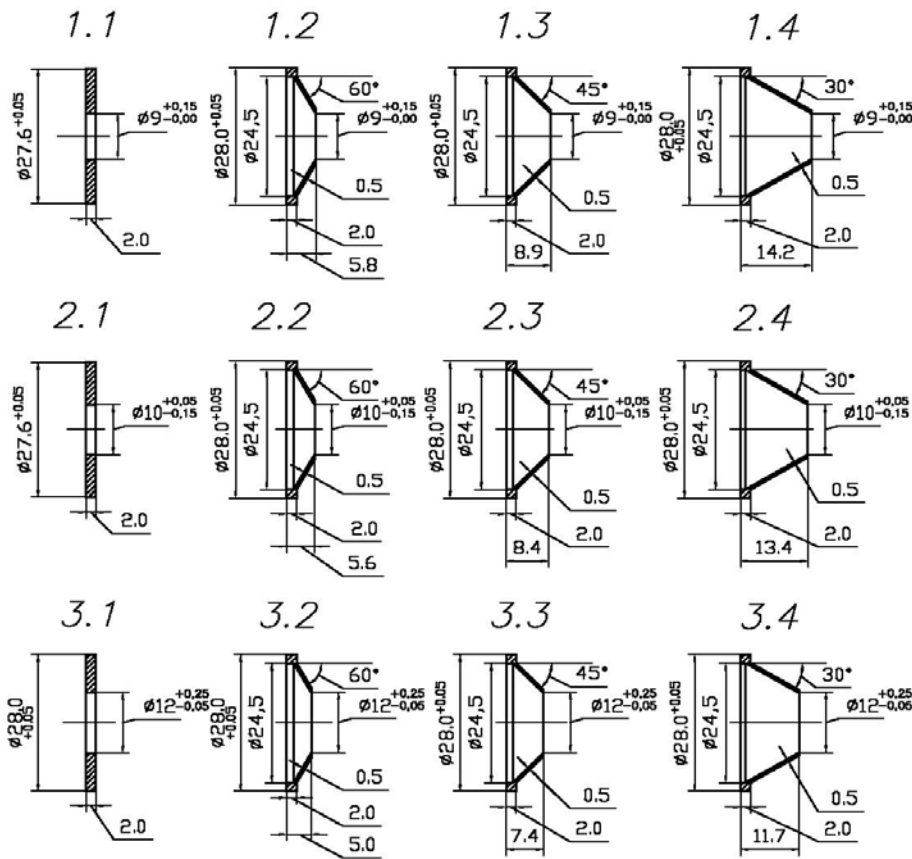


Рис. 3. Геометричні розміри внутрішніх пристроїв газового клапана: позиції 1.1, 2.1, 3.1 – діафрагми, останні позиції – короткі дифузори

довжина  $l_d/D_0$ , где  $F_0$  і  $F_1$  – площі відповідно вхідного і вихідного отворів дифузора,  $m^2$ ,  $l_d$  – довжина дифузора,  $m$ ,  $D_0$  – вхідний діаметр дифузора,  $m$ . Геометричні параметри коротких дифузорові варіювалися в наступних діапазонах: кут розширення  $\alpha$  в межах  $60^\circ$ - $120^\circ$ , ступінь розширення  $n$  в межах  $4,0$ - $7,11$  і відносна довжина  $l_d/D_0$  в межах  $0,25$ - $1,36$ .

Методика вивчення відбивної здатності газового клапана полягала в наступному. Повітря, що виходило з патрубку подачі, створювало потік, що набігав на газовий клапан. У газовому клапані, оснащеному короткими дифузорами, його внутрішня стінка і зовнішня стінка дифузора утворюють зворотний струм повітря, приводячи до формування змінного вхідного газового перерізу у клапані. В результаті відбувається як часткове відбиття від газового клапана, так і часткове проходження повітря через клапан. За інших рівних умов чисельні величини відбиття і проходження повітря залежать від площі сформованого вхідного газового перерізу у газовому клапані, яка в свою чергу має бути залежати від кількості повітря, що подається, геометричних параметрів дифузора, їх кількості та характеру розташування. Якщо позначити об'ємну витрату повітря, що набігає на клапан  $V_p$ , що відповідає показанням ротаметра, то коефіцієнт відбиття потоку газовим клапаном можна охарактеризувати відносною величиною, рівною  $(V_p - V_a)/V_p$ .

Взаємне розташування патрубка подачі повітря 4 і газового клапана 5 і течії потоку повітря в них і між ними є фізична модель аеродинамічних процесів, що мають відбуватися в промисловому розподільнику газового потоку [4].

**Підготовка до експерименту.** Для достовірного визначення коефіцієнта відбиття потоку газовим клапаном необхідно мати задовільні порівняльні результати об'ємних витрат повітря за ротаметром і за анемометром. З цією метою було проведено попередній підготовчий експеримент з використанням існуючої експериментальної установки, див. рис. 1 і рис. 2, але замість газового клапана застосували трубку внутрішнім діаметром 24 мм і довжиною 122 мм, а розрив між патрубком подачі повітря і вказаною трубою усунули, герметично з'єднавши їх гумовою трубою. Повітря подавали на установку і його об'ємну витрату  $V_p$  фіксували за ротаметром. На виході з трубки анемометром заміряли швидкість повітря і по ній розраховували об'ємну витрату  $V_a$ . Оцінку показань за ротаметром і за анемометром проводили розрахунком за величиною відносної помилки. Об'ємні витрати повітря за ротаметром  $V_p$  і за анемометром  $V_a$ , а також відносна помилка  $\delta$  в % їх показань представлені в таблиці, де неважко помітити задовільні результати в діапазоні проведення експерименту.

Таблиця  
Результати зіставлення об'ємних витрат повітря за ротаметром  $V_p$  та за ареометром  $V_a$

№ з/п.	$V_p \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$	$V_a \cdot 10^3, \text{ м}^3/\text{с}$	$\delta, \%$
1	2,887	2,713	6,41
2	3,486	3,210	8,60
3	4,086	3,979	2,95
4	4,686	4,567	1,89
5	5,285	5,426	-2,60
6	5,885	5,938	-0,893
7	6,484	6,782	-4,39
8	7,084	7,461	-5,05
9	7,683	8,079	-4,90

**Результати та їх обговорення.** На першому етапі проведення експерименту необхідно було з'ясувати вплив на коефіцієнт відбиття потоку газівим клапаном віддаленість короткого дифузора від зрізу трубки. З цією метою з комплекту внутрішніх пристроїв газового клапана, показаних на рис. 3, був обраний короткий дифузор під номером 2.3 з наступними геометричними параметрами:  $D_0=10$  мм,  $\alpha=90^\circ$ ,  $n=5,76$ ,  $l_0/D_0=0,64$ . Обраний короткий дифузор встановлювали в трубці на різних відстанях  $l$  від її зрізу за допомогою мірних кілець внутрішнім діаметром  $D=24$  мм і при числах Рейнольдса  $Re=13425,5$  і  $Re=25246,1$  провели серію вимірів. Результати досліджень наведені на рис. 4, з яких видно, що найбільший коефіцієнт відбиття потоку газівим клапаном спостерігається в досить вузькому діапазоні відносних відстаней  $l/D$  від зрізу трубки, що дорівнює  $0,75-2,2$ . Причиною невеликої робочої ділянки  $l/D$  є те, що при  $l/D$  менших, ніж  $0,75$  і при  $l/D$  більших, ніж  $2,2$  потік повітря, що набігає на газовий клапан, не дозволяє повноцінно сформувати зворотні струми і тим самим створити змінний вхідний газовий переріз. Виявилось, що при менших числах  $Re$  коефіцієнт відбиття потоку газівим клапаном трохи більше, ніж при великих числах  $Re$ .

Для уточнення впливу на коефіцієнт відбиття потоку газівим клапаном числа Рейнольдса в незалежних експериментах була послідовно досліджена аеродинаміка газового клапана з короткими дифузорами під номерами 3.2, 3.3 і 3.4 (див. рис. 4), що мають однакову ступінь розширення  $n=4$ , але різні кути розширення  $\alpha$  (відповідно  $120^\circ$ ,  $90^\circ$  і  $60^\circ$ ) і відносні довжини  $l_0/D_0$  (відповідно  $0,250$ ,  $0,450$  і  $0,808$ ). Результати експериментів представлені на рис. 5. Для всіх обраних коротких дифузоров коефіцієнт відбиття потоку газівим клапаном зменшується зі збільшенням числа  $Re$ , що змінюється в діапазоні від  $10000$  до  $25000$ . Слід зауважити, що такі геометричні параметри дифузора, як кут розширення  $\alpha$  і ступінь розширення  $l_0/D_0$  практично не впливають на коефіцієнт відбиття потоку газівим клапаном, що узгоджується з раніше проведеними дослідженнями

[5, 6] при вивченні коефіцієнта гідравлічного опору короткого дифузора.

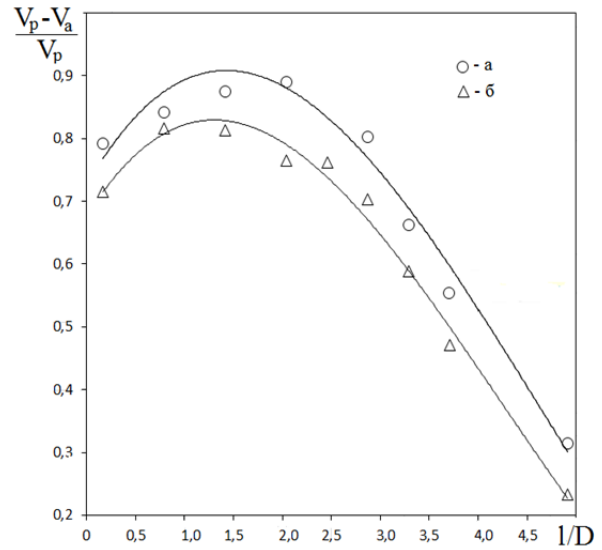


Рис. 4. Залежність коефіцієнта відбиття потоку  $(V_p - V_a)/V_p$  повітря газівим клапаном від відносної відстані  $l/D$  одинокого дифузора ( $D_0=10$  мм,  $\alpha=90^\circ$ ,  $n=5,76$ ,  $l_0/D_0=0,64$ ) у газівому клапані від вхідного його зрізу: а –  $Re=13425,5$ ; б –  $Re=25246,1$

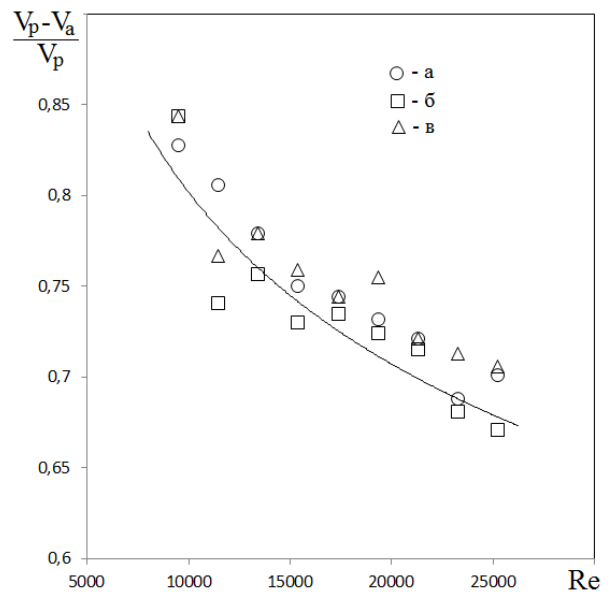


Рис. 5. Залежність коефіцієнта відбиття потоку  $(V_p - V_a)/V_p$  повітря газівим клапаном з одним дифузоров ( $D_0=12$  мм) від числа Рейнольдса  $Re$  при  $n=4,0$ : а –  $\alpha=120^\circ$ ,  $l_0/D_0=0,250$ ; б –  $\alpha=90^\circ$ ,  $l_0/D_0=0,450$ ; в –  $\alpha=60^\circ$ ,  $l_0/D_0=0,808$

Вплив на коефіцієнт відбиття потоку повітря газівим клапаном ступеня розширення  $n$  короткого дифузора показано на рис. 6. В експериментах використовували короткі дифузори під номерами 1.4, 2.4 і 3.4 (див. рис. 3), які відповідно мали ступінь розширення  $n$ , що дорівнювали  $7,11$ ,  $5,76$  і  $4,0$ . При цьому короткі дифузори мали однаковий кут розши-

рення  $\alpha=60^\circ$  і близькі за величиною відносні довжини  $l_d/D_0$ . З графіків видно, що чим більший ступінь розширення короткого дифузора, тим більший коефіцієнт відбиття потоку газовим клапаном. Загальна тенденція поведінки залежностей зберігається, чим більше число Рейнольдса, тим менший коефіцієнт відбиття потоку газовим клапаном. Результати також узгоджуються з раніше отриманими даними по визначенню коефіцієнта гідравлічного опору короткого дифузора [5, 6].

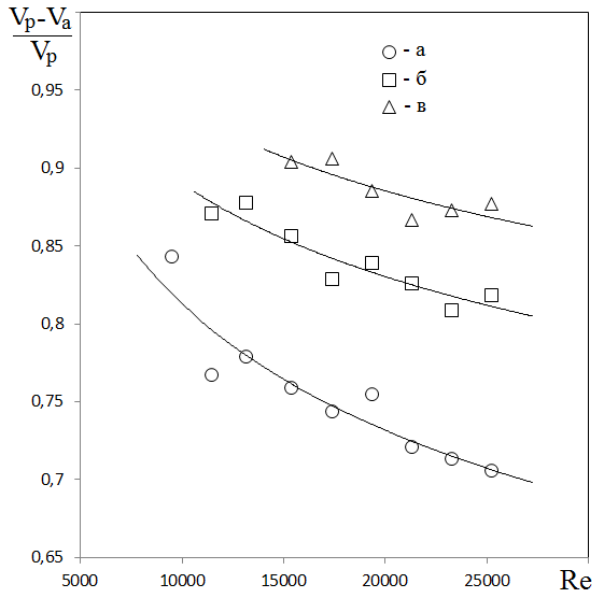


Рис. 6. Залежність коефіцієнта відбиття потоку  $(V_p - V_a)/V_p$  повітря газовим клапаном з одним дифузором ( $\alpha=60^\circ$ ) від числа Рейнольдса  $Re$ : а –  $D_0=12$  мм,  $n=4,0$ ,  $l_d/D_0=0,808$ ; б –  $D_0=10$  мм,  $n=5,76$ ,  $l_d/D_0=1,140$ ; в –  $D_0=9$  мм,  $n=7,11$ ,  $l_d/D_0=1,36$

На рис. 7 показані залежності коефіцієнта відбиття потоку повітря газовим клапаном з поодинокими короткими дифузорами і комплексу коротких дифузоров, що складалися з цих же трьох дифузоров, від числа Рейнольдса. Використовували короткі дифузори на рис. 3 під номерами 1.3, 2.3 і 3.3. Вони мали один і той же кут розширення  $\alpha=90^\circ$  і близькі за величиною відносні довжини  $l_d/D_0$ , але ступінь розширення  $n$  їх істотно відрізнялася і відповідно чисельно дорівнювала 7,11, 5,76 і 4,0. У газовому клапані з трьома дифузорами їх розташування відповідало винаходу [4], де направляючі отворів дифузоров формували конфузори, тобто послідовність дифузоров складала 3.3, 2.3 і 1.3. У всіх випадках газового клапана з поодинокими короткими дифузорами спостерігалася нестійка аеродинамічна течія через них повітря, що підтверджується рівнем розсіюваності результатів вимірювань величини коефіцієнта відбиття потоку повітря. Для газового клапана з трьома дифузорами течія повітря була більш стійкою, що підтверджується залежністю г) на рис. 7. Цікаво відзначити, що підсумкова залежність з трьома короткими дифузорами розташувалася між двох залежностей з поодинокими короткими дифу-

зорами, що мають ступінь розширення рівну 7,11 і 5,76, причому ближче до залежності з  $n=5,76$ .

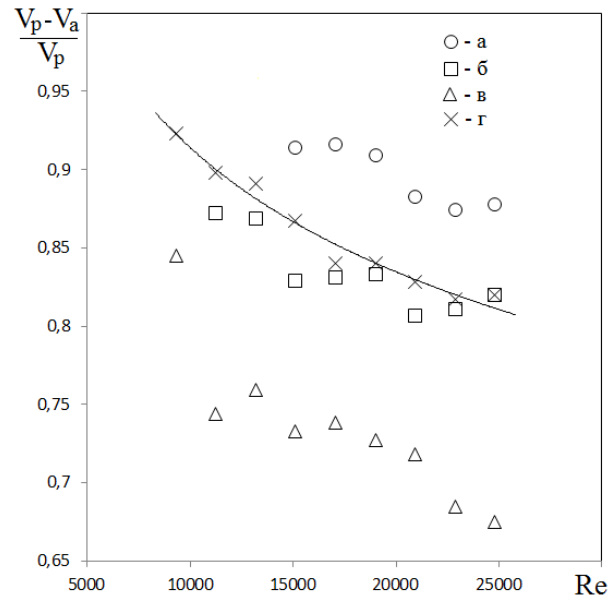


Рис. 7. Залежність коефіцієнта відбиття потоку  $(V_p - V_a)/V_p$  повітря газовим клапаном з трьома дифузорами від числа Рейнольдса  $Re$  за їх розміщенням у напрямку набігання повітря: а – одинокий дифузор  $D_0=9$  мм,  $n=7,11$ ,  $l_d/D_0=0,767$ ,  $\alpha=90^\circ$ , б – одинокий дифузор  $D_0=10$  мм,  $n=5,76$ ,  $l_d/D_0=0,640$ ,  $\alpha=90^\circ$ , в – одинокий дифузор  $D_0=12$  мм,  $n=4,0$ ,  $l_d/D_0=0,450$ ,  $\alpha=90^\circ$ , г – три дифузори, де перший дифузор  $D_0=12$  мм,  $n=4,0$ ,  $l_d/D_0=0,450$ , другий дифузор  $D_0=10$  мм,  $n=5,76$ ,  $l_d/D_0=0,640$ , третій дифузор  $D_0=9$  мм,  $n=7,11$ ,  $l_d/D_0=0,767$

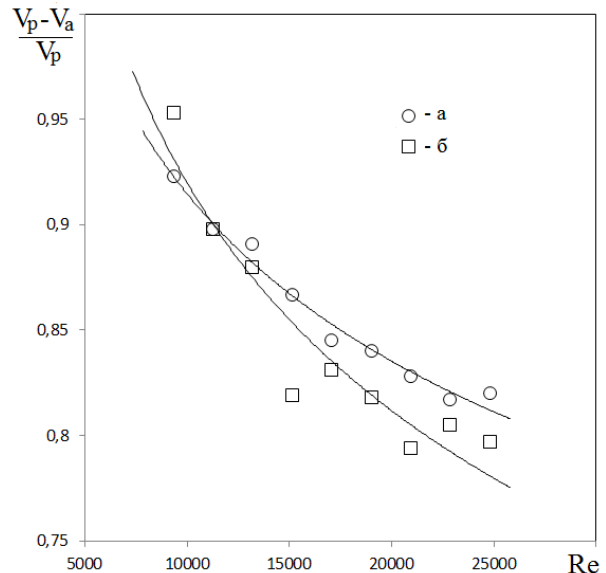


Рис. 8. Залежність коефіцієнта відбиття потоку  $(V_p - V_a)/V_p$  повітря газовим клапаном з трьома дифузорами ( $\alpha=90^\circ$ ) від числа Рейнольдса  $Re$  за їх розміщенням у напрямку набігання повітря: а – перший дифузор  $D_0=12$  мм,  $n=4,0$ ,  $l_d/D_0=0,450$ , другий дифузор  $D_0=10$  мм,  $n=5,76$ ,  $l_d/D_0=0,640$ , третій дифузор  $D_0=9$  мм,  $n=7,11$ ,  $l_d/D_0=0,767$ ; б – перший дифузор  $D_0=9$  мм,  $n=7,11$ ,  $l_d/D_0=0,767$ , другий дифузор  $D_0=10$  мм,  $n=5,76$ ,  $l_d/D_0=0,640$ , третій дифузор  $D_0=12$  мм,  $n=4,0$ ,  $l_d/D_0=0,450$

Рис. 8 містить експериментальні дані по залежності коефіцієнта відбиття потоку повітря газовим клапаном від числа Рейнольдса для умов розміщення в газовому клапані трьох коротких дифузорів, направляючі отвори яких в напрямку потоку, що набігає формують конфузори і дифузори. У першому випадку короткі дифузори розташовували в газовому клапані в порядку 3.3, 2.3 і 1.3 і в другому випадку – 1.3, 2.3 і 3.3 (див. рис. 3). У першому випадку, графік а), крива більш полого з добре передбачуваними результатами. У другому випадку, графік б), течія повітря через дифузори нестійка зі значним рівнем розсіювання експериментальних даних.

**Висновки.** В результаті проведених аеродинамічних досліджень газового клапана можна зробити наступні висновки:

1. Розроблені експериментальна установка і методика дослідження дозволили провести ґрунтовне вивчення аеродинаміки газового клапана, а саме часткове відбиття повітря газовим клапаном.

2. Для оцінки ефективності роботи газового клапана введено поняття коефіцієнта відбиття потоку газовим клапаном, що характеризує здатність газового клапана частково відбивати потік газу і тим самим за рахунок перерозподілу газу між газовими клапанами розподільника формувати рівномірний профіль швидкості. Чим більший коефіцієнт відбиття потоку газовим клапаном, тим більша здатність розподільника до формування рівномірного профілю швидкості і, навпаки, чим менший коефіцієнт відбиття потоку газовим клапаном, тим менша здатність розподільника до формування рівномірного профілю швидкості.

3. Найбільший коефіцієнт відбиття потоку газовим клапаном спостерігається в досить вузькому діапазоні відносних відстаней короткого дифузора від зрізу трубки, що дорівнює 0,75-2,2 її діаметрам.

4. Збільшення ступеня розширення короткого дифузора в газовому клапані призводить до стрибкоподібного зростання коефіцієнта відбиття потоку газовим клапаном, а вплив відносної довжини і кута розширення несуттєво. При цьому у всіх випадках з ростом числа Рейнольдса спостерігається зменшення за ступеневою залежністю коефіцієнта відбиття потоку газовим клапаном.

5. Рекомендується при конструюванні газового клапана розміщувати в ньому кількість коротких дифузорів не більше трьох, але не менше двох, при цьому направляючі отворів коротких дифузорів повинні утворювати конфузори, що відповідає винаходу [4].

6. Отримані узагальнені експериментальні дані по аеродинаміці газового клапана забезпечать надійне проектування конструкцій розподільників газу для промислових апаратів.

## Література

1. Идельчик И.Е. Аэродинамика промышленных аппаратов. – М.: Энергия, 1964. – 287 с.
2. Розен А.М. Масштабный переход в химической технологии: разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования / Розен А.М. и др. – М.: Химия, 1980. – 320 с.
3. Москалик В.М., Копанев Д.Ю., Савицький М.О., Андрищенко С.В. Вплив розподілу потоків у апаратах на їх тепло- та масообмінну ефективність. «Технологія – 2019»: матеріали XXII Міжнародн. науково-техн. конф., м. Сєверодонецьк, 26–27 квітня 2019 р. / СНУ ім. В. Даля. 2019. Ч. I. С. 192–193.
4. Патент України 78789 U, МКИ B01D 3/04, B01D 3/16, B01D 3/32, B01D 53/14, B01F 3/02, B01F 3/04. Пристрій для однорідного розподілу пари (газу) // В.М. Москалик. – № u201213717; Заявл. 30.11.2012; Опубл. 25.03.2013. Бюл. № 6. – 5 с.
5. Москалик В.М., Карпюк Л.В., Табунщиков В.Г. Экспериментальное определение коэффициента гидравлического сопротивления короткого диффузора. Подготовка к эксперименту / Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – Сєверодонецьк. – 2018 – № 7 (248). – С. 56-59.
6. Москалик В.М., Карпюк Л.В., Табунщиков В.Г. Экспериментальное определение коэффициента гидравлического сопротивления короткого диффузора. Результаты эксперимента / Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – Сєверодонецьк. – 2019 – № 7 (255). – С. 55-59.

## References

1. Idelchik I.E., Aerodinamika promyishlennykh apparatov. Energiya, Moscow, 1964. 287 p.
2. Rozen A.M. Masshtabnyy perehod v himicheskoy tehnologii: razrabotka promyishlennykh apparatov metodom gidrodinamicheskogo modelirovaniya. Khimiya, Moscow, 1980. 320 p.
3. Moskalyk V.M., Kopanев D.Y., Savitskiy M.O., Andryuschenko S.V. Vpliv rozpodilu potokiv u aparatah na yih teplo- ta masoobminnu efektyvnist. «Tehnologiya-2019», XXII International scientific-technical conference. Ukraine, Severodonetsk, 2019, Part I, pp. 192-193.
4. Moskalyk V.M. Pristriy dlya odnoridnogo rozpodilu pary (gazu). Patent Ukraine, no. 78789, 2013.
5. Moskalyk V.M., Karpuyuk L.V., Tabunschikov V.G. Eksperymentalnoe opredelenie koeffitsienta gidravlicheskogo soprotivleniya korotkogo diffuzora. Podgotovka k eksperimentu. Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukraine National University, 2018, no. 7 (248), pp. 56-59.
6. Moskalyk V.M., Karpuyuk L.V., Tabunschikov V.G. Eksperymentalnoe opredelenie koeffitsienta gidravlicheskogo soprotivleniya korotkogo diffuzora. Rezultaty eksperimenta. Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukraine National University, 2019, no. 7 (255), pp. 55-59.

**Москалик В. М., Карпюк Л. В., Табунщиков В. Г., Созонтов В.И. Некоторые аэродинамические характеристики газового клапана.**

Разработанный на основе синергетического подхода новый газовый распределитель позволяет создать равномерный профиль скорости в промышленном аппарате в широком диапазоне его работы. Основным элементом газового распределителя служит газовый клапан – трубка с размещенными в ней короткими диффузорами. Принцип работы газового клапана основан на его способности частично отражать набегающий поток газа. Разработаны экспериментальная установка и методика исследования аэродинамики газового клапана, что дало возможность провести обстоятельное изучение частичного отражения воздуха газовым клапаном. Для оценки эффективности работы газового клапана введено понятие коэффициента отражения потока газовым клапаном, характеризующего способность газового клапана частично отражать поток газа и тем самым за счет перераспределения газа между газовыми клапанами распределителя формировать равномерный профиль скорости. Чем больший коэффициент отражения потока газовым клапаном, тем большая способность распределителя к формированию равномерного профиля скорости и, наоборот, чем меньший коэффициент отражения потока газовым клапаном, тем меньшая способность распределителя к формированию равномерного профиля скорости. Установлено, что наибольший коэффициент отражения потока газовым клапаном наблюдается в достаточно узком диапазоне относительных расстояний короткого диффузора от среза трубки, равном 0,75-2,2 ее диаметрам. Выявлено, что увеличение степени расширения короткого диффузора в газовом клапане приводит к скачкообразному возрастанию коэффициента отражения потока газовым клапаном, а влияние относительной длины и угла расширения незначительно. При этом во всех случаях с ростом числа Рейнольдса наблюдается уменьшение по степенной зависимости коэффициента отражения потока газовым клапаном. Рекомендуется при конструировании газового клапана размещать в нем количество коротких диффузоров не более трех, но не менее двух, при этом направляющие отверстия коротких диффузоров должны образовывать конфузор, что соответствует изобретению. Полученные обобщенные экспериментальные данные по аэродинамике газового клапана обеспечат надежное проектирование конструкций распределителей газа для промышленных аппаратов.

**Ключевые слова:** аэродинамика, газовый клапан, короткий диффузор, скорость газа, распределитель газа.

**Moskalyk V.M., Karpyuk L.V., Tabunshchikov V.G., Sozontov V.G. Some aerodynamic characteristics of a gas valve.**

Developed on the basis of synergetic approach a new gas distributor allows to create uniform velocity profile in an industrial unit in a wide range of his work. The main element of the gas distributor is gas valve. It is a tube placed in her short diffusers. The principle of operation of the gas valve is based on its ability to partially reflect the incoming gas flow. The experimental apparatus and methodology of the study of aerodynamics of gas valve are developed. This gave the opportunity to conduct a thorough study of the partial reflection of the air of the gas valve. To assess the effectiveness of operation of the gas valve, the concept of the reflection coefficient of the gas flow valve was introduced. It characterizes the ability of the gas valve to partially reflect the flow of gas and thus due to the redistribution of gas between the gas valve of the dispenser to form a uniform velocity profile. The greater the reflection coefficient of the gas flow valve, the greater the ability of the distributor to the formation of a uniform velocity profile and, on the contrary, the smaller the reflection coefficient of the gas flow valve, the less the ability of the distributor to the formation of a uniform velocity profile. It was stated that the greatest reflectance flow gas valve is in a narrow range relative short distance of the diffuser from the outlet of the tube. This is 0.75 and 2.2 of its diameters. It is revealed that the increase in the degree of extension of the short diffuser of the gas valve leads to an abrupt increasing of the reflection coefficient of the gas flow valve, and the influence of the relative length and angle of expansion is negligible. In all cases with increasing Reynolds number, it is observed a decrease of the power dependence of the reflection coefficient of the gas flow valve. It is recommended that when designing the gas valve to place a number of short diffusers not more than three, but not less than two, while the guide holes of the short diffusers should form a confuser, which corresponds to the invention. Obtained generalized experimental data on the aerodynamics of the gas valve will ensure a reliable design of gas distributors for industrial vehicles.

**Keywords:** aerodynamics, gas valve, short diffuser, the gas velocity, the gas dispenser.

**Москалик Валерій Михайлович** – к.т.н., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки СХУ імені В. Даля.

**Карпюк Людмила Вікторівна** – старший викладач кафедри машинобудування та прикладної механіки СХУ імені В. Даля.

**Табунщиков Володимир Георгійович** – старший викладач кафедри машинобудування та прикладної механіки СХУ імені В. Даля.

**Созонтов Віктор Гнатович** – д.т.н., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки СХУ імені В. Даля.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-264-8-27-33>

UDC 537.312.62

## SENSITIVITY OF SUPERCONDUCTING QUANTUM INTERFEROMETERS TO ROTATIONAL MOTIONS

Dovhopoly A.S., Tokalin O.O., Biloborodov O.O.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ НАДПРОВІДНИХ КВАНТОВИХ ІНТЕРФЕРОМЕТРІВ ДО ОБЕРТАЛЬНИХ РУХІВ

Довгополий А.С., Токалін О.О., Білобородов О.О.

*Based on the principle of equivalence of the general theory of relativity and the definition of the non-Euclidean metric of space in a non-inertial frame of reference associated with rotation, a geometric (topological) phase is found that occurs when traversing any closed loop. This approach made it possible to establish a deep physical analogy between various wave effects (both classical and quantum) in closed waveguides that arise under the conditions of their rotation. Due to the coherence of the wave function of spinless charge carriers (Cooper pairs of conduction electrons with oppositely directed spins) in superconductors in the ground quantum state (superconducting state), the appearance of a geometric phase in closed loops under rotation conditions can lead to interference effects in the presence of weak bonds in the loop. To register interference effects, it was proposed to use superconducting quantum interferometers placed in the electric field of a cylindrical or spherical capacitor. In accordance with the general theory of the geometric phase of rotation, the study obtained the basic relations between the geometric phase of rotation and the phase of the wave function induced by an external magnetic field, and an estimate of their values was obtained for acceptable values of the angular velocity of rotation, dimensions of superconducting quantum interferometers, and voltages on the capacitor. The errors in measuring the magnetic flux during the rotation of the measuring complex are determined. Taking into account the dependence of the magnitude of the geometric phase of rotation on the voltage across the capacitor and the size of the superconducting quantum interferometers, and also taking into account the specific range of angular velocities of rotation, the sensitivity of superconducting quantum interferometers to the angular velocity can be regulated by a rational choice of these parameters. Based on the results obtained, a new method for measuring magnetic fields was proposed using two superconducting quantum interferometers with different values of areas bounded by closed contours under conditions of rotational movements, which makes it possible to compensate for the disturbing influence of rotations on magnetic measurements, as well as to simultaneously determine the magnetic induction and angular velocity of rotation.*

**Keywords:** superconductivity, superconducting quantum interferometer, field measurement, measurement error.

### 1 Introduction

The need to study the magnetic phenomena of the ionosphere, anomalous manifestations of the Earth's magnetic field, geological exploration of minerals, as well as the solution of humanitarian demining tasks require the use of highly sensitive instruments to measure magnetic fields [1-9]. Given the scope of such measurements, they are usually carried out by installing highly sensitive measuring instruments on artificial satellites, airplanes, drones, watercraft and ground-based robotic systems. Currently, the most sensitive devices to magnetic fields are superconducting quantum interferometers (SQUIDs), which are closed circuits of a superconductor, separated by elements that create weak connections between individual parts of the circuit. Such elements include Josephson tunnel junctions or bridges [10, 11]. The work of SQUIDs is based on two main quantum effects in superconductors. This is the effect of quantizing the magnetic flux in closed loops and the dependence of the nondissipative current through weak coupling on the phase difference of the wave functions (WF) superconducting charge carriers on the banks, connected by a weak bond. WF interference is possible due to the fact that charge carriers in the superconducting state are bound conduction electrons with oppositely directed spins (Cooper pairs), which are all in the ground state and, as a result, represent the so-called Bose condensate, which has one common for all spinless carriers WF, at least within the coherence length.

Taking into account the need to ensure high accuracy of measurements of magnetic fields using SQUIDs under disturbance conditions, an urgent task is to study the effect of rotational disturbances on the adequacy and accuracy of measurement results using SQUIDs, as well as to solve the problem of eliminating or compensating for errors in such measurements.

### 2 Article purpose

The purpose of this work is to study the effect of rotation on the operation of the SQUID in the mode of

measuring the external magnetic field, as well as the possibilities of compensating for the measurement errors induced by rotation.

### 3 Results

The operation of interferometers is based on the use of coherent waves, the amplitudes of which at a selected location are added or subtracted depending on the phase difference of the interfering waves. The phase difference of counterpropagating waves can be obtained by different methods. In the case of closed waveguide contours, their rotation in the plane of the contour leads to the appearance of a phase difference of counterpropagating waves. Quantum Optical Gyrometers (KOG) work on this principle. A similar phase shift of the wave function is inherent in quantum systems, which are described using the Hamilton operator (Hamiltonian), which depends on the set of parameters  $\hat{H}(x^i)$  with cyclic adiabatic evolution in the space of these parameters  $x^i$  along a closed loop, which does not change the quantum state of the system. It was called the geometric (or topological) phase [12, 13] and can be obtained in the form of an integral over a closed contour  $C$ , which corresponds to the evolution of the system, or, in accordance with Stokes' theorem, as the rotor flux of the gauge potential through a bounded contour  $C$  surface  $S_C$  in parameter space  $x^i$ :

$$\Delta\theta_C = \frac{1}{\hbar} \oint_C A_i dx^i = \frac{1}{\hbar} \iint_{S_C} \left( \frac{\partial A_j}{\partial x^i} - \frac{\partial A_i}{\partial x^j} \right) d\sigma^{ij}, \quad (1)$$

where  $\hbar = h/2\pi$  is the reduced Planck constant or quantum of action,  $A_i = i\hbar(\psi; \vec{\nabla}_x \psi)$  is the wavefunction-induced  $\psi(x^i)$  calibration potential,  $\vec{\nabla}_x \psi$  is the WF gradient in parameter space  $x^i$ ,  $S_C$  is an any stretched over the contour  $C$  surface, and  $d\sigma^{ij}$  is the tensor element of this surface. In formula (1) and subsequent expressions, in accordance with the generally accepted in the general relativity (GR) and in the theory of fields in non-Euclidean spaces, abbreviations over the coinciding upper and lower indices mean summation. Due to gauge invariance, the geometric WF phase thus constructed does not depend on the choice of the proper WFs of the Hamiltonian  $\hat{H}(x^i)$  and is determined only by the anholonomic character of the parameter space  $x^i$ . In the case of rotation, ordinary three-dimensional space, which is associated with the rotating frame of reference, possesses anholonomicity. Therefore, this approach provides a simple physical interpretation of various effects of rotation, such as the Sagnac effect in optics or the "effect of inertia of standing acoustic waves" in solid-state wave gyroscopes [14, 15]. The theoretical foundations of the manifestation of the geometric phase of the WF for charged spinless particles in a rotating frame of reference in the presence of an external electromag-

netic field are described in [16]. It was also proposed there to use superconducting quantum interferometers (SQUIDs) to register the interference of the WF of superconducting charge carriers.

As is well known [17], in accordance with the equivalence principle of general relativity, rotation in a related non-inertial frame of reference can be considered as a gravitational pseudo-field. Symmetric 4-dimensional metric space-time tensor (abbreviated as 4-tensor)  $g_{ij}$  in such a pseudo-field has nonzero off-diagonal components  $g_{0\alpha} = g_{\alpha 0}$ , which can be described in the form of three-dimensional vectors:

$$g_{0\alpha} = -\beta_\alpha, \quad \vec{\beta} = \frac{1}{c} \vec{\Omega} \times \vec{r}, \quad (2)$$

where the indices denoted by Greek letters  $\alpha=1,2,3$ , spatial components are indicated,  $c$  is the speed of light,  $\vec{\Omega}$  is the axial vector of angular velocity of rotation,  $\vec{r}$  is the radius vector, and the sign  $\times$  vector multiplication is denoted. Time diagonal tensor component  $g_{ij}$

$g_{00} = \sqrt{1-\beta^2}$  is a scalar.

Accordingly, the interval in a non-inertial reference system, which has the form of a quadratic form of the differentials of spatial and temporal coordinates in a four-dimensional space with the metric  $g_{ij}$  has the following form:

$$ds^2 = g_{ij} dx^i dx^j = (1-\beta^2)(cdt)^2 - 2\beta_\alpha dx^\alpha cdt - dx_\alpha dx^\alpha \quad (3)$$

and contains bilinear terms due to the off-diagonal components of the tensor. The geometry of a three-dimensional rotating space turns out to be non-Euclidean and is determined by the metric tensor:

$$\gamma_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta} + g_{00} G_\alpha G_\beta = \delta_{\alpha\beta} + \sqrt{1-\beta^2} G_\alpha G_\beta, \quad (4)$$

where  $G_\alpha = -g_{0\alpha}/g_{00} = \beta_\alpha/\sqrt{1-\beta^2}$  are covariant components of a three-dimensional vector  $\vec{G}$  [17],  $\delta_{\alpha\beta}$  is the three-dimensional unit Kronecker tensor. Due to non-zero off-diagonal components, the space with the indicated metric tensor turns out to be nonholonomic. And therefore the integral over any closed contour that does not lie in a parallel vector  $\vec{\Omega}$  plane is nonzero. Accurate to a dimensional factor [ $k = \omega/v_F$ ], corresponding to the wave vector length of a plane wave with frequency  $\omega = 2\pi f$  and phase velocity  $v_F$ , this integral is equal to the geometric phase:

$$\Delta\theta_R = \oint_C G_\alpha dx^\alpha = \iint_{S_C} \left( \frac{\partial G_\beta}{\partial x^\alpha} - \frac{\partial G_\alpha}{\partial x^\beta} \right) d\sigma^{\alpha\beta}. \quad (5)$$

In the nonrelativistic case ( $\beta^2 \ll 1$ ) rotor vector  $\vec{\beta}$ , which appears in the integral over the surface in (5) is equal to the ratio  $2\vec{\Omega}/c$ , and therefore the geometric phase is proportional to  $(2\Omega/c)S_{\perp}$ , where  $S_{\perp}$  is the area covered by a closed loop projection  $C$  on a plane perpendicular to the angular velocity vector  $\vec{\Omega}$ . In the case when the interference of counterpropagating light waves in a ring laser is considered, expression (5) with the above dimensional factor at  $v_F = c$  describes the famous Sagnac effect [13].

In the case of rotation of quantum charged particles and an external electromagnetic field, there is also a complete analogy with the geometric phase of wave functions. In this case, it is expedient to consider quantum charge carriers in a superconductor as charged particles, since in the superconducting state they are spinless Cooper pairs of conduction electrons (that is, bound pairs of conduction electrons with oppositely directed spins). In this state, they are bosons, and their ensemble is a Bose condensate, which is characterized by one wave function common to all carriers [11]:

$$\psi = \sqrt{n_s/2} \exp(i\theta), \tag{6}$$

whose amplitude follows from the condition for normalizing the WF, where  $n_s$  is the concentration of conduction electrons forming Cooper pairs. As a consequence, the WF phase  $\theta$  is a macroscopic parameter of a superconductor, at least within the region limited by the coherence length. This property of the wave function of charge carriers in superconductors underlies the operation of superconducting quantum interferometers.

Action for a spinless charged particle with a charge  $q$  in an electromagnetic field with a 4-potential (four-dimensional potential in space-time)  $A_i = (\phi; -\vec{A})$ , in which  $\phi$  is the scalar potential of the field (or the usual potential of the electric component of the field) corresponding to the time coordinate  $x^0 = x_0 = ct$ ,  $\vec{A}$  – three-dimensional vector field potential ( $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$ , where  $\vec{B}$  is the magnetic induction of the field) corresponding to the spatial coordinates  $x^\alpha = -x_\alpha$  ( $\alpha = 1, 2, 3$ ), for a rotating space with an off-diagonal metric tensor  $\gamma_{\alpha\beta}$  can be represented as an integral:

$$S = \int \left( -mc ds - \frac{q}{c} A_i dx^i \right) = \int \left[ -mc^2 \times \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} + \frac{q}{c} (A_\alpha - \phi G_\alpha) v^\alpha - \frac{q\phi}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right] dt. \tag{7}$$

Here, the transformation of the 4-potential of the electromagnetic field is taken into account during the transition from inertial to non-inertial rotating frame of

reference [17]. Note that the integrand on the right-hand side of (7) is the Lagrange function, in which the product of the scalar potential by the vector  $\vec{G}$ , defined above plays the role of an additional vector potential due to rotation. Here  $v^\alpha = \partial x^\alpha / \partial t$  are contravariant components of the particle velocity in a rotating frame of reference, that is, in non-Euclidean space with a metric  $\gamma_{\alpha\beta}$  and  $v^2 = \gamma_{\alpha\beta} v^\alpha v^\beta$  is its square. Differentiating the Lagrange function  $L$  by the velocity components, we obtain the generalized momentum of the particle:

$$\vec{P} = \frac{\partial L}{\partial \vec{v}} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} + \frac{q}{c} (\vec{A} - \phi \vec{G}). \tag{8}$$

Similarly, calculating the Hamilton function and expressing it in terms of the generalized momentum, we obtain:

$$H(\vec{P}) = \vec{v} \cdot \frac{\partial L}{\partial \vec{v}} - L = \frac{q\phi}{\sqrt{1 - \beta^2}} + \sqrt{(mc^2)^2 + \left( \vec{P} - \frac{q}{c} \vec{A} + \frac{q}{c} \phi \vec{G} \right)^2 c^2}. \tag{9}$$

Note that in calculations  $L$ ,  $\vec{P}$  and  $H(\vec{P})$  we used the value of the interval not in the form (3), but in the form:

$$ds = \sqrt{1 - \gamma_{\alpha\beta} \frac{\partial x^\alpha}{\partial \tau} \frac{\partial x^\beta}{\partial \tau}} c d\tau,$$

since, by virtue of the principle of equivalence, the difference between the relative velocities of particles from their true values is properly taken into account by the non-Euclidean metric  $\gamma_{\alpha\beta}$ . The change in the 4-potential of the electromagnetic field under rotation conditions also manifests itself in the form of changes in the strengths of the electromagnetic field, which can be represented as effective induction vectors of the form:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \frac{\vec{E}}{\sqrt{1 - \beta^2}} - \vec{G} \times \vec{H}, \\ \vec{B} &= \frac{\vec{H}}{\sqrt{1 - \beta^2}} + \vec{G} \times \vec{E}, \end{aligned} \tag{10}$$

where  $\vec{E}$  and  $\vec{H}$  are intensity of the electric and magnetic components of the field in the inertial reference frame,  $\vec{D}$  and  $\vec{B}$  are electric and magnetic field inductions.

From the form of the obtained expressions (8) and (9) it follows that in the quantum description of spinless particles into the Hamilton operator (which is obtained from the Hamilton function (9) by replacing the general-

ized momentum with its operator) instead of the potential  $A_i = (\phi; -\vec{A})$  must include effective capacity:

$$A_i^{eff} = \left( \frac{\phi}{\sqrt{1-\beta^2}}; -\vec{A} + \phi\vec{G} \right), \quad (11)$$

which reflects the influence of the "gravitational pseudofield" induced by the rotation of the reference frame. As a result, considering the effective potential as a gauge potential in expression (1), we find that when going around a closed loop in a space with metric  $\gamma_{\alpha\beta}$  in the presence of an external electromagnetic field, the wave function of a spinless quantum particle acquires an additional phase in the general case that is not equal to  $2\pi$ :

$$\begin{aligned} \Delta\theta_C &= \frac{q}{\hbar c} \left( \oint_C A_\alpha dx^\alpha - \oint_C \phi G_\alpha dx^\alpha \right) = \Delta\theta_A - \\ -\Delta\theta_R &= \frac{q}{\hbar c} \left[ \Phi_{S_\perp}(\vec{A}) - \iint_{S_C} \text{rot} \left( \frac{\phi\vec{\beta}}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) d\vec{S} \right], \end{aligned} \quad (12)$$

where  $\Phi_{S_\perp}(\vec{A}) = \iint_{S_C} \text{rot} \vec{A} \cdot d\vec{S}$  is the flux of magnetic induction (magnetic flux) through a surface  $S_C$ , and the integrand:

$$\begin{aligned} \text{rot} \left( \frac{\phi\vec{\beta}}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) &= \vec{\nabla} \left( \frac{\phi}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) \times \vec{\beta} + \\ \frac{\phi}{\sqrt{1-\beta^2}} \text{rot} \vec{\beta} &= \left( \frac{\vec{\nabla}\phi}{\sqrt{1-\beta^2}} - \frac{\phi\vec{\beta}}{(\sqrt{1-\beta^2})^3} \times \frac{\vec{\Omega}}{c} \right) \times \\ &\times \vec{\beta} + 2 \frac{\phi\vec{\Omega}}{c\sqrt{1-\beta^2}}. \end{aligned}$$

Considering that  $q\phi = E$  is the energy of a charged particle in an electric field and  $E/\hbar = \omega$ , dimensional factor corresponding to the factor  $\omega/c$ , should be the same as in formula (12). In the nonrelativistic case ( $\beta^2 \ll 1$ ) up to terms of the first order of smallness, expression (12) after simple transformations is reduced to the form:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_C &= \Delta\theta_A - \Delta\theta_R = \\ &= \frac{q}{\hbar c} \left[ \Phi_{S_C}(\vec{A}) - \iint_{S_C} \left( 2\phi \frac{\vec{\Omega}}{c} - \vec{\beta} \times \vec{\nabla}\phi \right) \cdot d\vec{S} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Moreover, in the case of an axisymmetric or centrally symmetric scalar potential  $\phi$  the second term of the integrand in (13) is equal to zero due to the parallelism of the vectors  $\vec{\nabla}\phi$  and  $\vec{r}$ . The first term in expressions (12) and (13) corresponds to a change in the WF phase in a magnetic field, which manifests itself in the Aharonov-Bohm effect [18] or in superconducting circuits covering any cavity [11], and the second term corresponds directly to the geometric phase rotation, which takes place in the absence of an external magnetic field. It is clear that in the case of a superconductor in the ground state  $q = 2e$ , where  $e$  is elementary charge. The dimensional factor in front of the integral in expression (12), proceeding directly from the definition of the magnetic flux quantum, can be represented as:

$$\frac{q}{\hbar c} = \pi \frac{q}{e} \Phi_0^{-1}, \quad (14)$$

where  $\Phi_0 = \pi\hbar c/e = 2,068 \cdot 10^{-7}$  Mx (CGS) or  $\Phi_0 = \pi\hbar/e = 2,068 \cdot 10^{-15}$  Wb (SI) is the magnetic flux quantum. The dimension of this factor, based on the dimension of the quantum of action  $[\hbar] = [E] \cdot [t] = [q] \cdot [U] \cdot [t]$ , where  $[E]$  and  $[t]$  are the dimensions of energy and time, respectively,  $[q]$  and  $[U]$  are dimensions of charge and potential, can be represented as  $[q/\hbar c] = [U]^{-1} \cdot [t]^{-1}$ . Considering that the dimension of the ratio  $[\Omega/c] = [t]^{-1}$ , the WF phases in expressions (12) and (13) turn out to be dimensionless.

As already described above, the interference of the WF of charge carriers can be observed in SQUIDs consisting of two parts of a closed superconducting circuit with weak bonds at their junctions, for example, by Josephson tunnel junctions. The dissipative current in a loop closed in this way is determined by the phase difference of the WF of superconducting charge carriers on both banks of the transition. To create the phase difference of the WF due to rotation, according to (13), the SQUID must be placed in an external electric field, for example, the field of a charged cylindrical capacitor (Fig. 1), where  $d_{in}$  is the inner electrode diameter,  $D_{ex}$  is the outer electrode diameter,  $\rho$  is the SQUID diameter.

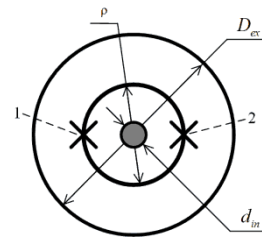


Fig. 1. Layout of a SQUID with two Josephson junctions (1 and 2) in a cylindrical charged capacitor

In this case, the calculation of the integral in (13) is greatly simplified. The dependence of the scalar potential on the distance from the axis of symmetry of the capacitor has the form [17]:

$$\phi(r) = U \frac{\ln 2r - \ln d_{in}}{\ln D_{ex} - \ln d_{in}}, \quad (15)$$

where  $U$  is the voltage applied to the electrodes. Substituting (15) into (13) and assuming that the SQUID has the shape of a ring and is centered with the capacitor axis so that their symmetry axes coincide, we obtain:

$$\begin{aligned} \iint_{S_c} 2\phi(r) \frac{\vec{\Omega}}{c} \cdot d\vec{S} &= 2 \frac{\ln(D_{SQID}/d_{in})}{\ln(D_{ex}/d_{in})} \times \\ &\times \left[ 1 - \frac{1 - s_{in}/S_{SQID}}{\ln(D_{SQID}/d_{in})} \right] U \frac{\Omega}{c} \times \\ &\times S_{SQID} \cos \alpha = KU \frac{\Omega}{c} S_{\perp}, \end{aligned} \quad (16)$$

where  $D_{SQID}$  is the SQUID diameter,  $S_{SQID}$  is the area covered by the SQUID contour,  $s_{in}$  is the cross-sectional area of the inner electrode,  $S_{\perp} = S_{SQID} \cos \alpha$  is the area covered by the projection of the SQUID contour perpendicular to the vector  $\vec{\Omega}$  plane,  $\alpha$  is the angle between the axis of symmetry of the capacitor and the vector  $\vec{\Omega}$ ,  $K$  is the coefficient depending only on the ratio of the sizes of the elements of the capacitor and the SQUID, in the limit equal to 2:

$$K = 2 \frac{\ln(D_{SQID}/d_{in})}{\ln(D_{ex}/d_{in})} \left[ 1 - \frac{1 - s_{in}/S_{SQID}}{\ln(D_{SQID}/d_{in})} \right]. \quad (17)$$

Thus, the total WF phase taking into account formula (16) and the fact that for Cooper pairs  $q = 2e$  equals:

$$\Delta\theta = 2\pi \left[ \frac{\Phi_{S_{\perp}}(\vec{A})}{\Phi_0} - K \frac{U\Omega S_{\perp}}{c\Phi_0} \right], \quad (18)$$

where coefficient  $1 \leq K \leq 2$  is determined only by the shape and relative dimensions of the capacitor electrodes, and in the case of a thin inner electrode ( $d_{in} \ll D_{SQID} \leq D_{ex}$ ) very weakly depends on the ratio of the logarithms of the sizes of the SQUID and the external electrode of the capacitor:

$$\begin{aligned} K &= 2 \frac{\ln(D_{SQID}/d_{in})}{\ln(D_{ex}/d_{in})} = \\ &= 2 \left[ 1 - \frac{\ln(D_{ex}/D_{SQID})}{\ln(D_{ex}/d_{in})} \right] \leq 2. \end{aligned} \quad (19)$$

The results of calculating the dependence of the coefficient  $K$  from the diameter of the inner electrode for a SQUID with an area  $1 \text{ cm}^2$  for different ratios of the diameters of the outer electrode and SQUID are shown at Fig. 2.

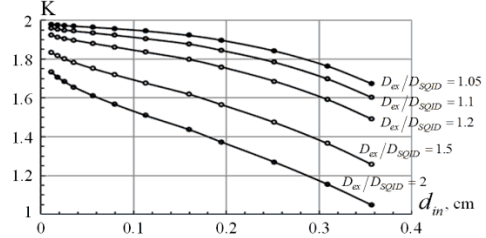


Fig. 2. Dependency ratio  $K$  (17) for a cylindrical capacitor from the diameter of the inner electrode  $d_{in}$  at different ratios  $D_{ex}/D_{SQID}$  diameter of the outer electrode and SQUID

From the general formula (18), it is possible to determine the error in measuring the magnetic flux using a SQUID when the measuring complex rotates in the form:

$$\Delta\Phi_S(\vec{A}) = \Phi_0 \Delta\theta_R. \quad (20)$$

Estimates of the magnitude of the measurement error of the magnetic flux at a relatively low rotation speed  $\Omega = 0.1 \text{ deg/s}$ , calculated (at  $K = 1$ ) for various values of the area covered by the SQUID circuit, and various values of the voltage across the capacitor, as well as the values of the geometric phases, are presented in the Table 1.

Table 1

**Magnetic flux measurement error  $\Delta\Phi_S$  with different contour areas  $S_{SQID}$ , capacitor voltages  $U$  and phases  $\Delta\theta_R$**

$U$ (V)	$S_{SQID}$ (cm <sup>2</sup> )				$\Delta\theta_R$	
	0.1	0.3	1.0	10.0	$\Delta\theta_R$ (deg)	$\Delta\Phi_S$ (Mx)
1	$2.5 \cdot 10^{-6}$	$7.4 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$\Delta\theta_R$ (deg)	$\Delta\Phi_S$ (Mx)
	$5.1 \cdot 10^{-10}$	$1.5 \cdot 10^{-9}$	$5.1 \cdot 10^{-9}$	$5.1 \cdot 10^{-8}$	$\Delta\theta_R$ (deg)	$\Delta\Phi_S$ (Mx)
10	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$7.4 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$\Delta\theta_R$ (deg)	$\Delta\Phi_S$ (Mx)
	$5.1 \cdot 10^{-9}$	$1.5 \cdot 10^{-8}$	$5.1 \cdot 10^{-8}$	$5.1 \cdot 10^{-7}$	$\Delta\theta_R$ (deg)	$\Delta\Phi_S$ (Mx)
100	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$7.4 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-2}$	$\Delta\theta_R$ (deg)	$\Delta\Phi_S$ (Mx)
	$5.1 \cdot 10^{-8}$	$1.5 \cdot 10^{-7}$	$5.1 \cdot 10^{-7}$	$5.1 \cdot 10^{-6}$	$\Delta\theta_R$ (deg)	$\Delta\Phi_S$ (Mx)

Taking into account the dependence of the value of the geometric phase of rotation on the voltage across the capacitor and the size of the SQUID and taking into account the specific range of angular velocities of rotation, the sensitivity of the SQUID to the angular velocity can be adjusted by a rational choice of these parameters.

Proceeding from the fact that the sensitivity of a SQUID to magnetic flux and rotational movements can be adjusted, we will consider the possibility of a circuit solution for constructing rotation-invariant instruments for measuring magnetic fluxes based on SQUIDs. As is known [11], the nondissipative current in the tunnel junction of a SQUID is determined by the phase differ-

ence of the WF on its banks and can usually be represented in the form:

$$I = I_0 \sin \Delta\theta, \quad (21)$$

where  $I_0$  is the critical junction current, when exceeded, a potential difference arises at the junction. With no hysteresis:

$$\Delta\theta = \arcsin \frac{I}{I_0}. \quad (22)$$

From equations (18) and (22), considering that  $\Phi_S(\vec{A}) = B_\Omega S_\perp$ , where  $B_\Omega$  is the mean over the area of the SQUID value of the projection of the magnetic induction vector onto the axis of rotation, we obtain:

$$K_1 B_\Omega - K_2 \Omega = \frac{\Delta\theta}{2\pi}, \quad (23)$$

where  $K_1 = IS_{SQUID}/\Phi_0$  and  $K_2 = KUS_{SQUID}/c\Phi_0$  are dimensional scale factors that can be determined experimentally at the stage of manufacturing and calibration of the SQUID.

By measuring the magnetic flux and angular velocity of rotation with two SQUIDs with different areas, we obtain different phase values  $\Delta\theta_1$  and  $\Delta\theta_2$ , which correspond to the same values of magnetic flux and angular velocity. This can be represented as a system of equations for  $B_\Omega$  and  $\Omega$ :

$$\begin{cases} K_{11} B_\Omega - K_{21} \Omega = \frac{\Delta\theta_1}{2\pi}, \\ K_{12} B_\Omega - K_{22} \Omega = \frac{\Delta\theta_2}{2\pi}, \end{cases} \quad (24)$$

where  $K_{11}$  and  $K_{22}$  are scale factors for the first SQUID,  $K_{12}$  and  $K_{21}$  are the same for the second SQUID. Solution for linear system of equations (24) with determinant  $\Delta = -(K_{11}K_{22} - K_{12}K_{21})$  known:

$$\left. \begin{aligned} B_\Omega &= \frac{K_{22}\Delta\theta_1 - K_{21}\Delta\theta_2}{2\pi\Delta}, \\ \Omega &= \frac{K_{11}\Delta\theta_2 - K_{12}\Delta\theta_1}{2\pi\Delta}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Thus, the use of two SQUIDs, which can be placed one above the other in one capacitor, eliminates the error in measuring the magnetic flux caused by the rotation of the measuring device and simultaneously determines the angular velocity of rotation.

### Conclusions

Theoretical studies of the effect of rotation on the phase of the wave function of spinless charge carriers under superconductivity conditions lead to the following results:

1. A physical analogy has been established between the interference effects of rotation for spinless charge carriers in superconductors and coherent light waves in ring lasers.

2. It is shown that under the conditions of rotation of superconducting quantum interferometers in the presence of an electromagnetic field, the phase difference of the wave functions is the sum of the phases due to the action of the magnetic field and the geometric phase of rotation.

3. Based on the results obtained, a method for measuring the magnetic flux and angular velocity of rotation using two SQUIDs to compensate for the mutual measurement errors is proposed.

### References

1. Marchetti D. et al. Pre-earthquake chain processes detected from ground to satellite altitude in preparation of the 2016-2017 seismic sequence in Central Italy // *Remote Sensing of Environment*, Vol. 229, – 2019, – pp. 93-99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.033>.
2. Marchetti, D. & Akhoozadeh, M. Analysis of Swarm satellite data showing seismo-ionospheric anomalies around the time of the strong Mexico (Mw=8.2) earthquake of 08 September 2017 // *Advances in Space Research*, 2018. – Vol. 62, Iss. 3, 614-623, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.04.043>.
3. V. Korepanov, G. Lizunov. Seismoionospheric coupling and earthquakes forecast probability (EGU, April 13-18, 2008, Vienna, Austria).
4. Monitoring of the seism-electromagnetic Earth background in connection with seismic activity. By Yr. A. Bogdanov, V. N. Shuman, V. N. Pavlovich, V. Kobolev and A. Z. Ganiev // *European Association of Geoscientist & Engineers Source: Conference Proceedings, 9<sup>th</sup> EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, May 2010, DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201402823>.
5. Geophysical exploration method / Burkinysky I., Dovhopoly A. et al. // Patent for invention № 111252. 11.04.2016 bulletin № 7.
6. Method of magnetometric detection of explosive objects / Zvejinsky Stanislav, and Parfencev Igor // *Special equipment and communication [Spectehnika i Sviaz]*, 2008, – no. 2, – pp. 8-17.
7. Military munitions response actions. Engineering Manual // USA army Corps of Engineers – EM 1110-1-4009-15 June 2007. – 346 P.
8. Metal detectors and PPE Catalogue 2007. – Geneva International Center for Humanitarian Demining. Geneva. Feb, 2007. – 2003 P.
9. Military robotics: overview, problems, possible solutions / Morozov A., and Sapaty P. // *Mathematical machines and systems*, no. 2, 2015, – pp. 3-19.
10. On superconductivity and superfluidity (what I have and have not managed to do), as well as on the 'physical minimum' at the beginning of the XXI century (December 8, 2003) / Ginzburg, Vitalii L // *Physics-USpekhi* (2004), Vol. 47, Iss. 11, – pp. 1155-1170. DOI: <http://dx.doi.org/10.1070/PU2004v047n11ABEH001825>.
11. Smidt V. Introduction to the physics of superconductors // Moscow: Moscow Center for Continuous Mathematical Education. 2000. – XIV. 402 P.
12. Berry M. V. // *Proc. Roy. Soc.: A*. 1984. V. 392. P. 45.

13. Topological phases in quantum mechanics and polarization optics / Vinnitsky S., Debrov V. et al. // *Advances in Physical Sciences [Uspehi fizicheskikh nauk]*, 1990. – Vol. 160. Iss. 6, – pp. 1-49.
14. Applied methods of vibration theory / Zhuravlev V., Klimod D. // Moscow: Science [Nauka], 1988. – 328 P.
15. Wave solid state gyroscope. Theory and technology. Monograph / Lunin B., Matveev V., Bessarab M. // Moscow: Radio engineering [Radiotekhnika], 2014. – 176 P.
16. Dovgopolyi A.S., Tokalin O.A. Geometric rotation phase and its observation under quantum interference // *Pisma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. – 1991. Vol. 17. Iss. 5. – pp. 44-48.
17. Theoretical physics: V. 2. Field theory / Landaw L., Livshic E. // Moscow: Fizmatlit, 2003. – 536 P.
18. Feynman Lectures in Physics. V. 6: Electrodynamics / Feiman R., Leiton R., Sands M. // Moscow: World [Mir], 1966. – 343 P.

**Довгополий А.С., Токалін О.О., Білобородов О.О.**  
**Дослідження чутливості надпровідних квантових інтерферометрів до обертальних рухів.**

*На підставі принципу еквівалентності загальної теорії відносності і визначення неевклідової метрики простору в неінерціальній системі відліку, пов'язаної з обертанням, знайдена геометрична (топологічна) фаза, яка виникає при обході будь-якого замкненого контуру. Такий підхід дозволив встановити глибоку фізичну аналогію між різними хвильовими ефектами в замкнених хвилеводах (як класичними, так і квантовими), що виникають в умовах їх обертання. Завдяки когерентності хвильової функції безспінових носіїв заряду (куперовських пар електронів провідності з протилежно спрямованими спінами) в надпровідниках в основному квантовому стані (стані надпровідності), виникнення геометричної фази в замкнених контурах в умовах обертання може призводити до інтерференційних ефектів при наявності слабких зв'язків у контурі. Для реєстрації інтерференційних ефектів було запропоновано використання надпровідних квантових інтерферометрів, поміщених в електричне поле циліндричного або сферичного конденсатора. Відповідно до загальної теорії геометричної фази обертання у дослідженні отримані основні співвідношення між геометричною фазою обертання і фазою хвильової функції, індукованої зовнішнім магнітним полем і отримана оцінка їх значень при прийнятних величинах кутової швидкості обертання, розмірах надпровідних квантових інтерферометрів і напругах на конденсаторі. Визначено помилки вимірювання магнітного потоку при обертанні вимірювального комплексу. З огляду на залежність величини геометричної фази обертання від напруги на конденсаторі і розмірів надпровідних квантових інтерферометрів, а також беручи до уваги конкретний діапазон кутових швидкостей обертання, чутливість надпровідних квантових інтерферометрів до кутової швидкості можна регулювати раціональним вибором цих параметрів. На підставі отриманих результатів запропоновано новий метод вимірювань магнітних полів з використанням двох надпровідних квантових інтерферометрів з різними значеннями обмежених замкнутими контурами площ в умовах обертальних рухів, що дозволяє компенсувати збурюючий вплив обертання на магнітні вимірювання, а також одночасне визначення магнітної індукції і кутової швидкості обертання.*

**Ключові слова:** надпровідність, надпровідний квантовий інтерферометр, вимір поля, похибка вимірювань.

**Довгополий А.С., Токалін О.А., Белобородов О.А.**  
**Исследование чувствительности сверхпроводящих квантовых интерферометров к вращательным движениям.**

*На основании принципа эквивалентности общей теории относительности и определения неевклидовой метрики пространства в неинерциальной системе отсчета, связанной с вращением, найдена геометрическая (топологическая) фаза, возникающая при обходе любого замкнутого контура. Такой подход позволил установить глубокую физическую аналогию между различными волновыми эффектами (как классическими, так и квантовыми) в замкнутых волноводах, возникающими в условиях их вращения. Благодаря когерентности волновой функции безспиновых носителей заряда (куперовских пар электронов проводимости с противоположно направленными спинами) в сверхпроводниках в основном квантовом состоянии (состоянии сверхпроводимости), возникновение геометрической фазы в замкнутых контурах в условиях вращения может приводить к интерференционным эффектам при наличии слабых связей в контуре. Для регистрации интерференционных эффектов было предложено использование сверхпроводящих квантовых интерферометров, помещенных в электрическое поле цилиндрического или сферического конденсатора. В соответствии с общей теорией геометрической фазы вращения в исследовании получены основные соотношения между геометрической фазой вращения и фазой волновой функции, индуцированной внешним магнитным полем и получена оценка их значений при приемлемых величинах угловой скорости вращения, размерах сверхпроводящих квантовых интерферометров и напряжениях на конденсаторе. Определены ошибки измерения магнитного потока при вращении измерительного комплекса. Учитывая зависимость величины геометрической фазы вращения от напряжения на конденсаторе и размеров сверхпроводящих квантовых интерферометров, а также принимая во внимание конкретный диапазон угловых скоростей вращения, чувствительность сверхпроводящих квантовых интерферометров к угловой скорости можно регулировать рациональным выбором этих параметров. На основании полученных результатов предложен новый метод измерений магнитных полей с использованием двух сверхпроводящих квантовых интерферометров с разными значениями ограниченных замкнутыми контурами площадей в условиях вращательных движений, позволяющий компенсировать возмущающее влияние вращений на магнитные измерения, а также одновременное определение магнитной индукции и угловой скорости вращения.*

**Ключевые слова:** сверхпроводимость, сверхпроводящий квантовый интерферометр, измерение поля, погрешность измерений.

**Довгополий Анатолій Степанович** – д.т.н., професор, головний науковий співробітник Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України

**Токалін Олег Олексійович** – к.ф.-м.н., науковий співробітник відділу систем оптичної реєстрації інформації Інституту проблем реєстрації інформації Національної академії наук України

**Білобородов Олег Олександрович** – к.т.н., провідний науковий співробітник Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України, e-mail: 22bredly@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-264-8-34-38>

УДК 621.313: 621.318.122

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ДЕЗИНТЕГРАТОР МНОГОФАКТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА

Грицюк В.Ю., Тимофеева О.А.

## ELECTROMECHANICAL DISINTEGRATOR OF MULTIFACTOR ACTION: MODELING AND EVALUATION

Grytsiuk V.Yu., Tymofieieva O.O.

*Одним из способов, позволяющих осуществлять различные технологические процессы тонкого и сверхтонкого измельчения, является применение электромеханических дезинтеграторов многофакторного действия. Дезинтегратор состоит из двух плоских индукторов с трехфазными обмотками, которые образуют бегущие магнитные поля с противоположным порядком чередования фаз, и рабочей камеры с ферромагнитными рабочими телами, расположенной в межиндукторном зазоре. Множество факторов, позволяющих воздействовать на обрабатываемое вещество с необходимой интенсивностью и в нужном направлении, требует знания физической сущности происходящих в вихревом слое явлений. Для определения силы, действующей на ферромагнитное тело, необходимо рассчитать магнитное поле в рабочей зоне электромеханического дезинтегратора. Интересующая величина определяется путем численного решения полевой задачи с использованием метода конечных элементов. Данный метод позволяет точно описать конфигурацию активной части, а также учесть нелинейность свойств материалов. В работе получены картины распределения векторного магнитного потенциала в активной зоне электромеханического дезинтегратора. Представлены результаты моделирования распределения усилий, действующих на ферромагнитные тела и рабочую электропроводящую камеру. Следствием взаимодействия бегущих магнитных полей индукторов и вихревых токов, протекающих в стенках рабочей камеры, является появление характерных прогибов стенок рабочей камеры в пределах каждого полюсного деления. Расчет подтверждает наличие локализации действующих электромагнитных усилий на стенки электропроводящей камеры в пределах полюсного деления индукторов. Деформацию рабочей камеры вызывают, прежде всего, усилия которые направлены нормально к поверхности стенки камеры. Результаты численного расчета могут быть использованы при выборе геометрических размеров*

*активной части с целью получения заданных рабочих свойств и характеристик.*

**Ключевые слова:** электромеханический дезинтегратор, рабочие ферромагнитные тела, электромагнитные усилия, конечно-элементная модель.

**Введение.** Одним из способов, позволяющих осуществлять различные технологические процессы тонкого и сверхтонкого измельчения, гомогенного перемешивания жидких и твердых порошковых веществ (приготовления эмульсий, суспензий и т.п.), ускорения некоторых химических реакций, является применение принципиально нового класса электро-механических преобразователей энергии – электро-механических дезинтеграторов (ЭМД) многофакторного действия [1, 2].

ЭМД состоит из двух плоских индукторов с трехфазными обмотками, которые образуют бегущие магнитные поля с противоположным порядком чередования фаз, и рабочей камеры с ферромагнитными рабочими телами (ФРТ), расположенной в межиндукторном зазоре. Встречные бегущие поля образуют в пределах каждого полюсного деления индуктора локальные зоны с интенсивным вихревым движением ФРТ (например, игольчатого типа), посредством которых и происходит обработка исходного вещества. Вихревой слой ФРТ может быть создан как при давлении, так и в вакууме, в жидкой, газообразной или гетерогенной среде [3]. Кроме непосредственного механического воздействия ФРТ и самого электромагнитного поля, на обрабатываемое вещество воздействует также ряд сопутствующих эффектов: нагрев, механоактивация, электризация, широкий спектр локальных акустических давлений, а при определенных условиях также кавитация и электролиз (для жидких веществ). В результа-

те такой комплексной обработки многие процессы ускоряются в десятки и сотни раз, а некоторые процессы могут протекать только в ЭМД.

Множество факторов, позволяющих воздействовать на обрабатываемое вещество с необходимой интенсивностью и в нужном направлении, требует, прежде всего, знания физической сущности происходящих в вихревом слое явлений. Несмотря на то, что аппараты с вихревым слоем уже нашли применение в различных отраслях промышленности, сложные физические и механохимические явления, происходящие в вихревом слое, остаются недостаточно изученными. Кроме того, существующие работы [4, 5, 6] посвящены рассмотрению усилий и моментов, возникающих в устройствах, вихревой слой которых создается вращающимся магнитным полем.

**Постановка задачи.** Задачей настоящей работы является моделирование и оценка усилий, возникающих в рабочей зоне ЭМД многофакторного действия.

**Изложение материала и его результаты.** Сложный характер движения ФРТ, большое количество факторов, существенно влияющих на процесс обработки материала, осложняют теоретическое рассмотрение данного вопроса. Траектория немагнитной частицы, движущейся через вихревой слой, объемна и определяется совокупностью многочисленных факторов. Появление воздействующего на ФРТ вращающего момента объясняется следующим образом. В неоднородном магнитном поле на ферромагнитное тело небольших размеров действует сила, которую можно определить по формуле [5]

$$\vec{F} = \vec{f} \cdot V_T = \frac{1}{2} V_T \mu_0 (\mu_r - 1) \text{grad} H^2 \quad (1)$$

где  $\vec{f}$  – плотность пондеромоторных сил, испытываемых ферромагнетиками в магнитном поле;  $V_T$  – область пространства, занятого ферромагнитным телом;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость;  $H$  – модуль напряженности магнитного поля.

Для определения по формуле (1) силы, действующей на ферромагнитное тело, необходимо рассчитать магнитное поле в рабочей зоне ЭМД. Интересующая величина  $H$  определялась путем численного решения полевой задачи с использованием метода конечных элементов. Данный метод позволяет точно описать конфигурацию активной части ЭМД, а также учесть нелинейность свойств материалов.

На рисунке 1 показана расчетная геометрическая модель, построенная с учетом реальных линейных размеров активной зоны экспериментального образца ЭМД.

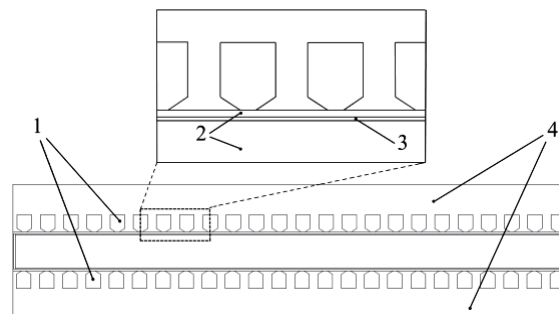


Рис. 1. Расчетная геометрическая модель ЭМД

Основные свойства материалов, задаваемые как исходные данные для каждого расчетного участка, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Свойства материалов расчетных областей

Название расчетного участка	Относительная магнитная проницаемость, $\mu_r$	Удельная электрическая проводимость, $\gamma$ , См/м
1. Обмотка индуктора	1	$5,8 \cdot 10^7$
2. Воздушная область	1	0
3. Рабочая камера	1	$1,12 \cdot 10^7$
4. Магнитопровод индуктора	Кривая намагничивания Ст. 2211	0

На внешних границах расчетной области задается нулевое значение векторного магнитного потенциала (условие Дирихле). На границе раздела сред с различными магнитными свойствами используется условие равенства нормальных к границе составляющих вектора магнитной индукции и касательных составляющих вектора напряженности магнитного поля (условие Неймана).

Результаты расчета в виде картины распределения векторного магнитного потенциала в активной зоне ЭМД (в пределах полюсного деления) представлены на рисунке 2.

На рисунке 3а представлен фрагмент картины распределения векторного магнитного потенциала в активной зоне ЭМД при наличии немагнитной электропроводящей камеры и одного ферромагнитного тела. Распределение усилий (в виде стрелок-векторов), действующих на ФРТ при некоторых мгновенных положениях показано на рисунке 3б.

Важной особенностью работы ЭМД, выявленной в ходе проведения экспериментальных исследований [1] является деформация рабочей электропроводящей камеры. Следствием взаимодействия бегущих магнитных полей индукторов и вихревых токов, протекающих в стенках рабочей камеры (прилегающих к индукторам), является появление характерных прогибов стенок рабочей камеры в пределах каждого полюсного деления. На рисунке 4 представлены кривые, показывающие распределение глубины прогиба по длине одной из стенок рабочей

камеры после 10, 15, и 20 минут работы ЭМД. Из рисунка видно, что после 20 минут работы дезинтегратора глубина прогиба, при толщине стенки камеры 0,8 мм, достигает 10 мм.

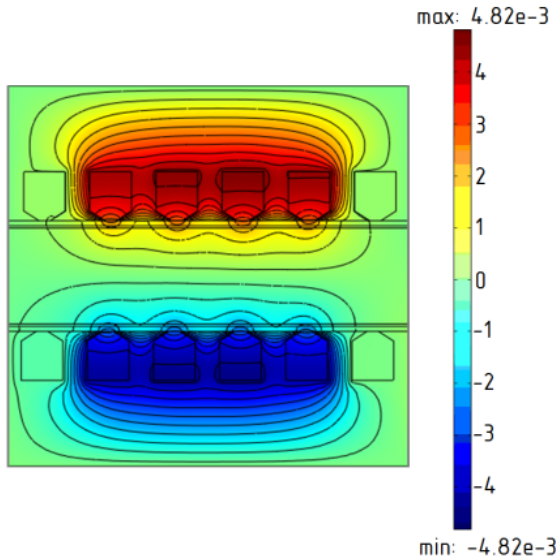
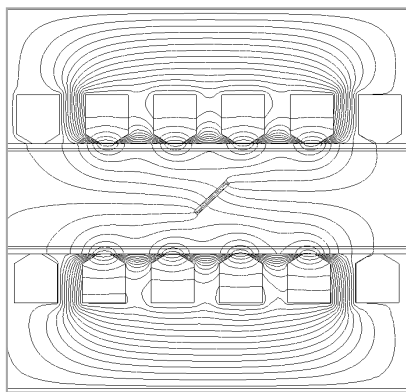
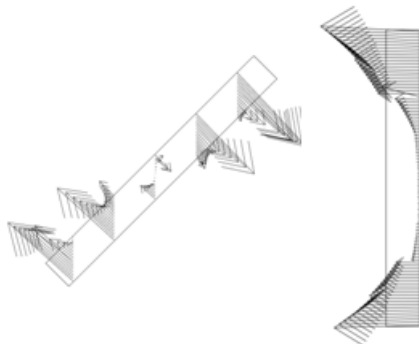


Рис. 2. Распределение векторного магнитного потенциала в активной зоне ЭМД



а



б

Рис. 3. Распределение векторного магнитного потенциала в активной зоне ЭМД (а) и усилий действующих на ФРТ (б)

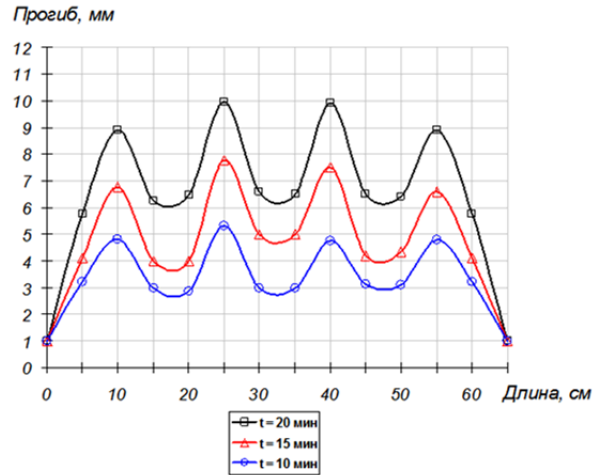


Рис. 4. Кривые распределения глубины прогиба по длине стенки рабочей камеры

Распределение электромагнитных усилий в рабочей электропроводящей камере ЭМД (в пределах полюсного деления), полученное по результатам конечно-элементных расчетов, представлено на рисунке 5.

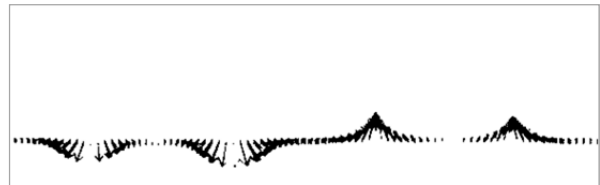


Рис. 5. Распределение электромагнитных усилий в рабочей электропроводящей камере ЭМД

Расчет подтверждает наличие локализации действующих электромагнитных усилий на стенки электропроводящей камеры в пределах полюсного деления индукторов. Деформацию рабочей камеры ЭМД вызывают, прежде всего, усилия которые направлены нормально к поверхности стенки камеры.

**Выводы.** В работе получены картины распределения векторного магнитного потенциала в активной зоне электрохимического дезинтегратора. Представлены результаты моделирования распределения усилий, действующих на ферромагнитные тела и рабочую электропроводящую камеру. Результаты численного расчета могут быть использованы при выборе геометрических размеров активной части с целью получения заданных рабочих свойств и характеристик.

### Література

1. Филатов М.А., Грицюк В.Ю., Лысак В.В. Оценка возможности использования электрохимического дезинтегратора в технологии приготовления водоугольного топлива / Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск: ДонГТУ. – 2012. – Вып. 37. – С. 325–329.

2. Заблодський М.М., Шинкаренко В.Ф., Грицюк В.Ю та ін. Пат. 87222 Україна, МПК H02K 41/025. Електромеханічний пристрій багатофакторної дії для обробки матеріалів; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – № u201310641 ; заявл. 03.09.2013 ; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 2.
3. Логвиненко Д.Д., Шеляков О.П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем / Техніка, 1976. – 144 с.
4. Міліх В І., Шилкова Л.В. Експериментальне дослідження фізичної моделі трифазного індуктора магнітного поля в робочому режимі при обробці сипучого матеріалу / Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2020. – № 3 (1357). – С. 3-7.
5. Бахвалов А.Ю. Электромеханические устройства с дискретной вторичной частью: алгоритмы анализа и синтеза и усовершенствованные конструкции: диссертация канд. техн. наук: 05.09.01. Новочеркасск, 2007. – 136 с.
6. Вершинин И.Н., Вершинин Н.П. Аппараты с вращающимся электромагнитным полем / ООО «Передовые технологии XXI века», Сальск-Москва, 2007. – 368 с.

#### References

1. Filatov M.A., Gricjuk V.Ju., Lysak V.V. Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya elektromehaničeskogo dezintegratora v tehnologii prigotovlenija vodo-ugol'nogo topliva / Sbornik nauchnyh trudov DonG-TU. – Alčevsk: DonGTU. – 2012. – Вып. 37. – S. 325–329.
2. Zablod'skij M.M., Shinkarenko V.F., Gricjuk V.Ju ta in. Pat. 87222 Україна, МПК H02K 41/025. Elektromehaničnij prístrij bagatofaktornoї diї dlja ob-robki materialiv; zajavnik i patentovlasnik Donbas'kij derzhavnij tehničnij universitet. – № u201310641; zajavl. 03.09.2013 ; opubl. 27.01.2014, Bjul. № 2.
3. Logvinenko D.D., Sheljakov O.P. Intensifikacija tehnologičeskikh processov v apparatah s vihrevym sloem / Tehnika, 1976. – 144 s.
4. Milih V I., Shilkova L.V. Eksperimental'ne dosli-dzhennja fizičnoi modeli trifaznogo induktora magnitnogo polja v robočomu rezhimi pri obrobci sipuchogo materialu / Visnik Nacional'nogo tehničnogo univer-sitetu «HPI». Serija: Električni mashini ta elekt-romehanične peretvorennja energii. – 2020. – № 3 (1357). – S. 3-7.
5. Bahvalov A.Ju. Elektromehaničeskie ustrojstva s diskretnoj vtoričnoj čast'ju: algoritmy analiza i sinteza i usovershenstvovanne konstrukcii: dis-sertacija kand. tehn. nauk: 05.09.01. Novočerkassk, 2007. – 136 s.
6. Veršhinin I.N., Veršhinin N.P. Apparaty s vrašhajushhimsja jelektromagnitnym polem / ООО «Pere-dovye tehnologii XXI veka», Sal'sk-Moskva, 2007. – 368 s.

#### Грицюк В.Ю., Тимофеева О.О. Електромеханічний дезінтегратор багатофакторної дії: моделювання та оцінка

Одним із способів, що дозволяють здійснювати різні технологічні процеси тонкого і надтонкого подрібнення, є застосування електромеханічних дезінтеграторів багатофакторної дії. Дезінтегратор складається з двох плоских індукторів з трифазними обмотками, які утворюють біжучі магнітні поля з протилежним порядком чергування фаз, і робочої камери з феромагнітними робочи-

ми тілами, розташованою в міжіндукторному проміжку. Безліч чинників, що дозволяють впливати на оброблювану речовину з необхідною інтенсивністю і в потрібному напрямку, вимагає знання фізичної суті відбуваються в вихровому шарі явищ. Для визначення сили, що діє на феромагнітне тіло, необхідно розрахувати магнітне поле в робочій зоні електромеханічного дезінтегратора. Шукана величина визначається шляхом чисельного рішення польової задачі з використанням методу скінченних елементів. Даний метод дозволяє точно описати конфігурацію активної частини, а також врахувати нелінійність властивостей матеріалів. У роботі отримано картини розподілу векторного магнітного потенціалу в активній зоні електромеханічного дезінтегратора. Представлено результати моделювання розподілу зусиль, що діють на феромагнітні тіла і робочу електропровідну камеру. Наслідком взаємодії біжучих магнітних полів індукторів і вихрових струмів, що протікають в стінках робочої камери, є поява характерних прогинів стінок робочої камери в межах кожного полюсного поділу. Розрахунок підтверджує наявність локалізації діючих електромагнітних зусиль на стінки електропровідної камери в межах полюсного поділу індукторів. Деформацію робочої камери викликають, перш за все, зусилля які спрямовані нормально до поверхні стінки камери. Результати чисельного розрахунку можуть бути використані при виборі геометричних розмірів активної частини з метою отримання заданих робочих властивостей і характеристик.

**Ключові слова:** електромеханічний дезінтегратор, робочі феромагнітні тіла, електромагнітні зусилля, скінченно-елементна модель.

#### Grytsiuk V.Yu., Tymofieieva O.O. Electromechanical disintegrator of multifactor action: modeling and evaluation

One of the ways to carry out various technological processes of fine and ultrafine grinding is the electromechanical disintegrators of multifactor action using. The disintegrator consists of two flat inductors with three-phase windings, which form traveling magnetic fields with the opposite phase sequence, and a working chamber with ferromagnetic working bodies, located in the inter-inductor gap. The set of factors allowing to influence the processed substance with the required intensity and in the required direction requires knowledge of the physical essence of the phenomena occurring in the vortex layer. To determine the force acting on a ferromagnetic body, it is necessary to calculate the magnetic field in the working area of the electromechanical disintegrator. The quantity of interest is determined by numerically solving a field problem using the finite element method. This method makes it possible to accurately describe the configuration of the active part, as well as take into account the nonlinearity of material properties. In this paper, the pictures of the vector magnetic potential distribution in the active zone of a electromechanical disintegrator are obtained. The modeling results of the forces acting distribution on ferromagnetic bodies and a working electricaly conductive chamber are presented. A consequence of the interaction of the running magnetic fields of inductors and eddy currents flowing in the walls of the working chamber is the appearance of characteristic deflections of the walls of the working chamber within each pole division. The calculation confirms the presence of localization of the acting electromagnetic forces on the walls of the electrically conductive chamber within the pole division of the inductors. The deformation of the working chamber is caused, first of all, by forces that are directed normally to the surface of the chamber wall. The results of numerical calculations can be used for choosing

*the geometric dimensions of the active part for obtaining the specified operating properties and characteristics. The results of numerical calculations can be used for choosing the geometric dimensions of the active part for obtaining the specified operating properties and characteristics.*

**Key words:** *electromechanical disintegrator, working ferromagnetic bodies, electromagnetic forces, finite element model.*

**Грицюк В.Ю.** – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Харківського національного університету радіоелектроніки, volodymyr.hrytsiuk@nure.ua  
**Тимофєєва О.О.** – асистент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, o.a.tymofieieva@gmail.com

Стаття подана 22.10.2020

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-264-8-39-45>

УДК 621.318

## ЧИСЕЛЬНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПОЛІГРАДІЄНТНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Романченко Ю.А., Мелконова І.В., Сухарєвська А.М.

## NUMERICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCHES BY DETERMINATION OF THE EFFICIENCY OF AN IMPROVED POLYGRADIENT ELECTROMAGNETIC SEPARATOR

Romanchenko J.A., Melkonova I.V., Sukharievskaya A.M.

*У статті для оцінювання переваг удосконаленої конструкції поліградієнтного електромагнітного сепаратора перед базовою проведено дослідження розподілу магнітної індукції в робочій зоні пластинчастої матриці сепаратора. Для вирішення цього завдання був задіяний метод скінченних елементів, реалізований у тривимірній постановці в модулі Magnet програмного комплексу Infolytica. В удосконаленій конструкції електромагнітного сепаратора суміжні ряди паралельних феромагнітних пластин матриці встановлено із послідовним чергуванням трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках. Встановлено, що це забезпечить найбільш рівномірний розподіл локальних зон з високою інтенсивністю та неоднорідністю магнітного поля в робочому об'ємі матриці сепаратора у порівнянні з базовою конструкцією та створить умови для збільшення ефективності видалення дрібнодисперсних феромагнітних та слабомагнітних домішок крупністю менше 1 мм. Виконане порівняння результатів експериментальних досліджень розподілу магнітної індукції для базової конструкції з результатами чисельних розрахунків для удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора. Для визначення ефективності роботи поліградієнтного електромагнітного сепаратора удосконаленої конструкції були проведені експериментальні дослідження на фізичній моделі з використанням проби борошна з різною вихідною концентрацією металевих домішок розміром від 0,01 до 5 мм. Вилучений метал зважували на аналітичних вагах та визначали його концентрацію. Експеримент проводився в умовах сталого температурного режиму. За результатами експерименту було встановлено, що при невисокій концентрації металевих домішок у пробі борошна (менше 1 г на 1 кг продукту) більш високу ефективність вилучення металевих включень забезпечує удосконалена конструкція поліградієнтного електромагнітного сепаратора.*

**Ключеві слова:** магнітна сепарація, феромагнітні домішки, поліградієнтний електромагнітний сепаратор, фізична модель.

**Вступ.** Важливим етапом технологічних процесів переробки вихідної сировини є поділ сумішей сипких матеріалів, виділення твердої фракції з рідкого або газоподібного середовища. На сьогоднішній день для цього використовуються технічні пристрої – сепаратори. Широке застосування на практиці дістав метод магнітної сепарації, що заснований на використанні відмінностей в магнітній чутливості часток поділюваних середовищ [1].

Найбільш ефективною технологією, яка спроможна відокремлювати дрібнодисперсні феромагнітні частинки розміром від 0,005 мм до 1мм, є поліградієнтна магнітна сепарація. У робочих зонах пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації розміщуються матриці з дискретним поліградієнтним середовищем із заданими електромагнітними властивостями і геометричними параметрами елементарних осередків, що складаються з феромагнітних тіл (наприклад, загострених пластин, куль, циліндрів, стрижнів, сталеві вати тощо), за рахунок яких відбувається зміна первинного магнітного поля, що підвищує градієнт його напруженості, і, як наслідок, надійність вилучення дрібнодисперсних феромагнітних часток з матеріалу.

**Постановка проблеми.** Більшість існуючих пристроїв для поліградієнтної магнітної сепарації призначена для очищення рідких середовищ (пульпи) або запиленних газів. Однак проблема вилучення дрібнодисперсних феромагнітних часток, які утворюються в процесі зносу обладнання, є актуальною також для сипких матеріалів: цукру, борошна, крохмалю, круп, комбікорму, керамічної та фармацевтичної сировини тощо. Стандартами встановлені гранично допустимі норми наявності металодомішок у харчових продуктах, наприклад, в борошні – не бі-

льше 3 мг/кг сухої речовини, в комбікормі – не більше 20-30 мг/кг. Наявність металевих домішок у харчових продуктах неприпустиме, оскільки їх попадання разом з їжею в організм людини призводить до хвороб, а іноді і до загибелі.

Наявність в робочих зонах існуючих пристроїв для поліградієнтної сепарації не досить великих за розмірами повітряних зазорів, в яких відбувається сепарація матеріалів, унеможливує їх застосування для очищення сипких речовин. Тому потребують подальших досліджень процеси, що відбуваються в робочому органі сепаратора – матриці з поліградієнтним середовищем. При цьому слід враховувати, що збільшення інтенсивності магнітного поля у сепараторах з електромагнітним збудженням обмежено насиченням елементів магнітопроводу. Також зростання напруженості магнітного поля пов'язане зі збільшенням потужності, що тягне за собою зростання вартості електромагнітних сепараторів. Разом з цим підвищення неоднорідності магнітного поля можливо отримати за рахунок оптимізації геометричних розмірів, форми та взаємного розташування елементів багатокомпонентної магнітної матриці сепаратора. Дослідження в цьому напрямку представляють найбільший практичний і теоретичний інтерес.

#### **Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

Магнітні сепаратори відрізняються складністю та різноманіттям конструкцій, тому для вирішення задач розрахунку магнітних сепараторів знайшли застосування різні методи. Так, в роботі [2] наведені результати експериментальних і аналітичних досліджень ефективності надпровідної системи поліградієнтного магнітного сепаратора з використанням феромагнітних фільтрів з різними діаметрами дроту і способами упаковки. Показано, що здатність магнітної системи до вилучення магнітних включень зростає зі зменшення діаметра дроту і збільшення щільності її упаковки.

Під час розрахунків магнітних систем сепараторів широко використовують сучасні програмні продукти чисельного моделювання. Так, наприклад в роботі [3] здійснено чисельний розрахунок магнітної сили в робочій зоні у тривимірній постановці з урахуванням реальної конструкції дискового магнітного сепаратора, що дозволило визначити найбільш ефективну магнітну систему при низькій висоті підвіски сепаратора над шаром сипучого матеріалу.

В роботі [4] було теоретично описано та змодельовано селективне захоплення частинок в високоградієнтному магнітному полі за допомогою програмного продукту COMSOL Multiphysics. Було виявлено, що траєкторії захоплення невеликої кількості частинок в ідеальних умовах значно відрізняються від траєкторій захоплення великої кількості частинок в реальних умовах.

Також для визначення магнітних характеристик сепараторів знайшли застосування методи експериментального вивчення різних фізичних об'єктів або явищ, засновані на використанні моделі, яка має

ту ж фізичну природу, що і досліджуваній об'єкт (фізичне моделювання).

У статті [5] виконано моделювання та дослідження електротехнічної системи регульованої сепарації немагнітних матеріалів з використанням магнітної рідини. Розраховані сили, які діють на немагнітні тіла в магнітній рідині, які знаходяться у неоднородному магнітному полі. Були виконані експериментальні дослідження на фізичній моделі сепаратора. У роботі [6] розглянутий комплексний підхід до дослідження магнітного поля електромагніту постійного струму з розщепленими полюсами і полюсними наконечниками. Були проведені експериментальні дослідження магнітного поля на дослідному зразку електромагніта з використанням цифрового мілітеслометра з давачем Холла та доповнені результатами аналітичного та чисельного розрахунку магнітного поля в програмі Elcut 6.0 (професійна версія). У роботі [7] було досліджене магнітне поле, що створюється магнітною системою в її робочій зоні, і вплив вирізу в зовнішньому кільцевому полюсі на значення напруженості магнітного поля і магнітної сили в зоні розвантаження за допомогою експериментальних досліджень. Для цього була розроблена і виготовлена фізична модель електромагнітної шайби в масштабі лінійних розмірів 1:5.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що на сьогоднішній день для розрахунків характеристик магнітних сепараторів автори використовують чисельні, аналітичні та експериментальні методи.

**Мета статті.** Метою роботи є підтвердження ефективності вилучення дрібнодисперсних металевих включень електромагнітним сепаратором удосконаленої конструкції за допомогою чисельних та експериментальних досліджень.

**Результати дослідження.** Для забезпечення більш рівномірного розподілу локальних зон високої інтенсивності та підвищення неоднорідності магнітного поля в робочому об'ємі матриці поліградієнтного електромагнітного сепаратора із застосуванням структурно-системного підходу запропонована його удосконалена конструкція [8, 9] (рис. 1).

В удосконаленій конструкції електромагнітного сепаратора суміжні ряди паралельних феромагнітних пластин матриці встановлено із послідовним чергуванням трикутних виступів та впадин у протилежних напрямках. Це забезпечить найбільш рівномірний розподіл локальних зон з високою інтенсивністю та неоднорідність магнітного поля в робочому об'ємі матриці сепаратора у порівнянні з базовою конструкцією та створить умови для збільшення ефективності видалення дрібнодисперсних феромагнітних та слабомагнітних домішок крупністю менше 1 мм [8].

Удосконалена конструкція електромагнітного сепаратора (нове технічне рішення  $S_{TR}$ ) разом з його базовим варіантом відносяться до структури  $S_d$ , яка є однією з ізомерних композицій, отриманих в результаті процедури генетичного синтезу

$$f(S^*_{XYZR}) \rightarrow (S_1, S_2, \dots S_n), \quad (1)$$

де  $f$  – оператор геометричних перетворень (перетворень симетрії);  $n$  – кількість ізомерних композицій.

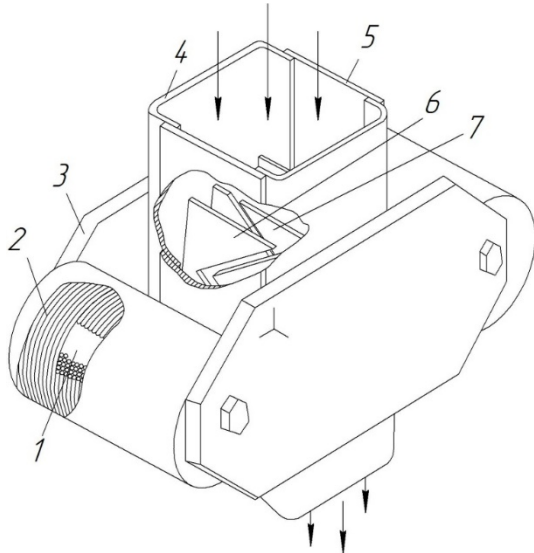


Рис. 1. Електромагнітний сепаратор удосконаленої конструкції: 1 – циліндричне осердя, 2 – котушки намагнічування, 3 – полюси, 4 – стінки матриці виконані з феромагнітного матеріалу, 5 – стінки матриці виконані з немагнітного матеріалу, 6, 7 – феромагнітні пластини

В свою чергу, структуру  $S_4$  також можна представити як множину  $l$  просторових ізомерних композицій ( $S_4^l, S_4^2, \dots S_4^l$ ), які відрізняються просторовим розміщенням суміжних рядів паралельних феромагнітних пластин, та записати у вигляді

$$S_4 = (S_4^l, S_4^2, \dots S_4^l) \rightarrow S_{TR} \rightarrow P_{TR}, \quad (2)$$

де  $P_{TR}$  – популяція технічних рішень.

Розподіл магнітного поля в системі, що містить в якості джерела магнітного поля котушку зі струмом, описується системою диференційних рівнянь Максвелла, яка для векторного магнітного потенціалу  $A$  має вигляд [10]

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_0, \quad (3)$$

де  $\mu_r$  – магнітна проникність матеріалу магнітопроводу, яка, в загальному випадку, є нелінійною функцією магнітної індукції;  $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму, яка дорівнює  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mathbf{J}_0$  – вектор щільності струму в перерізі котушки.

Для оцінювання переваг удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора перед базовою проведені дослідження розподілу магнітної індукції в робочій зоні матриці сепаратора. Для вирішення цього завдання був задіяний метод скінченних елементів, реалізований у тривимірній постановці в модулі Magnet програмного комплексу Infolytica [11]. Задавались щільність струму в обмотці – 2,1

А/мм<sup>2</sup> та конструктивні параметри магнітної системи, зокрема: робоча ширина матриці сепаратора – 180 мм, відстань між сусідніми виступами пластин – 100 мм, кут при вершині виступу пластини – 20°, робочий міжполюсний проміжок – 13,6 мм.

При дослідженні приймалося, що магнітопровід електромагнітної системи, включаючи пластини матриці, виготовлений зі магнітом'якої конструкційної сталі. Прийнято припущення про сталість відносної магнітної проникності  $\mu_r$  матеріалу магнітопроводу ( $\mu_r = 1000$  Гн/м). Для стінок матриці (позиція 4 на рис. 1) задавався немагнітний матеріал (алюміній). В якості граничних умов на зовнішніх границях розрахункової області використовувалася умова магнітної ізоляції  $A=0$ .

На рис. 2 представлена геометрична модель удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора. Конфігурація основної магнітної системи цього сепаратора така ж сама, як у базової конструкції, але в матриці суміжні ряди паралельних феромагнітних пластин розташовані із чергуванням у протилежних напрямках трикутних виступів і впадин [8].

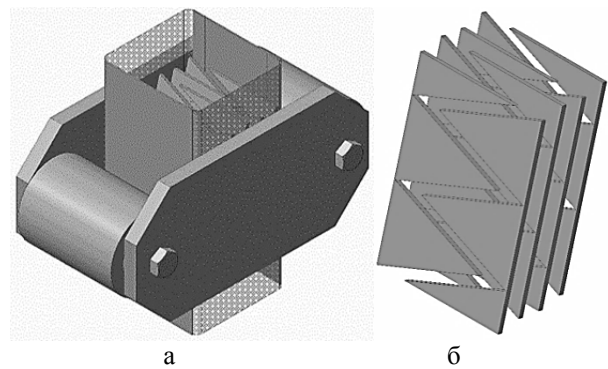


Рис. 2. Геометрична модель удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора: а – загальний вигляд; б – пластини матриці

На рис. 3 представлені результати моделювання, отримані для удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора. За результатами моделювання був здійснений розрахунок розподілу магнітної індукції електромагнітного сепаратора в характерних точках 1-7, розташованих вздовж середньої характерної лінії робочого проміжку для внутрішнього ряду феромагнітних пластин. На рис. 4 ця лінія позначена стрілкою.

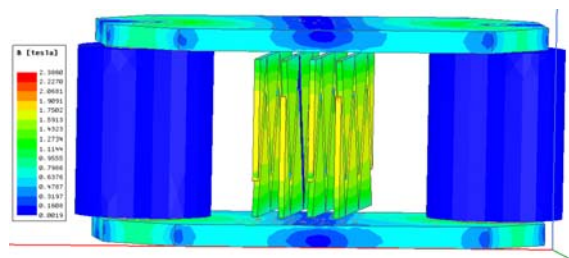


Рис. 3. Результати моделювання удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора

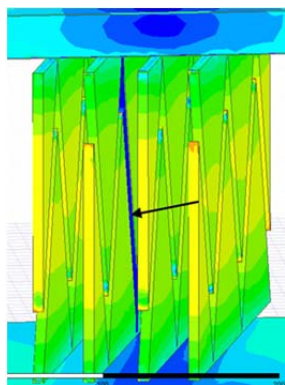


Рис. 4. Розташування характерної лінії

Результати розрахунку розподілу магнітної індукції  $B$  електромагнітного сепаратора удосконаленої конструкції в характерних точках 1-7 для внутрішнього ряду пластин показані на рис. 5. Крім того, на рис. 5 здійснено порівняння отриманих під час 3D-моделювання результатів з результатами експериментальних досліджень розподілу магнітної індукції для внутрішнього ряду пластин базової конструкції електромагнітного сепаратора.

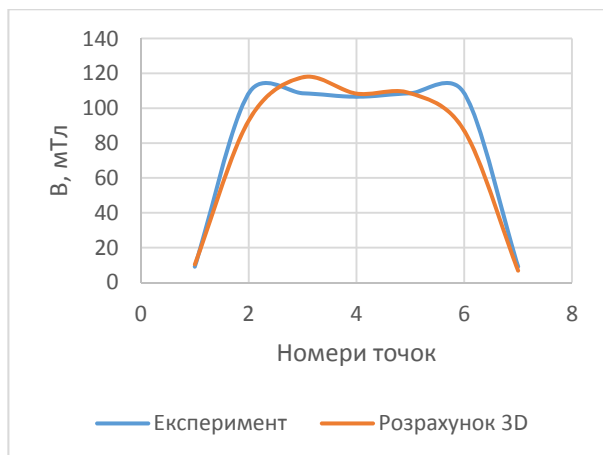


Рис. 5. Розподіл магнітної індукції в характерних точках

Максимальне значення магнітної індукції (табл. 1) склало, відповідно: для базової моделі – 108,6 мТл, для удосконаленої моделі - 117,7 мТл (відносна похибка – 8,3%). У той самий час, як свідчить рис. 3, ступінь неоднорідності поля в робочому проміжку вище для удосконаленої конструкції пристрою. Локальний коефіцієнт  $k_i$  неоднорідності в точках 2-6 приймає майже однакове значення (1,33-1,36), що свідчить про однорідний характер магнітного поля, в той самий час для удосконаленої конструкції сепаратора коефіцієнт  $k_i$  змінюється у межах 1,15-1,55. Розрахований за формулою (4) інтегральний показник неоднорідності поля для характерних точок 2-6 склав, відповідно: для базової моделі – 0,9%, для удосконаленої моделі – 14,9%.

$$k_i = (H_{\max} - H_{\min}) / (H_{\max} + H_{\min}) \quad (4)$$

Далі з застосуванням фізичної моделі (рис. 6) були проведені експериментальні дослідження з визначення ефективності роботи удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора та порівняння її з базовою. При цьому всі геометричні та електричні параметри моделі залишалися такими ж, як і для базової конструкції сепаратора (змінювалось тільки розташування паралельних феромагнітних пластин в суміжних рядах).

Таблиця 1

**Порівняння результатів експериментальних досліджень розподілу магнітної індукції для базової конструкції з результатами чисельних розрахунків для удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора**

Номери характерних точок	Базова конструкція		Удосконалена конструкція		Відхилення за магнітною індукцією, %
	Магнітна індукція, мТл	Локальний коефіцієнт неоднорідності $k_i$ в.о.	Магнітна індукція, мТл	Локальний коефіцієнт неоднорідності $k_i$ в.о.	
1	9,1	0,11	10,4	0,137	+14,3
2	108,6	1,36	92,9	1,22	-16,7
3	108,6	1,36	117,7	1,55	+8,3
4	106,6	1,33	108,4	1,43	+1,7
5	108,6	1,36	108,6	1,433	0
6	108,6	1,36	87,1	1,15	-24,7
7	9,1	0,11	6,8	0,089	-33,8

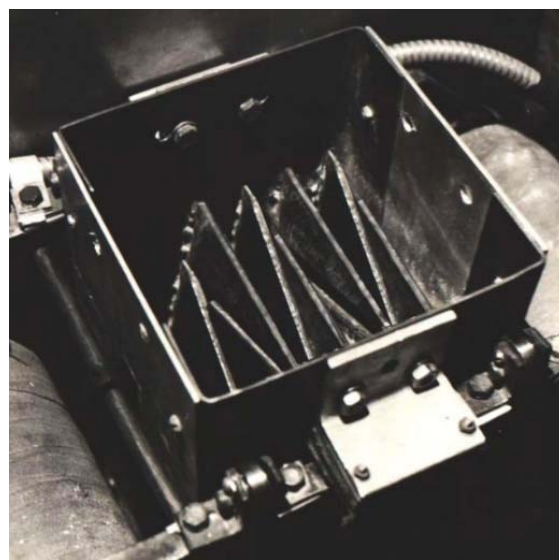


Рис. 6. Розташування пластин в матриці удосконаленої конструкції електромагнітного сепаратора

Для визначення ефективності роботи електромагнітного сепаратора були використані проби борошна з різною вихідною концентрацією металевих домішок розміром від 0,01 до 5 мм. Вилучений метал зважували на аналітичних вагах та визначали його концентрацію. Експеримент проводився в умовах сталого температурного режиму.

Результати експерименту наведені у табл. 2, в якій для порівняння також представлені результати з визначення ефективності базової конструкції електромагнітного сепаратора, отримані в [12].

Таблиця 2

**Результати експерименту з визначення ефективності електромагнітного сепаратора**

Маса проби борошна	Загальна маса металевих включень	Маса металевих включень на 1 кг борошна	Вилучено металевих включень:			
			базова конструкція		удосконалена конструкція	
кг	г	г	г	%	г	%
6	60	10	54,32	90,54	54,16	90,27
6	30	5	28,66	95,53	27,8	92,7
6	6	1	5,61	93,5	5,72	95,3
6	3	0,5	2,79	93,0	2,85	95,0
6	0,09	0,015	0,079	87,28	0,085	94,4

Як свідчить табл. 2, і базова, і удосконалена конструкції електромагнітного сепаратора забезпечують достатньо високу ефективність вилучення феромагнітних включень (90,3-95,0)% при їх вихідній концентрації (1-10) г на 1 кг продукту. У той самий час при невисокій концентрації металевих домішок у пробі (менше 1 г на 1 кг продукту) більш високу ефективність вилучення металевих включень забезпечує удосконалена конструкція електромагнітного сепаратора.

#### Висновки.

1. Як показали результати комп'ютерного 3D-моделювання, удосконалена конструкція електромагнітного сепаратора у порівнянні з базовою відрізняється більш високим значенням інтегрального показника неоднорідності поля. Інтегральний показник неоднорідності поля для характерних точок склав, відповідно: для базової моделі – 0,9%, для удосконаленої моделі – 14,9%.

2. Експериментальні дослідження на фізичній моделі показали, що удосконалена та базова конструкції електромагнітного сепаратора забезпечують достатньо високу ефективність вилучення феромагнітних включень (90,3-95,0)% при їх вихідній концентрації (1-10) г на 1 кг продукту. У той самий час при невисокій концентрації металевих домішок у пробі (менше 1 г на 1 кг продукту) більш високу ефективність вилучення металевих включень забезпечує удосконалена конструкція електромагнітного сепаратора.

#### Література

- Загирняк М.В. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования: [монография] / М.В. Загирняк, Ю.А.Бранспиз, И.А. Шведчикова; под ред. М.В.Загирняка. – К.: Техніка, 2011. – 224 с.
- Kim Y.G. Effects of filter shapes on the capture efficiency of a superconducting high-gradient magnetic separation

system / Y.G. Kim, J.B. Song, D.G. Yang, J.S. Lee, Y.J. Park, D.H. Kang, H.G. Lee // *Supercond Sci Technol.* – 2013. – №26 – P. 625-629.

- Gerlici J. Исследование влияния конфигурации магнитной системы сепаратора на постоянных магнитах на распределение магнитного поля в рабочей зоне / J. Gerlici, И. А. Шведчикова, И. В. Никитченко, Ю. А. Романченко // *Научно-практический журнал Электротехника і електромеханіка.* – 2017. – №2 – С. 13-17.
- Zeng J. Selective capture of magnetic wires to particles in high gradient magnetic separation / J. Zeng, X. Tong, F. Yi, L. Chen // *Minerals.* – 2019. – Vol. 9(509). – P. 1-12.
- Казаков Ю. Б. Моделирование и исследование электроотехнической системы регулируемой сепарации немагнитных материалов с использованием нанодисперсных магнитных жидкостей / Ю. Б. Казаков, Ю. И. Страдомский, В. А. Филиппов // *Вестник ИГЭУ.* – 2011. – Вып. 2. – С. 1-4.
- Татевосян А. С. Экспериментальное исследование и расчет магнитного поля электромагнита постоянного тока с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками в комплексе программ ELCUT / А. С. Татевосян, А. А. Татевосян, Н. В. Захарова, С. В. Шелковников, Ю. В. Шелковникова // *Инжиниринг георесурсов.* – 2016. – Т. 327. № 2. – С. 133-140.
- Загирняк М. В. Экспериментальное исследование магнитного поля в рабочем зазоре электромагнитной системы, выполненной в виде шайбы с вырезом в кольцевом полюсе / М. В. Загирняк, С. В. Подорожный, В. Е. Загирняк // *Вісник КДПУ.* – 2006. – Випуск 3 (39). Частина 1. – С. 59-62.
- Патент України 103156 B03C 1/00. Электромагнитный сепаратор / Шведчикова И. О., Романченко Ю. А.; заявл. 05.05.15; опубл. 10.12.15, Бюл. № 23. – 5 с.
- Шведчикова И. А. Конструктивные решения для двухстадийной магнитной сепарации сыпучих материалов / И. А. Шведчикова, Ю. А. Романченко // *Технологія-2016: матеріали ХІХ міжнародної науково-технічної конференції (Севеодонецьк 22-23 квітня 2016 р.).* Севеодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2016. – С. 192-193.
- Подольцев А. Д. Многомасштабное моделирование в электротехнике: [монография] / А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – К: Институт электродинамики НАН Украины, 2011. – 239 с.
- Infolytica is now part of Mentor, a Siemens Business [Электронный ресурс]. – 2018. – Режим доступа : <https://www.mentor.com/products/mechanical/infolytica>. (дата звернення: 03.11.2020).
- Шведчикова И.А. Исследование и разработка электромагнитных кассетных сепараторов: дис. канд. техн. наук: 05.09.05 / Ворошиловградский машиностроительный институт. Ворошиловград, 1989. 176 с.

#### References

- Zagirnyak M.V. Magnitnyye separatory. Problemy proektirovaniya: [monografiya] / M.V. Zagirnyak, YU.A. Brans-piz, I.A. Shvedchikova; pod red. M.V. Zagirnyaka. – K.: Tekhnika, 2011. – 224 s.
- Kim Y.G. Effects of filter shapes on the capture efficiency of a superconducting high-gradient magnetic separation system / Y.G. Kim, J.B. Song, D.G. Yang, J.S. Lee, Y.J. Park, D.H. Kang, H.G. Lee // *Supercond Sci Technol.* – 2013. – №26 – P. 625-629.
- Gerlici J. Issledovanie vlijaniya konfiguracii magnitnoj sistemy separatora na postojannyh magnitah na raspredelenie magnitnogo polja v rabochej zone / J. Gerlici, I. A. Shvedchikova, I. V. Nikitchenko, Ju. A.

- Romanchenko // Naukovo-praktichnij zhurnal Elektrotehnika i elektromehanika. – 2017. – №2 – S. 13-17.
4. Zeng J. Selective capture of magnetic wires to particles in high gradient magnetic separation / J. Zeng, X. Tong, F. Yi, L. Chen // Minerals. – 2019. – Vol. 9(509). – P. 1-12.
  5. Kazakov Ju. B. Modelirovanie i issledovanie jelektrotehnicheskoy sistemy reguliruemoy separacii nemagnitnyh materialov s ispol'zovaniem nanodispersnyh magnitnyh zhidkostej / Ju. B. Kazakov, Ju. I. Stradomskij, V. A. Filippov // Vestnik IGJeU. – 2011. – Вып. 2. – S. 1-4.
  6. Tatevosjan A. S. Jeksperimental'noe issledovanie i raschet magnitnogo polja jelektromagnitna postojannogo toka s rasshheplennymi poljysami i poljusnymi nakonechnikami v komplekse programm ELCUT / A. S. Tatevosjan, A. A. Tatevosjan, N. V. Zaharova, S. V. Shelkovnikov, Ju. V. Shelkovnikova // Inzhiniring georesursov. – 2016. – T. 327. № 2. – S. 133-140.
  7. Zagirnjak M. V. Jeksperimental'noe issledovanie magnitnogo polja v rabochem zazore jelektromagnitnoj sistemy, vypolnennoj v vide shajby s vyrezom v kol'cevom poljuse / M. V. Zagirnjak, S. V. Podorozhnyj, V. E. Zagirnjak // Visnik KDPU. – 2006. – Vipusk 3 (39). Chastina 1. – S. 59-62.
  8. Patent Ukrainy 103156 V03S 1/00. Elektromagnitnyj separator / Shvedchikova I. O., Romanchenko Ju. A.; zajavl. 05.05.15; opubl. 10.12.15, Bjul. № 23. – 5 s.
  9. Shvedchikova I. A. Konstruktivnye reshenija dlja dvuhstadijnoj magnitnoj separacii sypuchih materialov / I. A. Shvedchikova, Ju. A. Romanchenko // Tehnologija-2016: materialy HIIH mizhnarodnoї naukovo-tehnikoї konferencii (Severodonec'k 22-23 kvitnja 2016 r.). Severodonec'k: SNU im. V. Dalja, 2016. – S. 192-193.
  10. Podol'cev A. D. Mnogomasshtabnoe modelirovanie v jelektrotehnikе: [monografija] / A. D. Podol'cev, I. N. Kucherjavaja. – K: Institut jelektrodinamiki NAN Ukrainy, 2011. – 239 s.
  11. Infolytica is now part of Mentor, a Siemens Business [Elektronnij resurs]. – 2018. – Rezhim dostupa : <https://www.mentor.com/products/mechanical/infolytica>. (data zvernennja: 03.11.2020).
  12. Shvedchikova I.A. Issledovanie i razrabotka jelektromagnitnyh kassetnyh separatorov: dis. kand. tehn. nauk: 05.09.05 / Voroshilovgradskij mashinostroitel'nyj institut. Voroshilovgrad, 1989. 176 s.

**Романченко Ю.А., Мелконова И.В., Сухаревская А.М. Численные и экспериментальные исследования по определению эффективности работы полиградиентного электромагнитного сепаратора усовершенствованной конструкции**

*В статье для оценки преимуществ усовершенствованной конструкции полиградиентного электромагнитного сепаратора перед базовой проведены исследования распределения магнитной индукции в рабочей зоне пластинчатой матрицы сепаратора. Для решения этой задачи был задействован метод конечных элементов, реализованный в трехмерной постановке в модуле Magnet программного комплекса Infolytica. В усовершенствованной конструкции электромагнитного сепаратора смежные ряды параллельных ферромагнитных пластин матрицы установлены с последовательным чередованием треугольных выступов и впадин в противоположных направлениях. Установлено, что это обеспечит наиболее равномерное распределение локальных зон с высокой интенсивностью и*

*неоднородностью магнитного поля в рабочем объеме матрицы сепаратора по сравнению с базовой конструкцией и создаст условия для увеличения эффективности удаления мелкодисперсных ферромагнитных и слабомагнитных примесей крупностью менее 1 мм. Выполнено сравнение результатов экспериментальных исследований распределения магнитной индукции для базовой конструкции с результатами численных расчетов для усовершенствованной конструкции электромагнитного сепаратора. Для определения эффективности работы полиградиентного электромагнитного сепаратора усовершенствованной конструкции были проведены экспериментальные исследования на физической модели с использованием пробы муки с различной исходной концентрацией металлических примесей размером от 0,01 до 5 мм. Извлеченный металл взвешивали на аналитических весах и определяли его концентрацию. Эксперимент проводился в условиях устойчивого температурного режима. По результатам эксперимента установлено, что при невысокой концентрации металлических примесей в пробе муки (менее 1 г на 1 кг продукта) более высокую эффективность извлечения металлических включений обеспечивает усовершенствованная конструкция полиградиентного электромагнитного сепаратора.*

**Ключевые слова:** магнитная сепарация, ферромагнитные примеси, полиградиентный электромагнитный сепаратор, физическая модель.

**Romanchenko J.A., Melkonova I.V., Sukharievskaya A.M. Numerical and experimental researches by determination of the efficiency of an improved polygradient electromagnetic separator**

*Researches of magnetic induction distribution in the working area of lamellar matrix of separator were carried out to assess the advantages of improved design of polygradient electromagnetic separator over the base model. To solve this problem, the finite element method implemented in a three-dimensional formulation in the Magnet module of the Infolytica software package was used. In the improved design of the electromagnetic separator, adjacent rows of parallel ferromagnetic matrix plates are arranged with successive alternating of triangular projections and valleys in opposite directions. It has been established that this will provide the most uniform distribution of local areas with high intensity and inhomogeneity of magnetic field in working volume of the separator matrix in comparison with the basic design and will create conditions for increasing of the efficiency of removing fine ferromagnetic and weakly magnetic impurities with a particle size of less than 1 mm. Comparison of experimental researches results of magnetic induction distribution for the basic design with results of numerical calculations for improved design of electromagnetic separator is carried out. Experimental researches on physical model using a flour sample with different initial concentrations of metal impurities ranging in size from 0,01 to 5 mm for determination of efficiency of polygradient electromagnetic separator of an improved design, were carried out. The recovered metal was weighed on an analytical balance and its concentration was determined. The experiment was carried out under stable temperature conditions. According to the results of experiment, it was found that both the basic and improved designs of the electromagnetic separator provide a sufficiently high efficiency of extracting ferromagnetic inclusions (90.3-95.0)% at their initial concentration (1-10) g per 1 kg of product; it was found that with a low concentration of metal impurities in a flour*

---

*sample (less than 1 g per 1 kg of product), an improved design of a polygradient electromagnetic separator provides a higher extraction efficiency of metal inclusions.*

**Keywords:** *magnetic separation, ferromagnetic impurities, polygradient electromagnetic separator, physical model.*

**Романченко Ю.А.** – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, [romanchenkojulia321123@gmail.com](mailto:romanchenkojulia321123@gmail.com)

**Мелконова І.В.** – старший викладач кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, [inna.mia.lg@gmail.com](mailto:inna.mia.lg@gmail.com)

**Сухарєвська А.М.** – студентка 4-го курсу кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, [suharevskajaa@gmail.com](mailto:suharevskajaa@gmail.com)

Стаття подана 21.10.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-264-8-46-50>

УДК 621.318.38

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ВІДКРИТИХ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ МАГНІТНИХ СИСТЕМ

Співак О.М., Ткаченко В.П., Мелконова І.В.

## PECULIARITIES OF CALCULATION OF MAGNETIC FIELD PARAMETERS OF OPEN EASYSYMETRIC MAGNETIC SYSTEMS

Spivak O.M., Tkachenko V.P., Melkonova I.V.

У статті розглянуті дослідження розподілу магнітного поля в міжполюсному проміжку відкритих вісесиметричних магнітних систем. Отримано рівняння з граничними умовами, рішення якого дозволяє скоротити обсяг подальших чисельних методів розрахунків. Для ряду нестійких завдань математичної фізики Р.Латтесом і Ж.Лионсом розроблений метод квазізвернення, який може бути застосований як для еволюційних завдань, так і стаціонарних. Основна ідея методу квазізвернення полягає в належній зміні диференціальних операторів, що входять в завдання. Ця зміна робиться введенням додаткових диференціальних членів. Застосування цього методу дозволяє ефективно використати чисельні методи розрахунку крайового завдання для відкритих осесиметричних систем.

**Ключеві слова:** скалярний магнітний потенціал, напруженість магнітного поля, граничні умови.

**Вступ.** Розрахунок розподілу напруженості магнітного поля в зовнішній області відкритих вісесиметричних систем суттєво ускладнюється у зв'язку з його тривимірністю та наявністю в конструкції повітряного проміжку [1,2].

В даний час для розрахунків розподілу магнітних полів використовують чисельні методи розрахунку, що дозволяють з високою точністю досліджувати складні геометричні конфігурації магнітних систем [3-7].

Розрахунок розподілу скалярного магнітного потенціалу у відкритих магнітних системах з полем високої інтенсивності і неоднорідності в робочому об'ємі з використанням чисельних методів розрахунку утруднений через обмеження розрахункової області, в якій робиться розрахунок поля, деякою поверхнею  $S$ .

Статичні магнітні поля поза областями з розподіленими струмами підкоряються рівнянню Лапласа в приватних похідних, в загальному вигляді яке має вигляд [8]:

$$\Delta u = 0 \quad (1)$$

де  $\Delta$  – диференціальний оператор Лапласа другого порядку;

$u$  – скалярний магнітний потенціал.

Гранична задача знаходження рішення рівняння (1), яке характеризує розподіл магнітного поля в відкритій області поза зоною, обмеженою полюсами магнітної системи, як відомо, називається зовнішньою.

**Постановка проблеми.** Зовнішній вид області досліджуваного класу задач з розподілом скалярного магнітного потенціалу на межі (поверхні полюсів) зображений на рис.1.

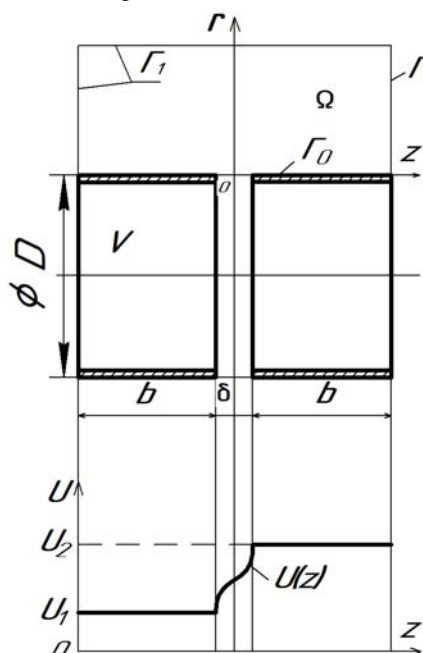


Рис. 1. Осесиметрична магнітна система

Для розрахунку розподілу напруженості магнітного поля необхідно вирішити наступну математичну задачу: знайти функцію  $u$ , яка в усіх зовнішніх точках заданої області  $V$  задовольняє рівнянню Лапласа (1), а на межі  $\Gamma_0$  області  $V$  – деякій умові, залежно від виду якого, як відомо, розрізняють три основні види граничної задачі [8]:

1)  $u(x) = \psi(x)$ , коли  $x \in \Gamma$  – перша гранична задача – задача Діріхле;

2)  $du/dn = \psi(x)$ , коли  $x \in \Gamma$  – друга гранична задача – задача Неймана;

3)  $du/dn + \beta u = \psi(x)$ , коли  $x \in \Gamma$  – третя – змішана задача.

Тут  $\psi$  і  $\beta$  – безперервні функції, визначені на граничній поверхні  $\Gamma$ , а  $du/dn$  означає похідну, узятую в точці поверхні  $\Gamma$  по зовнішній нормалі до неї.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Для вирішення зовнішньої граничної задачі французьким математиком Адамаром було сформульовано три умови, яким повинна задовольняти кожна задача, що має зрозумілу фізичну інтерпретацію. Вони відомі як умови коректності по Адамару і відображають вимоги до математичної задачі, які полягають в тому, що рішення повинне:

- по-перше – існувати,
- по-друге – бути єдиним,
- по-третє – безперервно залежати від початкових даних.

При виконанні цих умов задача вважається коректно поставленою. У разі розрахунку магнітного поля осесиметричних магнітних систем, загальний вид яких зображений на рис.1, необхідно вирішити задачу Коші для рівняння Лапласа, що полягає в знаходженні рішення рівняння (1) за деякими початковими даними, тобто в знаходженні рішення, що задовольняє наступним умовам:

$$\begin{aligned} u(z, \Gamma_0) &= q_0 \\ \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{\Gamma_0} &= q_1; \end{aligned} \quad (2)$$

де  $q_0, q_1$  – задані обмежені функції.

Як відомо, рішення цієї задачі є нестійким, чезре те що не виконується третя умова коректності по Адамару і, отже, задача є некоректно поставленою.

До порівняно недавнього часу некоректні задачі вважалися позбавленими фізичного сенсу і практичної цінності. Але, як показали подальші дослідження, нестійкі рішення виникають при описі багатьох реальних фізичних явищ [9,10].

У роботах Тихонова сформульовано нове визначення коректності, яке відомо, як коректність по Тихонову[8].

Великий клас задач, описується в абстрактній формі операторними рівняннями першого роду

$$A \cdot u = f, \quad (3)$$

де  $u, f$  – відповідно шуканий і даний елементи деяких просторів  $U$  і  $F$ ;

$A$  – задане відображення (оператор), що діє з простору  $U$  в простір  $F$ .

Так от, завдання (3) називається коректно поставленим по Тихонову, або умовно-коректним завданням, якщо виконані наступні умови:

- апіорі відомо, що рішення задачі (3) існує і належить деякій заданій множині  $M \in U$ , тобто  $f \in N = AM$ ;
- рішення єдине на безлічі  $M$ , тобто оператор обертаємий на безлічі  $M$ ;
- існує безперервна залежність рішення  $u$  від правої частини  $f$ , коли варіації  $f$  не виводять рішення за межі безлічі  $M$ , тобто оператор  $A^{-1}$  безперервний у відноській топології безлічі  $N$ .

Отже, коректність по Тихонову відрізняється від коректності по Адамару звуженням класу можливих рішень до безлічі  $M$  (чи, що те ж саме, звуженням можливих правих частин  $f$  до безлічі  $N$ ).

Досліджуване завдання (1, 2) відносять до умовно-коректного або коректного по Тихонову. Для ефективного розв'язання нестійких завдань створені спеціальні регулярні методи, ґрунтовані на заміні початкового некоректного завдання завданням або послідовністю завдань коректних в звичайному сенсі.

Для низки нестійких задач математичної фізики Р. Латтесом і Ж. Лионсом розроблений метод квазізвернення, який може бути застосований, як для еволюційних задач, так і стаціонарних [11]. Зокрема, нестационарні процеси є типовими для системи електропостачання електричних локомотивів [12, 13].

Є нескінченна безліч можливих способів квазізвернення, ґрунтованих на одній і тій же ідеї – змінити "систему" так, щоб некоректне завдання перетворилося на коректне. Основна ідея методу квазізвернення полягає в належній зміні диференціальних операторів, що входять в завдання. Ця зміна робиться введенням додаткових диференціальних членів, які відповідають наступним умовам:

по-перше, вони – досить "малі" (можуть прямувати до нуля);

по-друге, "вироджуються на межі" (для того, щоб, наприклад, усунути ті, що виникають з введенням нових членів складні граничні умови, а також умови, в які можуть увійти невідомі, такі, що підлягають визначенню).

Побудовані таким чином оператори мають, як правило, більш високий порядок.

**Мета статті.** Метою дослідження являється розрахунок розподілу магнітного поля з високим ступенем інтенсивності і неоднорідності в повітряному зазорі відкритих осесиметричних магнітних систем чисельними методами. Для використання чисельних методів розрахунку необхідно вирішити наступні завдання

- дослідити рішення рівняння Лапласа в приватних похідних для зовнішньої граничної задачі, яку відносять до умовно – коректних;
- проаналізувати спеціальні регулярні методи заміни початкової некоректної задачі задачею або послідовністю задач коректних в звичайному сенсі;
- дослідити застосування методу квазізвернення для чисельного рішення зовнішньої граничної задачі розподілу поля відкритих магнітних систем.

**Результати дослідження.** На рис.1 зображено область  $\Omega$ , в якій необхідно знайти розподіл скалярного магнітного потенціалу. Для вирішення застосований метод квазізвернення [11], згідно якого необхідно знайти рішення не операторного рівняння Лапласа

$$A \cdot u = 0 \tag{4}$$

з граничними умовами

$$u(z, D/2) = q_0;$$

$$\begin{aligned} \partial u / \partial r |_{(r = D/2)} &= q_1 \text{ при} \\ -b - \delta/2 < z < b + \delta/2; \end{aligned} \tag{5}$$

а рівняння

$$\frac{1}{\varepsilon_1^2} A^* (M_{\varepsilon_0}^2 A u_\varepsilon) - \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_{\varepsilon_0}^2 a_{i,j} \frac{\partial u_\varepsilon}{\partial x_j}) + a_0 u_\varepsilon = 0, \tag{6}$$

що задовольняє граничним умовам (5).

У рівнянні (6):

$A$  – еліптичний диференціальний оператор другого порядку, в загальному вигляді який визначається таким чином:

$$\begin{aligned} A &= - \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} \left( a_{i,j}(x) \frac{\partial}{\partial x_j} \right) + a_0, \\ a_{i,j} &\in C^3(\bar{\Omega}), a_0 \in C^0(\bar{\Omega}); \end{aligned}$$

$C^3(\bar{\Omega})$  - простір функцій що мають третю безперервну похідну в області  $\bar{\Omega}$  ;

$C^0(\bar{\Omega})$  - простір безперервних функцій в області  $\bar{\Omega}$  ;

$A^*$  – еліптичний диференційний оператор, пов'язаний оператору  $A$ .

Функції  $M_{\varepsilon_0}$  і  $\rho_{\varepsilon_0}$  у рівнянні (6) визначаються таким чином (рис.2,3):

$$M_{\varepsilon_0}(x) = 1, \text{ якщо } d(p, \Gamma_1) \geq 2\varepsilon_0, x \in \Omega;$$

$$M_{\varepsilon_0}(x) = 0, \text{ якщо } d(p, \Gamma_1) < \varepsilon_0;$$

$M_{\varepsilon_0}(x)$  безперервно змінюється від 0 до 1 в останній частині  $\Omega$  ;

$$\rho_{\varepsilon_0}(x) = 1, \text{ якщо } d(p, \Gamma_1) \geq \varepsilon_0;$$

$$\rho_{\varepsilon_0}(x) = d(p, \Gamma_1) \frac{1}{\varepsilon_0}, \text{ якщо } d(p, \Gamma_1) < \varepsilon_0.$$

де  $d(p, \Gamma_1)$  - відстань довільної точки  $p$  до межі  $\Gamma_1$  (див. рис. 2,3),  $p \in \Omega$ .

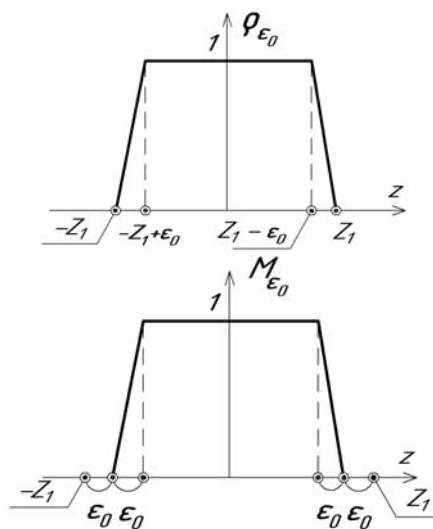


Рис. 2. До визначення функцій  $M_{\varepsilon_0}$  і  $\rho_{\varepsilon_0}$ .

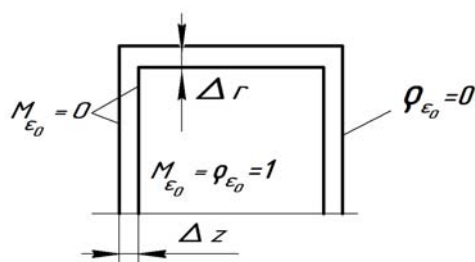


Рис. 3. Граничні значення функцій для  $\varepsilon_0 = \Delta z = \Delta r$

Введемо оператор  $A_{\varepsilon_0}$ , що є "апроксимацією" оператора  $A$  ("яка вироджується на границі  $\Gamma_1$  ")

$$A_{\varepsilon_0} = - \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho_{\varepsilon_0}^2 a_{i,j} \frac{\partial}{\partial x_j} \right) + a_0,$$

Рівняння (6) набуває вигляду:

$$\frac{1}{\varepsilon_i^2} A^* (M_{\varepsilon_0}^2 A u_\varepsilon) + A_{\varepsilon_0} u_\varepsilon = 0 \tag{7}$$

Гранична функція  $u$  повинна задовольняти рівнянню

$$Au = 0.$$

Згідно з методом квазізвернення, завдання (6) або, що те ж саме, (7) з початковими умовами (5) визначають  $u_\varepsilon$  єдиним чином і поставлена коректно.

Звернемо увагу на наступне:

- еліптичний диференціальний оператор в рівнянні (6) четвертого порядку усередині області  $\Omega' = \Omega_{\varepsilon_0}$ , тут  $\Omega'$  (чи  $\Omega_{\varepsilon_0}$ ) – відкрита множина в області  $\Omega$  виду  $\Omega' = \{x \mid d(x, \Gamma_1) \leq \varepsilon_0\}$ ,

- цей оператор вироджується в проміжній межі  $d(x, \Gamma_1) = \varepsilon_0$ , так, що крім умов (5), не потрібно ніяких інших граничних умов.

Таким чином (відповідно до загальної ідеї квазізвернення), некоректне завдання замінене сімейством коректних завдань. На практиці, вибравши  $\varepsilon$ , де  $\varepsilon = \{\varepsilon_0, \varepsilon_1\}$  безпосередньо вирішують задачу (5, 6) з використанням чисельних методів розрахунку [14–15].

**Висновки.** Для розрахунку розподілу магнітного поля в міжполюсному просторі відкритих осесиметричних магнітних систем необхідно вирішити задачу Коші для рівняння Лапласа, яка відноситься до умовно – коректних. Для регуляризації завдання використаний метод квазізвернення, головна ідея якого полягає в зміні диференціальних операторів у рівнянні, що описує розподіл скалярного магнітного потенціалу. Використання методу квазізвернення для досліджуваної зовнішньої граничної задачі дозволяє ефективно використати чисельні методи розрахунку розподілу магнітного поля для відкритих осесиметричних систем.

#### Література

1. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM. М.: Академия, 2005. 336 с.
2. Андреева Е.Г., Татевосян А.А., Семина И.А. Исследование осесимметричной модели магнитной системы открытого типа. Омский научный вестник. 2010. Вып.1(87). С.110-113.
3. Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry / Camacho J.M., Sosa V. // Revista Mexicana de Física. 2013. Vol. 59. P. 8–17.
4. Steinbach O. Numerical approximation methods for elliptic boundary value problems. New York: Springer, 2008.
5. Sivak S. Boundary Element Method for eddy current problem // Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), 2014 12th International Conference on. IEEE. 2014. С. 207–214.
6. Kuczmann M. Potential formulations in magnetism applying the finite element method // Lecture notes, Laboratory of Electromagnetic Fields, “Széchenyi István” University, Győr, Hungary. 2009.
7. Самарский А.А., Вабищев П.Н. Численные методы решения обратных задач математической физики: Учеб-

ное пособие. Изд.3-е. М.: Издательство ЛКИ, 2009. 480с.

8. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. 7-е изд. М.: Наука, 2004. 798 с.
9. Кабанихин С. И. Обратные и некорректные задачи. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2018. 511с.
10. Воронин А.Ф., Ковтанюк А.Е., Лаврентьев М.М. Краевая задача Римана в исследовании корректности линейных и нелинейных задач математической физики. Сиб. электрон. матем. изв. 2010. Вып.7. С. 112–122.
11. Султанов М.А., Калматаева Б.Б. О решении граничной обратной задачи для параболического уравнения методом квазиобращения. Научные труды ЮКГУ им.М.Ауэзова. 2016. Вып.1(36). С. 63–67.
12. Gorobchenko O., Tkachenko V. Statistical analysis of locomotives traction motors performance. // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 287, p. 04002. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928704002>.
13. Goolak S., Gerlici J., Saponova S., Tkachenko V., Lack T., & Kravchenko K. Determination of Parameters of Asynchronous Electric Machines with Asymmetrical Windings of Electric Locomotives. // Communications-Scientific letters of the University of Zilina, 2019. 21(2), 24-31. ISSN 2585-7878.
14. Finite element formulation with coupled vector-scalar magnetic potentials for eddy current problems // 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2016). IEEE. 2016. С. 456–460.
15. Yufeng L., Fengtao Y. Research progress and development trend of permanent magnetic separators in China and abroad // Proceedings of 3rd International Conference on Vehicle, Mechanical and Electrical Engineering (ICMVEE). U.S.A. 2016. <https://doi:10.12783/dtettr/icvmee2016/4873>.

#### References

1. Bul O.B. (2005). Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov. Magnitnyye tsepi, polya i programma FEMM [Calculation methods for magnetic systems of electrical apparatus. Magnetic circuits, fields and the FEMM]. Moscow: Akademiya [in Russian].
2. Andreeva E.G., Tatevosyan A.A., Semina I.A. (2010). Issledovanie osesimmetrichnoy modeli magnitnoy sistemyi otkryitogo tipa [Research of an axisymmetric model of an open type magnetic system]. Omskiy nauchnyiy vestnik – Omsk Scientific Bulletin, Issue 1 (87), 110-113 [in Russian].
3. Camacho J.M., & Sosa V. (2013). Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry. Revista Mexicana de Física, 59, 8–17.
4. Steinbach, O. (2008). Numerical Approximation Methods for Elliptic Boundary Value Problems. Finite and Boundary Elements. (1 ed.) New York: Springer.
5. Sivak S. (2014). Boundary Element Method for eddy current problem. 12th International Conference on. IEEE. 207–214.
6. Kuczmann M. (2009). Potential formulations in magnetism applying the finite element method. Fields. “Széchenyi István” University.
7. Samarskiy A.A., Vabishchev P.N. (2009). Chislennyye metody resheniya obratnykh zadach matematicheskoy fiziki [Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics]. Moscow: Publishing house LCI [in Russian].

8. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. (2004). *Uravenniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka [in Russian].
9. Kabanikhin S. I. (2018). *Obratnyye i nekorrektnyye zadachi* [Inverse and ill-posed problems]. Novosibirsk: Publishing House of the SB RAS [in Russian].
10. F. Voronin, A. Ye. Kovtanyuk, M. M. Lavrent'yev. (2010). *Krayevaya zadacha Rimana v issledovanii korrektnosti lineynykh i nelineynykh zadach matematicheskoy fiziki* [The Riemann boundary value problem in the study of the correctness of linear and nonlinear problems in mathematical physics] *Sib. elektron. matem. izv. – Sib. electron. mate. izv.* Issue 7. 112–122 [in Russian].
11. Sultanov M.A., Kalmatayeva B.B. (2016). *O reshenii granichnoy obratnoy zadachi dlya parabolicheskogo uravneniya metodom kvaziobrashcheniya* [On the solution of the boundary inverse problem for a parabolic equation by the quasi-inversion method] *Nauchnyye trudy YUKGU im.M.Auezova – Scientific works of SKSU named after M. Auezov.* Issue 1 (36). 63-67 [in Russian].
12. Gorobchenko, O., & Tkachenko, V. (2019). *Statistical analysis of locomotives traction motors performance.* MATEC Web of Conferences. 287, 04002. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928704002>.
13. Goolak, S., Gerlici, J., Sapronova, S., Tkachenko, V., Lack, T., & Kravchenko, K. (2019). *Determination of Parameters of Asynchronous Electric Machines with Asymmetrical Windings of Electric Locomotives.* *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, 21(2), 24-31. ISSN 2585-7878.
14. Royak M. (2016). *Finite element formulation with coupled vector-scalar magnetic potentials for eddy current problems.* *IEEE 11th International Forum on Strategic Technology*, 456–460.
15. Yufeng L., Fengtao Y. (2016). *Research progress and development trend of permanent magnetic separators in China and abroad.* *Proceedings of 3rd International Conference on Vehicle, Mechanical and Electrical Engineering (ICMVEE).* U.S.A. <https://doi:10.12783/dtetr/icvme2016/4873>.

**Спивак А.Н., Ткаченко В.П., Мелконова И.В.**  
**Особенности расчета магнитного поля открытых осесимметричных магнитных систем**

*В статье рассмотрены исследования распределения магнитного поля в межполюсных промежутке открытых осесимметричных магнитных систем. Получены уравнения с граничными условиями, решение которого позволяет сократить объем дальнейших численных методов расчетов. Для ряда неустойчивых задач математической физики Р.Латтесом и Ж.Лионсом разработан метод квазизвернення, который может быть применен как для эволюционных задач, так и стационарных. Основная идея метода квазизвернення заключается в надлежащей изменении дифференциальных операторов, входящих в задачу. Это изменение делается введением дополнительных дифференциальных членов. Применение этого метода позволяет эффективно использовать численные методы расчета краевой задачи для открытых осесимметричных систем.*

**Ключевые слова:** *скалярное магнитный потенциал, напряженность магнитного поля, граничные условия.*

**Spivak O.M., Tkachenko V.P., Melkonova I.V.**  
**Peculiarities of calculation of magnetic field parameters of open easysymmetric magnetic systems**

*Important characteristic of magnetic-field with the high measure of intensity and heterogeneity in the swept volume of the electromagnetic systems is a size of tension of the field H. Calculation of tension in the field H in these systems, characterized by relatively large air interval, given its three-dimensionality, presents a very difficult task.*

*Analytical solution of Laplace equation that describes distribution of magnetic-field in the interpolar volume of the axisymmetrical magnetic systems, is difficult because of complexity of geometry of bodies that are included in a calculation area, therefore, in order to investigate the distribution of tension it is appropriate to use the numeral methods of calculation - finite difference method, finite element method, boundary integral equation method.*

*The calculation of distribution of scalar magnetic potential in open magnetic systems with the use of numeral methods of calculation causes the difficulties related to limitation of calculation area in which the calculation is conducted.*

*The static magnetic fields, analysed in this research, obey one of basic equalizations of mathematical physics, and namely, to equalization of Laplace in partial differential.*

*In case of calculation of magnetic field of the axisymmetrical magnetic systems it is necessary to resolve the Cauchy problem for equalization of Laplace. It is known, that this task does not have characteristic of steadiness, and thus does not obey Hadamard's third condition of correctness and, therefore, is considered incorrectly defined.*

*For the number of unsteady tasks of mathematical physics of R.Lattes and J.Lions developed the quasi-random method, that can be applied both for evolutionary tasks, as well as for constant. The basic idea of quasi-random method lays in proper update of differential operators that are part of the task. This change is done by introducing additional differential elements. Application of this method allows to use effectively the numeral methods of calculation of regional task for open axisymmetrical systems.*

*This change is made by introducing additional differential terms. The application of this method allows to effectively use numerical methods for calculating the boundary value problem for open axisymmetric systems.*

**Keywords:** *scalar magnetic potential, magnetic field strength, boundary conditions.*

**Спивак О.М.** – к.т.н., доцент кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць» Державного університету інфраструктури та технологій, alexsri@ukr.net

**Ткаченко В.П.** – д.т.н., професор, завідувач кафедри «Тяговий рухомий склад залізниць» Державного університету інфраструктури та технологій, v.p.tkachenko.detut@gmail.com

**Мелконова І.В.** – старший викладач кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, inna.mia.lg@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-264-8-51-55>

УДК 629.12-8:629.12.037

## УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ГРЕБНИМИ ЕЛЕКТРОРУШІЯМИ ПРИ ПЛАВАННІ В УМОВАХ ХИТАВИЦІ

Тараненко С.В., Пріступа С.В., Колесник В.В., Пастух О.В., Голубєва С.М.

## IMPROVEMENT OF THE CONTROL SYSTEM BY ROWING ELECTRIC MOTORS DURING SWIMMING IN ROLLING CONDITIONS

Taranenko S.V., Pristupa S.V., Kolesnik V.V., Pastukh O.V., Golubieva S.M.

У статті розглянуто питання управління судном з електрорушієм в умовах хитавиці. При ході судна в умовах хвилювання дизель-генератор працює в режимах перевантаження, що значно скорочує експлуатаційні характеристики пропульсивного комплексу. Аналіз хитавиці судна, вказує на випадковий характер постійно діючого обурення різної величини і тривалості. При роботі ГЕУ в таких умовах мають місце коливання моменту опору на гребному валу (якщо відсутнє відповідне регулювання збудження ГЕД), моментів опору на валах дизелів, що визначаються електромагнітними моментами генераторів. Квазістаціонарний характер зміни моменту пояснюється таким же характером зміни моменту опору обертанню гребного гвинта. Стабілізацію кутової швидкості можливо досягти зміною упору лопатей азіподу (ГРК), а, отже удосконалити систему управління ГРК.

**Ключові слова:** система управління гребними електродвигунами, азіпод, закони управління, електромагнітний момент.

**Вступ.** При роботі гребний електричної установки (ГЕУ) в екстремальних умовах, наприклад, при ході судна на хвилюванні, можуть виникати неприпустимі навантаження, здатні викликати аварію первинних двигунів [2]. Дизель-генератори вкрай чутливі до перевантажень. Вони здатні витримати перевантаження по напрузі не більше 25% до 0,5 години. При ході судна в умовах хвилювання зміна моменту генератора така, що дизель працює в діапазоні від режимів, відповідних їх зовнішній характеристиці при перевантаженні, до режимів, відповідних нульовій подачі палива [2].

Дослідженням перехідних процесів у системі управління гребними електрорушіями приділили увагу Яровенко В.А., Черников П.С., Варбанец Р.А., Зарицкая Е.И., Подлях А.Е. та інші.

**Мета дослідження** полягає в удосконаленні системи управління ГЕУ, яка б зменшила вплив коливання визначених параметрів (кутова швидкість, на-

пруга, потужність) гребного електрорушія, тобто скоротила термін перехідних процесів та амплітуду визначених параметрів.

**Результати дослідження.** В роботі розглянута система управління ГЕУ на прикладі електроенергетичної системи танкера, до складу якої входить гребна електрична установка змінного струму з перетворювачами частоти з проміжною ланкою постійного струму і гребними синхронними електродвигунами. Танкер забезпечений двома гвинтурольовими колонками типу Azipod.

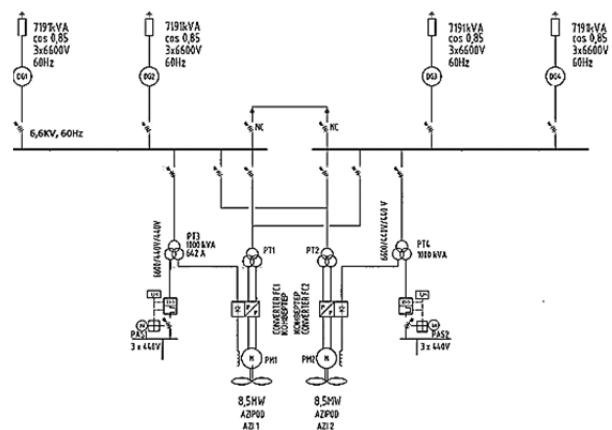


Рис. 1. Система управління ГЕУ танкера

До складу СЕЕС (рис.1) входять чотири головних дизельні двигуни 9L38, кожен номінальною потужністю 6525 кВт, 600 об/хв, головні генератори фірми АВВ на 7190 кВА (5752 кВт при  $\cos \varphi = 0,85$ ). Генератори підключені до головних розподільчих щитів (6,6 кВ/60 Гц). Перетворювачі частоти інверторного типу підключені до головних розподільними шинами через трьохобмотувальні

трансформатори з вторинною напругою 1744В. Використовуються гребні синхронні електродвигуни (ГЕД) з електромагнітним збудженням в складі системи Azipod.

У схемі регулювання частоти обертання задаючим сигналом регулятора швидкості є результуючий сигнал при послідовному проходженні блоку завдання швидкості, фільтра і задатчика інтенсивності. Регулятор швидкості являє собою ПІ-регулятор, вихідний сигнал якого визначає поточну частоту обертання гребного гвинта. Вихідний сигнал регулятора обмежується при досягненні граничних значень ряду параметрів системи. Вихідний сигнал регулятора подається в якості задаючого сигналу крутного моменту безпосередньо на перетворювач частоти (рис.2).

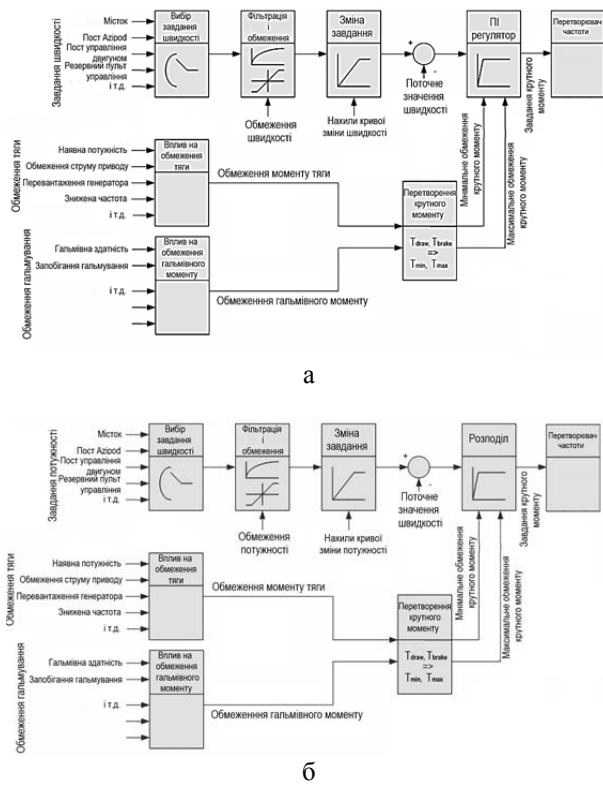


Рис. 2. Схема регулювання швидкості (а) та потужності (б)

Схема регулювання потужності відрізняється від схеми регулювання швидкості тим, що задаючим сигналом для регулятора потужності є завдання потужності, а функція управління представляє собою функцію розподілу замість ПІ-регулятора. Остаточне завдання потужності ділиться на поточну швидкість, щоб отримати в результаті задаючого сигналу крутного моменту. Завдання крутячого моменту обмежується, як і в разі регулювання швидкості, і подається в перетворювач частоти.

У період розгону гребного двигуна і ходу при малих потужностях, коли потужність гребного електричного двигуна не перевищує 10% від номінального значення, здійснюється принцип управління з регулюванням швидкості, при подальшому збіль-

шенні потужності система автоматично переходить на управління з регулюванням потужності. Залежність частоти обертання і потужності наведена на рис.3.

На танкері використовується перетворювач частоти (ПЧ) з ланкою постійного струму. Як спосіб частотного управління синхронним ГЕД використовується пряме управління моментом (Direct Torque Control - DTC).

На відміну від векторного управління, де зміна моменту проводиться шляхом дії на струм статора, який, таким чином, є керованою величиною, в системі з прямим управлінням моментом керованою величиною є потокозчеплення статора.

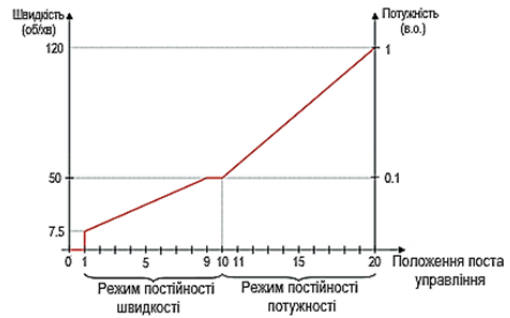


Рис. 3. Залежність частоти обертання і потужності ГЕУ

Зміна потокозчеплення досягається шляхом оптимального перемикання ключів інвертора напруги, від якого живиться гребний синхронний електродвигун. Метод DTC не потребує координатних перетворень і широтно-імпульсної модуляції, при цьому забезпечуються найменші комутаційні втрати.

Функціональна схема управління наведена на рис. 4.

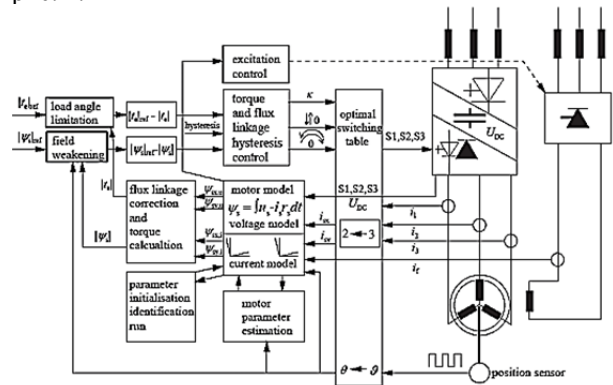


Рис. 4. Функціональна схема управління ГЕУ:  $\psi_{sx,u}$ ,  $\psi_{sy,u}$  - складові потокозчеплення статора в моделі напруги в  $xu$ -координатах;  $\psi_{sx,i}$ ,  $\psi_{sy,i}$  - складова потокозчеплення статора в моделі струму в  $xu$ -координатах;  $i_{sx}$ ,  $i_{sy}$  - складові струму статора в  $xu$ -координатах;  $i_f$  - струм збудження ротора

Алгоритм роботи системи DTC реалізується в такий спосіб. Спочатку визначається вектор потокозчеплення статора  $\psi_s$  і електромагнітний момент

синхронного двигуна  $M$ . Потім модуль вектора потокозчеплення статора і момент порівнюються з заданими значеннями  $(|\psi_s|_{ref} - |\psi_s|)$  та  $(t_e|_{ref} - |t_e|)$ . Після чого за допомогою компараторів (релейними регуляторами), формуються логічні сигнали помилки (0 або 1). На підставі цих сигналів і знання положення вектора потокозчеплення на площині базових векторів, вибирається така комбінація станів ключів інвертора, при якій буде сформовано базовий вектор напруги, що мінімізує відхилення потокозчеплення статора і електромагнітного моменту від заданих значень. Таким чином, в результаті роботи системи модуль потокозчеплення статора і електромагнітний момент будуть постійно перебувати в зоні допустимого відхилення від заданого значення, що визначається величиною гістерезису відповідного регулятора. Вибір базового вектора залежить від сектора, в якому в даний момент знаходиться вектор  $\psi_s$  здійснюється за допомогою таблиці (Optimal Switching Table). Головними керуючими блоками є: релейний блок з гістерезисом для управління крутним моментом та потокозчепленням, блок з таблицею оптимальної комутації, модель розрахунку фактичних значень потокозчеплення статора і моменту двигуна, регулятор потокозчеплення для ослаблення поля, обмежувач кута навантаження для утримання приводу в стабільній робочій зоні, блок контролю збудження. Блок контролю збудження здійснює контроль коефіцієнта потужності при швидко змінюються навантаженнях з метою підвищення стійкості приводу [3].

При розгляді питання гальмування і реверсу судна потрібно враховувати, що енергія, яка повертається в мережу двигуном, може гаситися тільки на гальмівному резисторі, так як її передача в суднову мережу для використання є неможливою. При рекуперації в мережу живлення потужність приводу повороту гвинто - рульової колонки (ГРК) буде менше, ніж при другому способі гальмування судна. В [3] показано, що гальмування ГЕУ із застосуванням гальмівних резисторів може бути використано в якості основного способу на судах з прямою передачею крутного моменту на гвинт. На судах з гвинто-рульовими колонками цей вид гальмування доцільно застосовувати при зупинці ГЕД, а гальмування і реверс судна здійснювати розворотом гвинто-рульових колонок. Так, розворот Azipod на  $180^\circ$  займає 20 - 25 с.

У синхронному двигуні з перетворювачем частоти з ланкою постійного струму при зміні знака потужності двигуна  $R_t$  змінюється і напрямок струму в ланці постійного струму  $I_d$ . Це призводить до заряду конденсатора  $C$  струмом  $I_d$ . Напруга на конденсаторі  $U_d$  росте, але воно не повинно перевищити допустимих значень. У зв'язку з цим основна частина енергії гальмування передається на гальмівні резистори  $R_t$ , які управляються тиристорним ключем  $VSt$  (рис. 5).

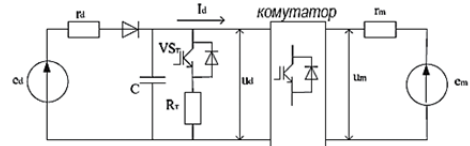


Рис. 5. Електрична схема управління ГЕД при гальмуванні

Система управління ключем побудована за сигналом напруги в ланці постійного струму  $U_d$ .

Зворотній зв'язок по напрузі на конденсаторі є основною. Інтенсивність гальмування визначається енергією гальмування ГЕД, яка залежить від наступних параметрів: швидкості ходу судна, частоти обертання гвинта, інтенсивності зміни режимів роботи судна судноводієм. У разі гальмування судна за допомогою реверсування ГЕД, він переходить в режим гідротурбіни за рахунок підкручування потоку води і реалізує необхідну рекуперативну потужність, частина якої йде на підкручування гребного гвинта.

**Висновки.** Побудова єдиної електроенергетичної системи танкера на базі мережі постійного струму спростить алгоритм гальмування гребних електродвигунів. При цьому енергія гальмування, що генерується в одному гребному електродвигуні, може передаватися на інші інвертори по загальній шині постійного струму без споживання енергії з мережі живлення. Використання частотного способу управління синхронним ГЕД у вигляді прямого керування моментом (DTC) дозволяє забезпечити високу швидкість і точність реалізації як рухових, так і гальмівних режимів ГЕУ танкера. У разі реверсу судна за допомогою розвороту Azipod на  $180^\circ$  при ході судна у вільній воді необхідно враховувати підвищені навантаження при розрахунку потужності приводу повороту Azipod.

#### Л і т е р а т у р а

1. Тараненко С.В., Приступа С.В., Колесник В.В., Пастух О.В., Гойжевський О.В./Управління гребними електродвигунами при плаванні в умовах хитавиці// Водний транспорт. - 2020. - №1(29). - с. 53-57.
2. Оптимальное управление гребными электродвигателями электроходов при реверсировании / В.А. Яровенко, П.С. Черников, Р.А. Варбанец, Е.И. Зарицкая // Электротехника і електромеханіка. — 2018. — № 6. — С. 38-46.
3. Расчет и выбор тормозных резисторов гребной электрической установки танкера ледового класса/В. А. Малышев, В. С. Иванов, В. С. Соловей// Вестник ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, №5 (39), - 2016, - с. 172-184.
4. Яровенко В.А., Черников П.С. Метод расчета переходных режимов гребных электроэнергетических установок // Электротехника і електромеханіка. – 2017. – №6. – С. 32-41.
5. Яровенко В.А. Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов. – Одесса: «Маяк», 1999. – 188 с.
6. Черников П.С., Яровенко В.А., Зарицкая Е.И. Влияние параметров электроходов на показатели качества рабо-

ты электроэнергетических установок при маневрировании // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Електричні машини та електроμηχανічне перетворювання енергії». – 2018. – №5(1281). С. 46-54.

#### References

1. Taranenko S.V., Pristupa S.V., Kolesnik V.V., Pastukh O.V., Goyzhevsky O.V. / Management of electric ridge electric crashes when swimming in the heads of hitavits // Water transport. - 2020. - №1 (29). - from. 53-57.
2. Optimal control of propulsion electric motors of electric ships when reversing / V.A. Yarovenko, P.S. Chernikov, R.A. Varbanets, E.I. Zaritskaya // Electrical Engineering and Electrical Engineering. - 2018. - No. 6. - P. 38-46.
3. Calculation and selection of braking resistors of the propulsion electric installation of an ice-class tanker / B. A. Malyshev, V. S. Ivanov, V. S. Solovey // Bulletin of the GUMRF im. adm. S.O. Makarova, No. 5 (39), - 2016, - p. 172-184.
4. Yarovenko V.A., Chernikov P.C. Method for calculating transient modes of propeller electric power plants // Elektrotehnika i elektromekhanika. - 2017. - No. 6. - S. 32-41.
5. Yarovenko V.A. Calculation and optimization of transient modes of propulsion complexes of electric ships. - Odessa: "Mayak", 1999. - 188 p.
6. Chernikov P.C., Yarovenko V.A., Zaritskaya E.I. Influence of parameters of electric ships on performance indicators of electric power plants during maneuvering // Bulletin of NTU "KhPI". The series "Electric machines and electro-mechanical re-development of energy". - 2018. - No. 5 (1281). S. 46-54.

**Тараненко С.В., Приступа С.В., Колесник В.В., Пастух А.В., Голубева С.М. Совершенствование системы управления гребными электрическими установками при плавании в условиях качки**

*В статье рассмотрены вопросы управления судном с электродвигателем в условиях качки. При ходе судна в условиях качки дизель-генератор работает в режимах перегрузки, что значительно сокращает эксплуатационные характеристики propulsionного комплекса. Анализ качки судна, указывает на случайный характер постоянно действующего возмущения различной величины и продолжительности. Судно снабжено двумя винто-рулевыми колонками типа Azipod. Представлены схемы главного тока и системы автоматического управления гребной электрической установки в режимах стабилизации частоты вращения и мощности гребного электродвигателя. В состав системы управления судном входит гребная электрическая установка переменного-переменного тока с преобразователями частоты с промежуточным звеном постоянного тока и гребными синхронными электродвигателями. В отличие от векторного управления в системе с прямым управлением моментом управляемой величиной является потокосцепление статора. При работе гребной электрической установки в таких условиях имеют место колебания момента сопротивления на гребном валу (если отсутствует соответствующее регулирование возбуждения гребного электрического двигателя), моментов сопротивления на валах дизелей, которые определяются электромагнитными моментами генераторов.*

*Рассмотрен алгоритм прямого управления моментом синхронного гребного электродвигателя, основными достоинствами которого, по сравнению с векторным управлением, являются более простая программная реализация и обеспечение большего быстродействия. Задачей прямого управления моментом является обеспечение быстрой реакции электромагнитного момента на управляющее и возмущающее воздействия. Квазистационарный характер изменения момента объясняется таким же характером изменения момента сопротивления вращению гребного винта. Стабилизации угловой скорости можно достичь изменением упора лопастей Azipod винто-рулевых колонок (ГРК), а, следовательно, усовершенствовать систему управления ГРК. Для перераспределения тормозной энергии перспективным направлением является исполнение единой электроэнергетической системы судна на базе сети постоянного тока.*

**Ключевые слова:** система управления гребными электродвигателями, азипод, законы управления, электромагнитный момент.

**Taranenko S.V., Pristupa S.V., Kolesnik V.V., Pastukh O.V., Golubieva S.M. Improvement of the control system by rowing electric motors during swimming in rolling conditions**

*The article deals with the ship control issues with an electric motor in rolling conditions. During the course of the vessel in rocking conditions, the diesel generator operates in overload modes, which significantly reduces the operational characteristics of the propulsion system. The analysis of the ship's pitching indicates the random nature of the constantly acting disturbance of various magnitude and duration. The vessel is equipped with two Azipod propeller- steering columns (PSC). The schemes of the main current and automatic control system electric propeller installation in the modes of stabilization of frequency of rotation and capacity of the propeller of the motor are presented. The ship control system includes an alternating-alternating current electric propulsion system with frequency converters with an intermediate direct current (DC) link and propeller synchronous motors. The task of direct torque control is to ensure a fast response of the electromagnetic torque to the control and disturbance. In contrast to vector control in a system with direct torque control, the controlled variable is the stator flux linkage. Oscillations of the moment of resistance on the propeller shaft (if there is no appropriate regulation of the excitation of the rowing electric motor), moments of resistance on the shafts of diesel engines, which are determined by the electromagnetic moments of the generators, can occur during the operation of rowing electric installation (REI) in these conditions. The methods of the deceleration of the tanker, without reversing the propeller of the motor by reversal azimuth column and reverse propeller of the motor are considered. The quasi-stationary nature of the change of the moment is explained by the same nature of the change of the moment of resistance to the rotation of the rowing screw. The stabilization of the angular velocity can be achieved by changing the stop of the Azipod blades propeller- steering columns, and, consequently, to improve the PSC control system. For redistribution of braking energy, a promising direction is the implementation of the unified power system of the ship on the basis of the DC network.*

**Keywords:** the control system of the ridge electric motors, azipod, the laws of control, the electric moment.

---

**Тараненко С.В.** – к.т.н., доцент, завідувач кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, svtarsvni@ukr.net

**Пріступа С.В.** – старший викладач кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, s.svp2052@gmail.com

**Колесник В.В.** – к.т.н., ст. науч. співробітник, доцент кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, kolesnyk@email.ua

**Пастух О.В.** – старший викладач кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, alpastukh@ukr.net

**Голубєва С.М.** – старший викладач кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, glbvnu@gmail.com

Стаття подана 29.11.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-264-8-56-61>

УДК 621.316

## МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Філімоненко Н. М., Філімоненко К. В.

## POSSIBILITY OF APPLICATION OF ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT FOR REACTIVE POWER COMPENSATION AND INCREASING THE RELIABILITY OF ELECTRICITY SUPPLY

Filimonenko N. M., Filimonenko K. V.

*У статті розглянуто систему електропостачання підприємства хімічної промисловості. При проектуванні таких систем необхідно проводити вибір найбільш доцільного варіанту використання електрообладнання. Вибір здійснюється на основі всебічного аналізу технічних і економічних показників. Розглянуто рішення щодо забезпечення безаварійної роботи енергосистеми, яка живить підприємство хімічної промисловості. Для компенсації реактивної потужності, яка споживається електроустановками промислового підприємства, можуть бути застосовані синхронні компенсатори, а також використовуються синхронні машини.*

**Ключеві слова:** система електропостачання, енергосистема, компенсація реактивної потужності, синхронний турбогенератор.

**Вступ.** Для живлення електроприймачів особливої групи, якими є підприємства хімічної промисловості, крім двох основних джерел живлення електроприймачів I категорії повинно передбачатися третє незалежне джерело, що є достатнім для безаварійної зупинки виробництва.

В якості такого джерела може бути використана власна ТЕЦ. Потужність третього незалежного джерела має бути такою, що забезпечує живлення тільки електроприймачів особливої групи для безаварійної зупинки виробництва або для ліквідації аварії на основних джерелах.

По мірі розвитку електроспоживання ускладнюються й системи електропостачання підприємств. Виникає необхідність впроваджувати автоматизацію систем електропостачання промислових підприємств, здійснювати в широких масштабах диспетчеризацію процесів виробництва із застосуванням телесигналізації й телекерування й вести ак-

тивну роботу з економії електроенергії та підвищення ефективності її споживання.

Для компенсації реактивної потужності (РП), яка споживається електроустановками промислового підприємства, можуть бути застосовані синхронні компенсатори, а також використовуються синхронні машини.

**Постановка проблеми.** Важливою особливістю систем електропостачання є неможливість створення запасів основного використовуваного продукту – електроенергії. Вся отримувана електроенергія негайно споживається. При непередбачених коливаннях навантаження необхідна точна й негайна реакція системи керування, що компенсує виниклий дефіцит.

Системі електропостачання великого підприємства притаманна наявність глибоких внутрішніх зв'язків, які не дозволяють розщеплювати системний, комплексний підхід, що враховує взаємний вплив факторів і урахування їхньої динамічності. Під впливом різноманітних збурювань відбувається безперервна зміна стану системи.

Забезпечення надійності електропостачання електроенергетичних систем (ЕЕС) й мереж промислових підприємств 10-0,38 кВ займає центральне місце як при експлуатації, так і при проектуванні.

Слід зауважити важливість для підприємства компенсації РП для підвищення ефективності використання електричної енергії, зокрема способу, в який ця компенсація відбувається. Розглядається доцільність використання турбогенератора як компенсатора РП.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У сучасній електроенергетиці проблема компенсації реактивної потужності (КРП) є однією з основних.

Сьогодні, виходячи з теоретичних та з практичних міркувань, це питання розроблено досить детально. Встановлена потужність засобів компенсації реактивної потужності (ЗКРП) і необхідний діапазон регулювання визначаються з урахуванням режимів максимальних та мінімальних навантажень енергосистеми в межах доби, в літній і зимовий періоди. При виборі ЗКРП враховуються обмеження, що встановлені для генераторів за значенням і тривалістю споживання ними реактивної потужності [1, 2,3].

Витрати на пристрої для компенсації включають складові, що не залежать від величини реактивної потужності – тому була розроблена методика визначення потужності компенсуючих пристроїв, яка не потребує врахування абсолютних значень вартості елементів системи електропостачання. При зниженні реактивної потужності, що передається, втрати активної потужності зменшуються до 0,12 кВт/кВАр і залежать від віддаленості джерела живлення. При компенсації необхідно враховувати такі загальні вимоги: на відміну від активної реактивну потужність можна генерувати в будь-якій точці мережі; наближення джерел реактивної потужності до споживачів сприяє розвантаженню мережі; баланс реактивної потужності має бути витриманий для всіх вузлів системи електропостачання [4,5].

Зменшення споживання реактивної потужності є спеціальними заходами, що вимагають наявності пристроїв компенсації. Для компенсації РП, яка споживається електроустановками промислового підприємства, можуть бути застосовані синхронні компенсатори, а також використовуються синхронні двигуни та генератори.

Синхронні компенсатори по суті є синхронними двигунами полегшеної конструкції без навантаження на валу. Вони можуть працювати як в режимі генерації реактивної потужності (при перезбуджуванні компенсатора), так і в режимі її споживання (при недозбуджуванні). Зміна значення реактивної потужності компенсатора, що генерується або споживається, здійснюється регулюванням його збудження. В даний час промисловість виготовляє синхронні компенсатори потужністю від 5000 до 75000 кВАр. Втрати активної потужності в синхронних компенсаторах при їх повному завантаженні залежно від номінальної потужності коливаються в межах 0,32 – 0,15 кВт/кВАр, тобто складають значну величину.

До недоліків синхронних компенсаторів відносяться здорожчання й ускладнення експлуатації (в порівнянні, наприклад, з конденсаторними батареями) та значний шум під час роботи. Позитивними властивостями синхронних компенсаторів як джерел РП є можливість плавного і автоматичного регулювання величини реактивної потужності, що генерується, незалежність генерації реактивної потужності від напруги на їх шинах, достатня термічна і динамічна стійкість обмоток компенсаторів під час коротких замикань, можливість відновлення пош-

коджених синхронних компенсаторів шляхом проведення ремонтних робіт.

У залежності від первинного (привідного) двигуна (загалом, застосовують три види привідних двигунів: парові турбіни, гідротурбіни та двигуни внутрішнього згоряння – дизелі) генератори поділяють на турбогенератори, гідрогенератори та дизель-генератори.

Турбогенератори приводяться до обертання паровою турбіною й працюють на теплових та атомних електростанціях. Турбогенератор, зокрема, як і всі синхронні генератори має наступну властивість: при струмі збудження  $i_{f0,ном}$  та нульовій активній потужності ( $\theta = 0$ ) струм якоря машини буде практично дорівнювати нулю, а робота машини відбуватиметься з  $\cos\phi = 1$ . Якщо машину перезбуджувати, то струм якоря зростає й він є смісним, а якщо недозбуджувати, то струм якоря також зростає, але він є індуктивним. Здатність синхронної машини регулювати генерування / споживання реактивної потужності незалежно від активної, є цінною властивістю, яка широко використовується в електроенергетиці [6].

Залежність струму якоря від струму збудження  $I_a = f(i_f)$  для машини, яка працює на електричну мережу, називається *U-подібною характеристикою*. Типовий вигляд цієї залежності наведений на рис.1.

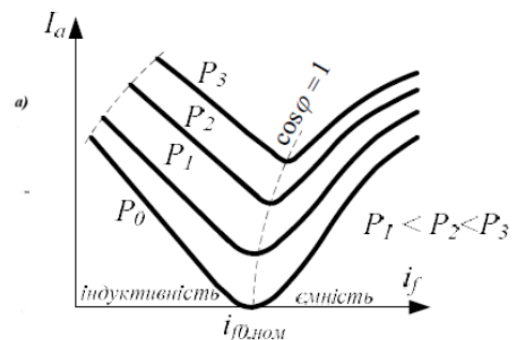


Рис. 1. U-подібні характеристики синхронної машини

Проведений аналіз літературних джерел показав, що вкрай необхідно підвищувати надійність електропостачання технологічних підприємств I категорії та забезпечувати компенсацію реактивної потужності за допомогою синхронних генераторів.

**Мета статті.** Метою роботи є аналіз питання компенсації реактивної потужності, що досягається завдяки використанню турбогенератора. Необхідно розглянути його технічні характеристики, які могли б задовольнити всім вимогам при проектуванні електропостачання виробництва хімічної промисловості (виробництво метанолу).

**Результати дослідження.** Для живлення електроприймачів особливої групи крім двох основних джерел живлення електроприймачів I категорії повинно передбачатися третє незалежне джерело, що є достатнім для безаварійної зупинки виробництва.

– *Схема електропостачання виробництва.* В якості такого джерела може бути використана, наприклад, власна ТЕЦ. Потужність третього незалежного джерела має бути такою, щоб забезпечити живлення тільки електроприймачів особливої групи для безаварійної зупинки виробництва або до ліквідації аварії на основних джерелах.

На рис. 2 показана спрощена схема електропостачання виробництва. Забезпечення електроенергією відбувається від трьох джерел живлення: двох вводів від ГПП та турбогенератора. Це забезпечує електроенергією технологічне обладнання як у нормальному, так і у аварійному режимах роботи.

Глибокий ввід живильних ліній на території підприємств і відпайки від ліній системи, що проходять, стають основними способами живлення підприємств, при яких відбувається органічне злиття живильних мереж з розподільними мережами першого ступеню розподілу енергії. В даний час ця прогресивна система міцно ввійшла в повсякденну практику. Під глибоким вводом тепер практично маються на увазі лінії напругою 35, 110, 150, 220 кВ, що проходять по території підприємства з відпайками від них до найбільш великих пунктів споживання енергії.

Нормальний технологічний режим має місце при наявності двох вводів 6 кВ енергосистеми та за роботи турбінного генератора (ТГ) 6 кВ. При відключенні одного з вводів 6 кВ від енергосистеми та працюючому ТГ зберігається два незалежних джерела живлення, що також дорівнює нормальному режиму.

Тривалий режим роботи при відключених двох ввводах 6 кВ від енергосистеми та при працюючому ТГ, можливо віднести до передаварійного з необхідністю планового зниження продуктивності для подальшої зупинки, якщо відновлення в роботі хоч би одного мережевого джерела живлення відкладається на невизначений час.

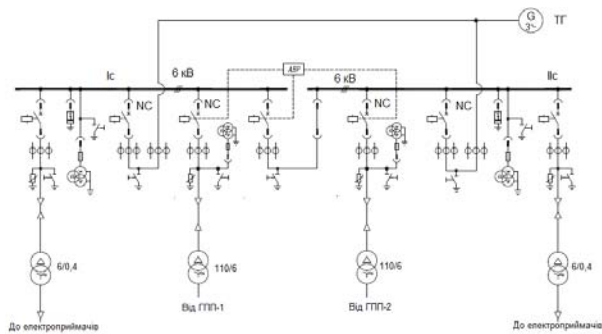


Рис. 2. Спрощена схема електропостачання підприємства особливої групи

– *Компенсація реактивної потужності.* На виробництві взятий до встановлення синхронний турбогенератор типу ТГП 6 кВ із номінальною потужністю до 12 МВт при випереджувальному коефіцієнті потужності 0,8 та виробленні реактивної

потужності (випереджувальній) до 9000 кВАр. Потрібна реактивна потужність електродвигунів 6 кВ та 0,4 кВ хімічного виробництва дорівнює 4060 кВАр при середньозваженому  $\cos\phi = 0,83$  та сумарною споживаною потужністю 6131 кВт.

Таким чином, регулюванням збудження турбогенератора можлива повна компенсація потрібної реактивної потужності виробництва і, завдяки цьому, встановлення спеціальних пристроїв компенсації на напругу 6 кВ та 0,4 кВ в схемі електропостачання не потрібна.

При пуску виробництва хімічної речовини (пусковий режим) реактивна потужність у повному обсязі споживається із зовнішньої мережі електропостачання. Номінальна потужність прийнятих до встановлення трансформаторів 6/0,4 кВ забезпечує резервування технологічних навантажень (робота на одному вводі) при відсутності пристроїв компенсації на напрузі 0,4 кВ.

– *Технічні характеристики обраного турбогенератора.* Парова турбіна – одноциліндрова з осьовим потоком пари та з реактивним облопачуванням.

Система забезпечення та контролю якості відповідає нормам та гарантує що компоненти повністю відповідають суворим вимогам до якості та надійності обладнання.

Використання перевірених стандартних модульних елементів гарантують ретельне виконання конструктивних частин, а це передбачає надійність ТГ під час експлуатації. ТГ має реактивне облопачування, низьку питому витрату пари, що є високоефективним в процесі експлуатації.

Шафа виводів і нейтралі безпосередньо приєднана до генератора і часто розташовується поряд з ним. Складається з вимірювальних трансформаторів, мідних шин, стійок і утримувачів збірних шин. Також встановлено обладнання для заземлення генератора.

Безперервний моніторинг і управління генератором здійснюється дистанційно шляхом подання на панель управління генератора керуючих сигналів, від системи управління (DCS) через систему управління турбіни.

– *Панель керування генератора.* Панель керування генератора має наступні прилади та пристрої:

- збудження – система двоканальна (запасна/подвійна) : два автоматичні канали (включає автоматичний регулятор напруги (AVR)) і два ручні канали. Два транзисторні інвертори (один спільний для кожної пара каналів включення);

- система захисту генератора призначена для його відключення при його роботі в неприпустимих умовах. Система захисту генератора заснована на мікропроцесорних пристроях. Для ручного відключення генератора призначена кнопка "Небезпека для генератора", яка встановлена на панелі управління генератора. Кнопка впливає на вимикач генератора через систему захисту генератора. Система захисту

генератора також має світлову аварійну сигналізацію. Система захисту включає в себе бібліотеку функцій захисту і, таким чином, можуть бути реалізовані будь-які алгоритми захисту генератора. Програмне забезпечення (Software) включає реєстрацію подій;

- виміри параметрів генератора роблять за допомогою реле захистів генератора. Вимірювані величини передаються через Profibus DP в систему управління турбіни для індикації;

- система автоматичної синхронізації генератора заснована на мікропроцесорній техніці. Система має можливість синхронізувати два вимикачі.

Після забезпечення рівності частоти та напруги генератора, що включається, і енергосистеми, система синхронізації видає команду, згідно якої генератор автоматично включається в мережу при допустимій різниці між їх кутами швидкостями і їх фазовими кутами. При автоматичному включенні генератора в мережу береться до уваги час спрацьовування вимикача. Налаштування напруги та частоти можуть бути оптимально погоджені.

Облаштування синхронізації генератора може бути встановлене в передбаченому проекті місці, а включення і виключення генератора може здійснюватися з робочої станції системи автоматичного управління турбіни. Цифрове, повністю автоматичне включення генератора в мережу гарантує оптимальні умови синхронізації, і, отже, менший знос і тривалу роботу турбоустановки.

- Регулювання турбіни. Регулятор турбіни заснований на самостійному процесорі (CPU). Сигнали, які призначені для швидкодіючих регулюючих ланцюгів (наприклад, регулювання обертів) підведені безпосередньо у входні карти PLC. Інші параметри приймаються через запасну комунікаційну систему з PLC захист. Регулюючі клапани турбіни, управляються швидкодіючими аналоговими модулями.

Контрольними функціями регулятора є: регулювання швидкості – швидкість (оберти) можна встановити за допомогою заданих величин швидкості в діапазоні від 3 % до 112 % номінальних оборотів. Перед синхронізацією регулятор обертів турбіни підвищує задану величину обертів автоматично до досягнення обертів синхронізації відповідно до пускових кривих;

Установка потужності за допомогою регулятора обертів турбіни – після синхронізації можна настроїти необхідну величину потужності за допомогою заданих величин обертів;

Регулювання частоти (під час експлуатації) – регулятор частоти з ненастроєною заданою величиною, яка відповідає розрахунковим параметрам частоти мережі, автоматично включається в роботу при отриманні сигналу від вимикача генератора у разі його відключення від зовнішньої мережі;

Регулювання потужності – після синхронізації і після повністю прогрітої турбіни можна задіяти регулятор потужності. Неможливо експлуатувати

турбіну одночасно з регулюванням тиску свіжої пари і потужності;

Захист від перевищення обертів – зважаючи на особливу важливість захисту турбіни від перевищення обертів, вона виконана в незалежному трьохканальному виконанні за принципом 2 із 3. Кожен із каналів можна тестувати при працюючій турбіні, починаючи від монітора числа обертів до соленоїда масляного вимикача стопорного клапану.

- Функція захисту турбіни. Система захисту турбіни включає в собі усі захисти що відключають турбіну, окрім окремо виконаного захисту від перевищення оборотів. Вони ґрунтовані на логіці вибору 1 із 1, 1 із 2 або 2 із 3. Система захисту є 3-и канална, припускає зупинку турбіни при припиненні подання живлення і робоче замкнуте положення контактів. Система управління працює за принципом "fail-safe", тобто зупинки турбіни до можливої аварії. Досягнувши контрольного параметра аварійного значення вимикається напруга соленоїдних клапанів масляного вимикача через самостійні вихідні контури. Одночасно відключається напруга регулюючих клапанів, які закриваються негайно. Перший сигнал для зупинки турбіни завжди розпізнається й архівується в пам'ять системи.

Відключення турбіни здійснюється у тому випадку, коли система досягла одного з нижче вказаних відключень рівня безпеки:

- перевищення обертів (2 із 3) SIL3;
- високе осьове зміщення (1 із 2) SIL0;
- низький тиск мастильної олії (2 із 3) SIL0;
- висока температура мастильної олії (2 із 3) SIL0;
- низький тиск регулювальної олії (2 із 3) SIL0;
- високий тиск пари у відборі (2 із 3) SIL2;
- високий тиск вихлопної пари (2 із 3) SIL0;
- високий рівень вібрації (1 із 1) SIL0;
- спрацьовування кнопка "стоп" (1 із 1) SIL2;
- сигнал від вищої система управління (DCS) (1 із 1) SIL3 готовий;
- сигнал від системи захисту генератора (1 із 1) SIL0.

**Висновки.** Виконано аналіз роботи елементів, що входять до складу енергосистеми. Визначено причини та характер ушкоджень елементів системи, розглянуто питання надійності електропостачання енергосистеми в цілому і, зокрема, хімічного виробництва.

Обрано захисні рішення хімічного виробництва, методи та засоби які забезпечать електроенергією електроприймачів як у робочому, так і у аварійному режимах роботи виробництва.

За допомогою регулювання збудження турбогенератора можлива повна компенсація потрібної реактивної потужності виробництва і, завдяки цьому, встановлення в схемі електропостачання спеціальних пристроїв компенсації на напругу 6 кВ та 0,4 кВ не є потрібним.

## Література

1. Хоменко І. В. До питання компенсації реактивної потужності в електричних системах / І. В. Хоменко, М. Ф. Піскур'юв, І. В. Стасюк // Вісник Національного технічного ун-ту «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2018. – № 32 (1308) С.71-76.
2. Aguila A. Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems / A. Aguila, D. Carrión, L. Ortiz // IEEE Lat. Am. Trans.– 2015.– 13. – Pp. 2190–2194.
3. Давидов О.Ю. Аналіз засобів компенсації реактивної потужності в електротехнічних системах / О.Ю. Давидов, О.В. Бялобржеський // Вісник КДУ імені Михайла Остроградського. – 2010.– Випуск 3 (62), Ч. 1. – С.131-136.
4. Шестеренко В.Е. Компенсация реактивной мощности как эффективное средство снижения потерь электроэнергии / В.Е. Шестеренко, И.Е. Изволенский // Наукові праці НУХТ. – 2015. Том 21, № 5. – С.170-178.
5. Gatta F.M. Paulucci Reactive power control strategy for voltage regulation and power-factor correction in MV distribution networks / F.M. Gatta, A. Geri, M. Maccioni, A. Mantineo, M. Cresta, M. Paulucci // IEEE Eindhoven Power Tech. – 29 June - 2 July Conference Eindhoven, Netherlands. – 2015.
6. Грабко В. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина V / Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С.М., Грабенко І. В. // Навчальний посібник: Синхронні машини.. –Вінниця: ВНТУ, 2014. –137с.

## References

1. Khomenko I.V. Do pytannya kompensatsiyi reaktivnoyi potuzhnosti v elektrichnykh systemakh / I.V. Khomenko, M. F. Piskur'ov, I. V. Stasyuk // Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho un-tu «KHPi». Seriya: Problemy udoskonalyuvannya elektrichnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka. – 2018. – № 32 (1308) S.71-76.
2. Aguila A. Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems / A. Aguila, D. Carrión, L. Ortiz // IEEE Lat. Am. Trans.– 2015.– 13. – Pp. 2190–2194.
3. Davydov O.YU. Analiz zasobiv kompensatsiyi reaktivnoyi potuzhnosti v elektrotekhnichnykh systemakh / O.YU. Davydov, O.V. Byalobrzhes'kyi // Visnyk KDU imeni Mykhayla Ostrograds'koho. – 2010.– Vypusk 3 (62), CH. 1. – S.131-136.
4. Shesterenko V.Ye. Kompensatsiya reaktivnoyi moshchnosti kak effektivnoye sredstvo snizheniya poter' elektroenergii / V.Ye. Shesterenko, I.Ye. Izvolenskiy // Naukovy pratsi NUKHT. – 2015. Tom 21, № 5. – S.170-178.
5. Gatta F.M. Paulucci Reactive power control strategy for voltage regulation and power-factor correction in MV distribution networks / F.M. Gatta, A. Geri, M. Maccioni, A. Mantineo, M. Cresta, M. Paulucci // IEEE Eindhoven Power Tech. – 29 June - 2 July Conference Eindhoven, Netherlands. – 2015.
6. Hrabko V. V. Eksperymental'ni doslidzhennya elektrichnykh mashyn. Chastyna V / Hrabko V. V., Rozvodyuk M. P., Levyts'ky C.M., Hrabenko I. V. // Navchal'nyy posibnyk: Synkhronni mashyny.. – Vinnytsya: VNTU, 2014. –137s.

**Филимоненко Н.Н., Филимоненко К.В. Возможности применения электромеханического оборудования для компенсации реактивной мощности и повышения надежности электроснабжения**

*В статье рассмотрена система электро-снабжения предприятия химической промышленности. При проектировании таких систем необходимо проводить выбор наиболее целесообразного варианта использования электрооборудования. Выбор осуществляется на основе всестороннего анализа технических и экономических показателей. Рассмотрены решения по обеспечению безаварийной работы энергосистемы, которая питает предприятие химической промышленности. Для компенсации реактивной мощности, потребляемой электроустановками промышленного предприятия, могут быть применены синхронные компенсаторы, а также используются синхронные машины.*

**Ключевые слова:** система электроснабжения, энергосистема, компенсация реактивной мощности, синхронный турбогенератор.

**Filimonenko N. M. , Filimonenko K. V. Possibility of application of electromechanical equipment for reactive power compensation and increasing the reliability of electricity supply**

*The article dedicated to the power supply system of a chemical industry enterprise. It is necessary to choose the most appropriate option for using electrical equipment while such systems designing. The choice is based on a comprehensive analysis of technical and economic indicators. Considered are solutions to ensure trouble-free operation of the power system that supplies the chemical industry. Synchronous compensators and synchronous machines could be used for compensation of reactive power consumed by electrical installations of an industrial enterprise. Due to the special importance of protecting the turbine from overspeed, it is made in an independent three-channel version of the principle of 2 out of 3. Each of the channels can be tested with the turbine running, from the speed monitor to the solenoid of the oil valve stop valve.*

*Deep-drawn input of electric power supply lines on the territory of enterprises and branches from the passing lines of the system become the main ways of electric feeding enterprises in which there is an artificial fusion of supply networks with distribution networks of the first stage of energy distribution.*

*Nowadays this progressive system is firmly entrenched in everyday practice. Deep-drawn input now practically means electric lines with a voltage of 35, 110, 150, 220 kV those passing through the territory of the enterprise with branches from them to the largest points of energy consumption.*

*The analysis of operating modes of the equipment which are a part of power system is executed. The occasions and features of damage to the elements of the system are identified, the issue of reliability of power supply of the power system in general and chemical production in particular is considered. The article examines the protective solutions for chemical production, methods and means that will provide electricity to electric receivers in both working and emergency modes of production.*

*It is possible full compensation the required reactive power of production by regulating the excitation of the turbo-generator. In that case the installation in the power supply*

---

*circuit of special compensation devices for voltage 6 kV and 0.4 kV is not necessary.*

**Key words:** *power supply system, power system, reactive power compensation, synchronous turbine generator.*

**Філімоненко Ніна Миколаївна** – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, kostiantyn.kun@gmail.com

**Філімоненко Костянтин Вадимович** – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, kostiantyn.kun@gmail.com

Стаття подана 29.10.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-264-8-62-65>

УДК 62-83

## «ПРЯМЕ» ВЕКТОРНЕ УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННОЮ МАШИНОЮ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

Шевченко І.С., Морозов Д.І., Бєлоха Г.С.

## "DIRECT" VECTOR CONTROL OF DOUBLY-FED INDUCTION MACHINE

Shevchenko I.S, Morozov D.I, Belokha H.S.

*Побудова регульованого електропривода на базі асинхронної машини подвійного живлення є досить актуальною задачею, оскільки дозволяє управляти великими потоками електроенергії при високих енергетичних показниках. У таких відомих системах електропривода є досить складна система управління ними, оскільки передбачає використання перетворювачів координат (прямі-зворотні) та наявність нелінійних зв'язків між каналами управління, це погіршує надійність таких систем. У роботі пропонується «пряме» векторне керування асинхронною машиною подвійного живлення без використання перетворювачів координат. Струми ротора запропоновано примусово формувати повністю керованим перетворювачем частоти, щоб зробити його активним та синфазним фазній е.р.с ротора. Перетворювач включається у роторне коло. Для схемної реалізації у якості перетворювача обраний перетворювач частоти з ланкою постійної напруги з релейним керуванням. Вхідний випрямляч якого є активний випрямляч. Крім того перетворювач забезпечує електромагнітну сумісність з мережею живлення, та задовольняє вимогам, які зазначені в стандартах, на якість струму мережі. Представлена модель асинхронної машини подвійного живлення з традиційною системою керуванням з використанням перетворювачів координат «прямі-зворотні». Проведено порівняння математичної моделі при традиційному векторному керуванні та моделі з «прямим» векторним керуванням за допомогою Matlab. Отримані осцилограми роботи з запропонованим керуванням, вони демонструють наростання швидкості в машині подвійного живлення, при цьому струми з мережі синусоїдальні та співпадають за фазою зі своїми напругами, а пуск електропривода супроводжується віддачею енергії ротора через перетворювач до мережі. Результати показують, що електропривод формує раціональну динаміку без перерегулювання координат.*

**Ключові слова:** машина подвійного живлення, перетворювач частоти, векторне керування

**Вступ.** Побудова регульованого електропривода (ЕП) на базі асинхронної машини подвійного живлення (АМПЖ) є досить актуальною задачею, оскільки дозволяє управляти великими потоками електроенергії при високих енергетичних показниках.

Недоліком відомих систем електропривода (ЕП) є досить складна система управління ними, оскільки передбачає використання перетворювачів координат (прямі – зворотні) та нелінійних зв'язків між каналами управління. це погіршує надійність таких систем.

Пропонується система векторного управління асинхронною машиною (АМ) без використання перетворювачів координат, що дозволяє підвищити якість і надійність роботи названих систем ЕП.

**Мета статті.** Дослідження векторного управління асинхронною машиною подвійного живлення без перетворення координат, та порівняння з традиційним керуванням.

**Результати дослідження.** Маємо математичну модель АМ у загальній ортогональній системі просторових координат " $u-v$ " вісь " $u$ " якої пов'язана з вектором поточкозчеплення статора  $\Psi_1$  при використанні фазового простору " $\Psi_s - I_r$ " то пов'язавши вісь " $u$ " з вектором  $\Psi_1$ , маємо  $\Psi_{u1} = |\Psi_1|$ ,  $\Psi_{v1} = 0$  [1]

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d|\Psi_1|}{dt} &= u_{u1}|\Psi_1| - R_s k_s i_{u2} \\ \omega_k |\Psi_1| &= u_v + R_s k_s i_{v2} \\ \frac{di_{u2}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_r} [u_{u2} - k_s u_{v1} - (R_r + k_s^2 R_s) i_{u2} + \\ &+ k_s \frac{R_s}{L_s} |\Psi_1| + (\omega_k - \omega_e) \sigma L_r i_{v2}] \\ \frac{di_{v2}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_r} [u_{v2} - k_s u_{v1} - (R_r + k_s^2 R_s) i_{v2} + \\ &+ \omega_e k_s |\Psi_1| - (\omega_k - \omega_e) \sigma L_r i_{v2}] \\ Me &= -\frac{3}{2} P_n k_s |\Psi_1| i_{v2} \\ Me - Mc &= J \frac{d\omega}{dt} \\ \omega_e &= p_n \omega \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де  $u_{u1}, u_{u2}, u_{v1}, u_{v2}, i_{u2}, i_{v2}$  – проекції векторів напруг і струмів статора та ротора на осі ортогональної системи координат (одержуються через прямі координатні перетворення з реальних координат).

$R_s, R_r, L_s, L_r$  – активні опори та індуктивності статорних та роторних кіл,

$K_s$  – коефіцієнт магнітного зв'язку між статорними обмотками,

$\sigma$  – коефіцієнт розсіяння по Блонделю.

Інтегруючи рівняння при сформованих проекції напруг статора і ротора переходять через зворотні перетворення до реальних управляючих сигналів. Такий стандартний хід дій при формуванні традиційних систем векторного управління АМ.

Пропонується величину моменту двигуна формувати наступним шляхом

$$Me = C\Phi_1 I_2 \cos \varphi_2 = C\Phi_1 I_{2a}$$

де  $I_{2a}$  – активна складова роторного струму, магнітний потік  $C\Phi_1$  через сталу величину статорної напруги також буде сталим, і його можна визначати через номінальний режим двигуна

$$C\Phi_1 = \frac{M_H}{I_{2H}} \cos \varphi_{2H} \eta_H$$

і при необхідності корегувати.

Якщо весь роторний струм зробити повністю активним, то  $Me = C\Phi_1 I_2$ . Для цього необхідно, щоб  $I_2$  співпадав за фазою зі е.р.с своєї фази ( $i_a \rightarrow e_a, i_b \rightarrow e_b, i_c \rightarrow e_c$ ). Цю операцію можна реалізувати за допомогою замкнених контурів фазних струмів ротора. Функціонально це виглядає як показано на рис.1.

Формування  $Me$  запропонованим способом еквівалентно формуванню його у перетвореній 2-фазній АМ. Якщо згадати векторну діаграму машини [1], то видно, що е.р.с. роторних обмоток знаходиться у квадратурі (під  $90^\circ$ ) по відношенню до магнітного потоку (намагнічувального струму). Якщо роторний струм буде співпадати з е.р.с., то він також буде знаходитись у квадратурі по відношенню до магнітного потоку, так як і  $i_{v2}$  по відношенню  $\Psi_1$

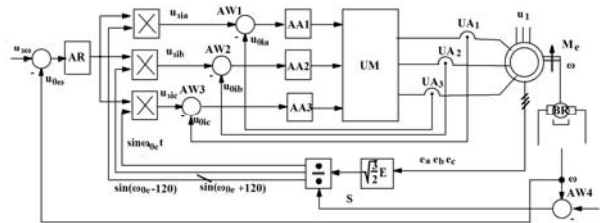


Рис.1. Функціональна схема: AR, AA – регулятори швидкості та фазних струмів ротора, UM – перетворювач, UA<sub>1</sub>, UA<sub>2</sub>, UA<sub>3</sub> – датчики струму, AW1-AW4 – суматори

Для схемної реалізації у якості перетворювача UM обран перетворювач частоти з ланкою постійної напруги (рис.2) з релейним керуванням. Вхідний випрямляч якого є активний випрямляч, для забезпечення електромагнітної сумісності з мережею живлення [2,3].

Активний випрямляч виконаний за трифазною схемою, два конденсатора, точка з'єднання яких підключена до нейтралі мережі. При цьому входи ПЧ через формуючі дроселі  $L_A, L_B, L_C$ , підключені до фаз мережі живлення. Ротор асинхронної машини підключений до інвертору.

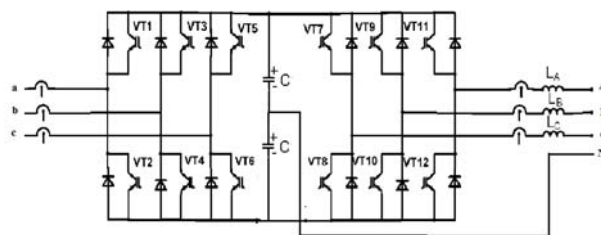


Рис. 2. Функціональна схема силової частини перетворювача

Система управління забезпечує формування споживаних з мережі струмів і струмів ротора. Конденсатори перед початком роботи необхідно зарядити до напруги перевищує амплітудне значення фазної напруги мережі та напруги ротора.

Управління транзисторами перетворювача відбувається системою керування яка отримує сигнали з релейних регуляторів струмів. Останні формують синусоїдні струми ротора які співпадають за фазами з роторними е.р.с. та струмів мережі які співпадає з напругою мережі.

На рис. 3 представлена модель асинхронної машини подвійного живлення з традиційною системою керування з використанням перетворювачів координат «прямі-зворотні».

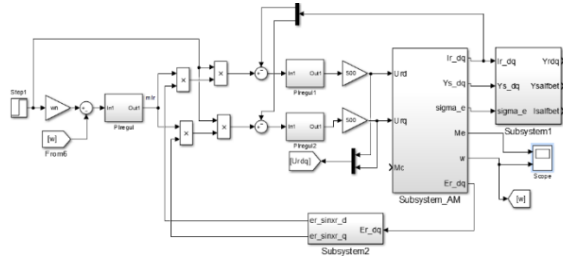


Рис.3. Модель асинхронної машини подвійного живлення з традиційним керування

Результати моделювання показані на рис. 4. Осцилограми демонструють момент та швидкість при розгоні.

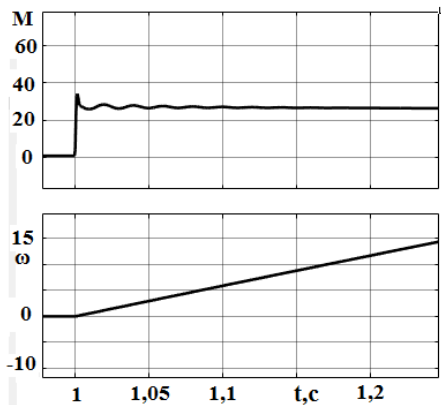


Рис. 4. Результати моделювання з традиційним керуванням

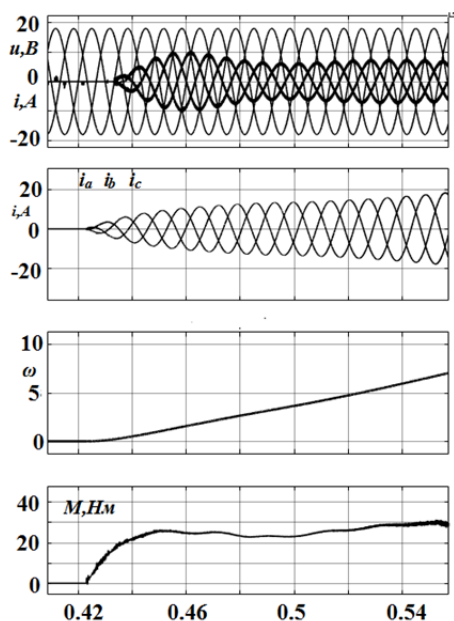


Рис. 5. Результати моделювання з «прямим» векторним управлінням

Цифровим моделювання з запропонованим «прямим» векторним керуванням та перетворювачем частоти отримані осцилограми роботи електропривода, які представлені на рисунку 5. Осцилограма демонструє фрагмент наростання швидкості в машині подвійного живлення, при цьому струми з мережі синусоїдальні та співпадають за фазою зі своїми напругами, а пуск ЕП супроводжується віддачею енергії ротора через перетворювач до мережі.

Результати показують, що електропривод формує раціональну динаміку без перерегулювання координат.

**Висновки:** Дослідження показують, що запропонований підхід при формуванні управління забезпечує результати подібні до таких, що дає традиційні підходи. Але запропонований значно простіший як в аналітичному плані, так і функціональному, що дозволить посилити надійність роботи ЕП.

#### Література

1. Спеціальні питання теорії електропривода. Динаміка асинхронного електропривода: [навч. посіб.] / І. С. Шевченко, Д. І. Морозов. Київ: Кафедра, 2014. 327 с.
2. Высокоэффективные источники электропитания: Монография / Ю. П. Самчелев, В. Г. Дрючин, Г. С. Белоха, Н. И. Андреева. Алчевск: ДонГТУ, 2013. 219 с.
3. Самчелев Ю.П. Универсальный высокоэффективный источник питания для электроприводов постоянного и переменного тока. / Ю.П. Самчелев, В.Г. Дрючин, Г.С. Белоха // Вісник національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХП», 2013. - №36(1009). – С.317-321.

#### References

1. Spetsialni pitannya teorii elektroprivoda. Dinamika asinkhronnogo elektroprivoda: [navch. posib.] / I. S. Shevchenko, D. I. Morozov. Kiiv: Kafedra. 2014. 327 p.
2. Vysokoeffektivnyye istochniki elektropitaniya: Monografiya / Yu. P. Samcheleyev, V. G. Dryuchin, G. S. Belokha, N. I. Andreyeva. Alchevsk: DonGTU. 2013. 219 p.
3. Samcheleyev Yu.P. Universalnyy vysokoeffektivnyy istochnik pitaniya dlya elektroprivodov postoyannogo i peremennogo toka. / Yu.P. Samcheleyev, V.G. Dryuchin, G.S. Belokha // Visnik natsionalnogo tekhnichnogo universi-tetu «KhPI». Zbirnik naukovikh prats. Seriya: Problemi avtomatizovanogo elektroprivodu. Teoriya i praktika. Kh.: NTU «KhPI». 2013. №36(1009). pp.317-321

**Шевченко І.С., Морозов Д.І., Белоха Г.С. Прямое векторное управление асинхронной машиной двойного питания**

*Построение регулируемого электропривода на базе асинхронной машины двойного питания является весьма актуальной задачей, поскольку позволяет управлять большими потоками электроэнергии при высоких энергетических показателях. В известных системах электропривода достаточно сложная система управления ими, поскольку предполагает использование*

преобразователей координат (прямые-обратные) и наличие нелинейных связей между каналами управления, что ухудшает надежность таких систем. В работе предлагается «прямое» векторное управление асинхронной машиной двойного питания без использования преобразователей координат. Токи ротора предложено принудительно формировать полностью управляемым преобразователем частоты, чтобы сделать его активным и синфазным фазной э.д.с ротора. Преобразователь включается в роторную цепь. Для схемной реализации в качестве преобразователя выбран преобразователь частоты со звеном постоянного напряжения с релейным управлением. Входной выпрямитель которого является активный выпрямитель. Кроме того преобразователь обеспечивает электромагнитную совместимость с питающей сетью, и удовлетворяет требованиям, указанным в стандартах на качество тока сети. Представленная модель асинхронной машины двойного питания с традиционной системой управлением с использованием преобразователей координат «прямые-обратные». Проведено сравнение математической модели при традиционном векторном управлении и модели с «прямым» векторным управлением с помощью Matlab. Получены осциллограммы работы с предложенным управлением, которые демонстрируют нарастание скорости в машине двойного питания, при этом токи из сети синусоидальные и совпадают по фазе со своими напряжениями, а пуск электропривода сопровождается отдачей энергии ротора через преобразователь к сети. Результаты показывают, что электропривод формирует рациональную динамику без перерегулирования координат.

**Ключевые слова:** машина двойного питания, преобразователь частоты, векторное управление.

#### Shevchenko I.S, Morozov D.I, Bielokha H.S. «Direct» vector control of doubly-fed induction machine

*The construction of a controlled electric drive based on a double-feed induction machine is an urgent task. Since it allows you to manage large flows. This paper presents a "direct" vector control of double fed asynchronous machine without the use of coordinate converters. Vector control is one of the most widely used techniques for controlling electrical*

*machines. In the paper is proposed to forcibly generate the rotor currents with a fully controlled frequency converter. The stator side is directly connected to the grid and the rotor side is connected to the grid through a back-to-back converter with hysteresis current control. The control system controls the transistors of the converter. It receives signals from relay current regulators, which form sinusoidal rotor currents that coincide in phase with the rotor electromotive force and network currents that coincide with the mains voltage. Also, converter is employed to provision electromagnetic compatibility with the network. AC-AC converter (frequency converter) with bi-directional power flow implemented by coupling the dc-link of active rectifier and an inverter. The controlled rectifier gives the bidirectional power flow capability, which is not possible in the diode rectifier based frequency converter. The capacitor between the inverter and rectifier makes it possible to decouple the control of the two inverters. The Matlab/Simulink simulation software is used for a preliminary investigation of the control strategy and AC-AC converter. The results are presented in this here to show the effectiveness of the proposed control strategy. During the simulation, voltages and currents at the rotor-side converter and grid-side converter and also rotor speed have been measured. start of the electric drive is followed by return of energy of a rotor through the converter to a network. The research results show that the electric drive forms a rational dynamic without overshoot the coordinates. The comparison of the mathematical model with classical control and the proposed model is carried out. The proposed method is much simpler in analytical and functional terms.*

**Keywords:** doubly-fed machine, frequency converter, vector control

**Шевченко І.С.** – к.т.н., професор кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля ,

**Морозов Д.І.** – к.т.н., доцент, dimorozov3@gmail.com

**Бєлоха Г.С.** – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, pointage13@gmail.com

Стаття подана 12.10.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-264-8-66-72>

УДК 620.179.14

## ПРИСТРІЙ РОЗМАГНІЧУВАННЯ УСТАНОВКИ МАГНІТНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ ОСІ КОЛІСНОЇ ПАРИ

Шевченко О.І., Мелконов Г.Л.

### DEVICE FOR DEMAGNETIZATION OF MAGNETIC DEFECTOSCOPY UNIT OF WHEEL PAIR

Shevchenko O.I., Melkonov H.L.

*У статті показана необхідність та визначені і проаналізовані основні способи розмагнічування деталей і виробів, виконаних з феромагнітних матеріалів. За результатами порівняльного аналізу обрано і обґрунтовано спосіб розмагнічування осі колісної пари, заснований на циклічному перемагнічуванні синусоїдальним постійно змінюваним магнітним полем з плавно спадною до нуля амплітудою. Запропоновано пристрій розмагнічування, що реалізує даний спосіб і забезпечує якісне розмагнічування осі на підставі визначення її магнітного стану з подальшим коректуванням величини поля, що розмагнічує.*

**Ключові слова:** вісь колісної пари, магнітна дефектоскопія, залишкова намагніченість, розмагнічування, вимірювання, ферозонд.

**Вступ.** Одним з найбільш відповідальних вузлів рухомого складу є колісна пара, порушення в роботі якої неприпустимі, так як найменший дефект колісної пари, особливо при високих швидкостях руху поїздів, може привести до непоправних наслідків [1].

Для визначення якості осей колісних пар поряд з іншими методами неруйнівного контролю значне місце займає магнітна дефектоскопія, оскільки вісь виконана з феромагнітного матеріалу. Магнітні методи неруйнівного контролю осей колісних пар передбачають такі технологічні операції: очищення поверхні і підготовку виробу до контролю; намагнічування контрольованого виробу; власне, операції контролю і фіксацію дефектів; розмагнічування [2].

Розмагнічування необхідно, бо намагнічена вісь, яка має залишкову намагніченість, притягує металеву стружку, пил, тирсу та інші дрібні феромагнітні частинки. Прилипання до поверхні осі феромагнітних частинок знижує продуктивність праці при складанні колісної пари. Потрапляючи в зазор між рухомими деталями, наприклад, буксових підшипників, вони сприяють більш інтенсивному зно-

су, а сучасні засоби очищення і видалення феромагнітних частинок стають малоефективні, так як частинки міцно утримуються на поверхні намагнічених деталей.

Магнітне поле є інформаційним параметром, за величиною якого судять про характеристики і якість досліджуваної осі при магнітній дефектоскопії. Тому довільне намагнічування осі в процесі обробки може спотворювати спеціально створене інформаційне магнітне поле, що може призвести до помилок при контролі. Щоб зменшити вплив перешкод, викликаних наявністю намагнічених областей, і, отже, поліпшити якість контролю необхідно перед дефектоскопією вісь розмагнічувати [3].

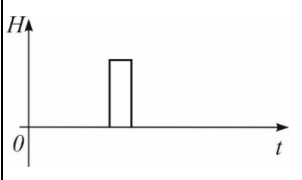
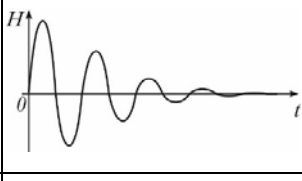
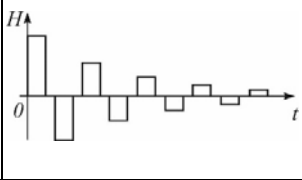
Основним завданням розмагнічування є доведення залишкової намагніченості до такого значення, при якому феромагнітні частинки, що утворюються при обробці, не втримувалися б на поверхні осі, внаслідок чого значно підвищиться термін її служби.

Очевидно, що практично значення намагніченості осі неможливо довести до нуля, головною причиною чого є присутність постійного магнітного поля Землі, величина якого в середніх широтах досягає значень 100 А/м. Тому розмагнічуванням прийнято називати доведення напруженості поля на поверхні феромагнітного виробу до значень не більше 200 ... 300 А/м [4]. Поле такої величини не буде утримувати феромагнітні стружку й тирсу на поверхні осі.

**Постановка проблеми.** У використовуваних і в даний час пристроях розмагнічування установок магнітної дефектоскопії осей колісних пар спадання амплітуди змінного магнітного поля забезпечується видаленням виробу, що розмагнічується, від джерела поля. Як правило, джерелами поля служать різної конструкції соленоїди (розімкнуті, замкнуті, сидлоподібні та інші), які живляться постійним або змінним магнітним струмом [3]. Такий метод роз-

Таблиця

**Основні способи розмагнічування феромагнітних деталей**

Спосіб розмагнічування	Вид поля, що розмагнічує	Регульовані параметри
Зворотним імпульсом		Амплітуда, тривалість
Вільний коливальний процес		Амплітуда першого імпульсу
Імпульсний спосіб		Амплітуда, частота, тривалість

магнічування осі має невисоку надійність, низьку продуктивність і велику частку затрат ручної праці.

У стаціонарних установках розмагнічування осі здійснюється шляхом подачі струму в обмотку системи, що намагнічує, та створює напруженість магнітного поля зворотної полярності по відношенню до поля намагнічування. При однорідному матеріалі і однорідній намагніченості осі таким чином можна домогтися повного розмагнічування [4].

Проблема полягає в тому, що в основній масі пристроїв розмагнічування вибір режиму розмагнічування здійснюється емпіричним шляхом, який не гарантує якісного розмагнічування всіх осей, так як немає двох однаково намагнічених осей. Тому тільки вибір режиму розмагнічування для кожної окремої осі на підставі її магнітного стану гарантує необхідну якість розмагнічування.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** На даний час розроблений ряд пристроїв розмагнічування, які використовуються в технологічному процесі виробництва [5, 6]. Незважаючи на різні конструкції, ці апарати вузькоспеціалізовані і призначені для розмагнічування деталей конкретної форми і розмірів [7]. Підвищення якості розмагнічування досягалось, в основному, шляхом оптимізації розмагнічуються імпульсів, що подаються в котушку розмагнічування [8].

**Мета статті.** На основі аналізу існуючих способів розмагнічування феромагнітних тіл вибрати спосіб і створити пристрій, що реалізує задану якість розмагнічування осей колісних пар рухомого складу за мінімальну кількість циклів.

**Результати дослідження.** Розмагнічування феромагнетиків може бути здійснено двома шляхами. По-перше, це неелектромагнітний вплив - нагрівання до точки Кюрі, механічна деформація та інше [9]. Непридатність використання подібного впливу в умовах виробництва очевидна. По-друге, електромагнітний вплив. До нього відносяться способи розмагнічування, основні види яких наведені в таблиці.

Розглянемо переваги і недоліки кожного способу.

Розмагнічування зворотним імпульсом здійснюється включенням поля, що розмагнічує, вектор якого строго протилежний вектору залишкової намагніченості  $\vec{M}_r$ . Даний спосіб знаходить широке застосування в пристроях магнітної дефектоскопії [5], забезпечуючи малий час розмагнічування при невисоких вимогах до значення залишкової намагніченості.

Установки магнітної дефектоскопії створюють намагніченість осі, близьку до однорідної, причому величина створюваних магнітних полів в цих установках достатня для доведення до насичення. Тому величина залишкової намагніченості буде визначатися величиною коерцитивної сили матеріалу, з якої виготовлена вісь.

Процес розмагнічування однорідно намагніченої осі зворотним імпульсом ілюструється на рис.1, де наведена петля гістерезису матеріалу і криві, які характеризують зміну її магнітного стану. У початковому положенні стан матеріалу характеризується точкою із залишковою намагніченістю  $M_r$ , положення якої залежить від магнітних властивостей матеріалу осі і коефіцієнта розмагнічування. При подачі поля, що розмагнічує, зворотної полярності напруженості  $H_p$ , рівного коерцитивній силі  $H_c$ , залишкова намагніченість стає рівною нулю.

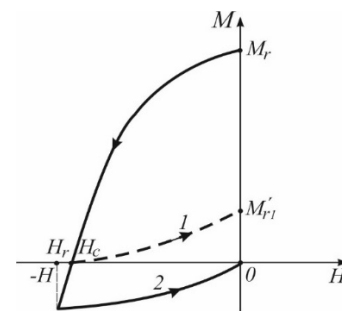


Рис. 1. Розмагнічування зворотним імпульсом

При знятті зовнішнього поля, що розмагнічує, намагніченість тіла частково відновлюється по кривій повернення 1 до значення  $M'_r$ . Можна підібрати таке зовнішнє поле, що розмагнічує  $|H_r| > |H_c|$ , після виключення якого значення залишкової намагніченості стане рівним нулю (крива повернення 2), тобто вісь виявиться розмагніченою. На відміну від  $H_c$ , величину  $H_r$  називають релаксаційною коерцитивною силою. Так, при правильному виборі величини поля, що розмагнічує, досягається

повне розмагнічування матеріалу полем зворотної полярності.

Якщо врахувати, що магнітні властивості матеріалу осі мають розкид в  $17 \div 25\%$  і що характер намагніченості не однорідний по всьому об'єму осі, то подача поля, що розмагнічує, величиною  $H_p$  призведе до того, що на осі будуть ділянки «недорозмагнічені» (точка  $M'_{r1}$ ), «розмагнічені» (точка  $M'_{r2}$ ) і «перерозмагнічені» (точка  $M'_{r3}$ ). Розкид залишкової намагніченості становитиме  $\Delta M_r$  (рис. 2).

Найбільш поширений спосіб розмагнічування полягає в циклічному перемагнічуванні зразка, що розмагнічується, синусоїдальним постійно змінюваним магнітним полем з плавно спадною до нуля амплітудою (рис.3) [6, 7].

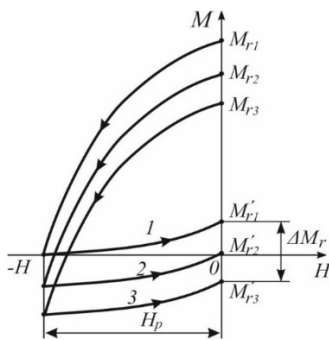


Рис. 2. Розкид залишкової намагніченості при розмагнічуванні зворотним імпульсом

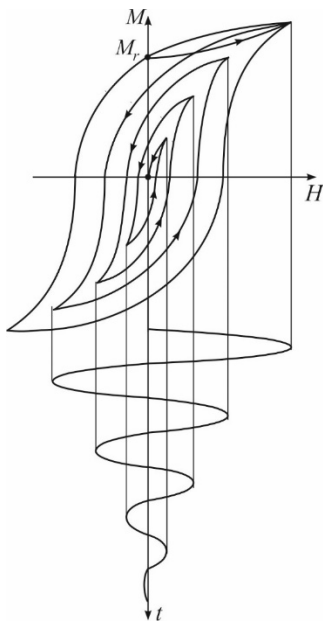


Рис. 3. Розмагнічування змінним магнітним полем з плавно спадною до нуля амплітудою

Затухаючі вільні синусоїдальні коливання можна отримати в паралельному LC - контурі. Вони виникають при замиканні зарядженого ємнісного накопичувача  $C$  на обмотку, що намагнічує, НО з індуктивністю  $L$  (рис. 4).

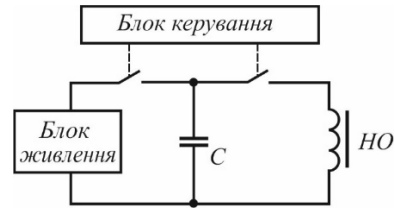


Рис. 4. Формування поля, що розмагнічує, за допомогою вільного коливального процесу

Блок керування задає амплітуду поля, що розмагнічує, частоту і число циклів розмагнічування. Зміна амплітуди поля, що розмагнічує, здійснюється шляхом регулювання накопичуваної енергії в батареї конденсаторів. Найбільш стабільним способом заряду ємнісного накопичувача є його заряд від регульованого джерела струму [7].

Ефективність розмагнічування залежить від частоти поля, що розмагнічує, швидкості його убавання, товщини деталі і глибини проникнення поля. Чим більше магнітна проникність матеріалу і товщина деталі, тим нижче повинна бути частота змінного магнітного поля, що розмагнічує. Швидкість розмагнічування повинна бути тим менше (число циклів перемагнічування тим більше), чим вище магнітна проникність матеріалу. Як правило, для повного розмагнічування досить  $40 \div 50$  циклів перемагнічування [9].

При виборі частоти спадного поля, що розмагнічує, зазвичай керуються такими міркуваннями. Можна вважати [10], що амплітуда напруженості поля убаває по експоненті

$$H_m = H_{m0} e^{-kd} \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт затухання хвилі

$$k = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu \gamma}{2}} \quad (2)$$

$H_m$  – амплітудне значення напруженості магнітного поля всередині виробу;

$H_{m0}$  – амплітудне значення напруженості магнітного поля на поверхні виробу;

$\omega$  – кутова частота поля, що розмагнічує;

$\mu_0$  – магнітна постійна;

$\mu$  – відносна магнітна проникність виробу;

$\gamma$  – питома електропровідність виробу;

$d$  – відстань від поверхні виробу до центру.

Якщо прийняти до уваги (1) і (2), то отримуємо вираз для частоти поля, що розмагнічує

$$f = \frac{1}{d^2 \pi \mu_0 \mu \gamma} \ln \frac{H_{m0}}{H_m} \quad (3)$$

При цьому максимальна амплітуда  $H_{mp}$  змінюваного розмагнічуючого поля, як правило, повинна бути не менше величини коерцитивної сили. В іншому випадку після закінчення процесу розмагнічування залишкова намагніченість зменшиться до значення  $M_{r2}$  (рис. 5).

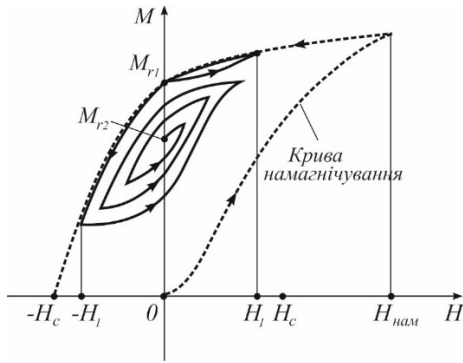


Рис. 5. Неповне розмагнічування змінним магнітним полем

Для повного розмагнічування в цьому випадку процес розмагнічування необхідно провести кілька разів.

Імпульсний метод розмагнічування найбільш універсальний, проте його реалізація досить складна. Півхвилі струму через обмотку НО пристрою розмагнічування формуються широтно-імпульсним або фазовим способом. Ключовими елементами служать тиристори VS1 і VS2 (рис. 6), а також силові транзистори.

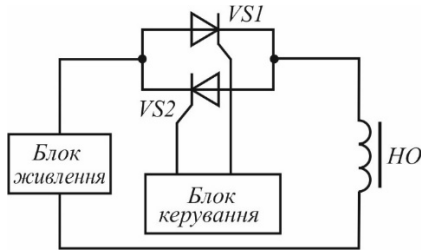


Рис. 6. Імпульсний спосіб формування поля, що розмагнічує

Блок керування формує імпульси струму необхідної амплітуди, тривалості і частоти. При відомій коерцитивній силі матеріалу виробу можна розрахувати необхідне значення логарифмічного декременту загасання і тим самим забезпечити процес розмагнічування за мінімальний час [7] зі збереженням заданої якості розмагнічування. До труднощів, які обмежують застосування даного способу, слід віднести складність формування струму через обмотку пристрою, що розмагнічує, яка не має постійної складової; значні імпульсні струми навантаження на мережу; низьку надійність силових транзисторів і досить високу вартість імпульсних перетворювачів.

У зв'язку з вищевикладеним можна визначити вимоги до параметрів згасаючого магнітного поля, що розмагнічує, яке забезпечує після розмагнічування мінімальне значення залишкової індукції виробу.

1. Згасаюче поле повинно бути строго змінним, тобто не мати постійної складової.

2. Частота коливань поля повинна бути низькою в сенсі проникнення поля в об'єм виробу без істотних втрат на вихорові струми.

3. Перший імпульс поля повинен намагнічувати весь об'єм феромагнітного тіла до індукції насичення.

4. Згасання поля має носити експонентний або близький до нього характер, причому значення логарифмічного декременту загасання необхідно вибирати по можливості близьким до одиниці (не більше 1,5 ... 2), причому чим вище значення коерцитивної сили матеріалу розмагнічуваного тіла, тим нижче потрібно значення логарифмічного декременту загасання.

5. Для досягнення повного розмагнічування необхідно впливати на вісь в стані залишкової намагніченості змінним магнітним полем з амплітудою, спадною від значення, що свідомо перевищує коерцитивну силу, до нуля.

Аналіз способів розмагнічування дозволяє зробити висновки про доцільність застосування другого способу для розмагнічування осей колісних пар. Серед переваг цього методу слід відзначити можливість отримання високих значень амплітуд струму в котушці намагнічування при малому споживанні потужності з мережі, а також принципову відсутність постійної складової магнітного поля, що розмагнічує. Неможливість регулювання параметрів коливань за винятком амплітуди і невисоку стабільність добротності і частоти коливального контуру слід віднести до його недоліків.

Розмагнічування осі пропонується проводити в стаціонарній установці діагностики [11] тим же електромагнітом, що і намагнічування осі (рис. 7).

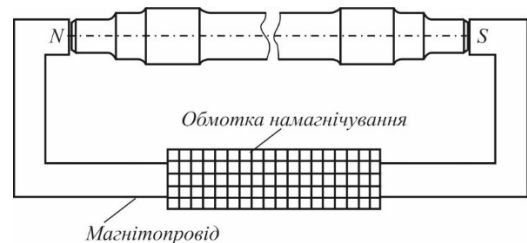


Рис. 7. Пристрій розмагнічування осі колісної пари

Використання конструкції магнітної системи з феромагнітним сердечником дозволяє концентрувати поле в робочій області і значно зменшувати поле розсіювання, що зменшує витрати енергії на створення поля.

Принцип роботи пристрою розмагнічування заснований на експоненціальному законі розряду ємності. Для електричної схеми пристрою, показаної на рис. 8, позитивна половина хвилі струму проходить через діод VD1, конденсатор C1, обмотку намагнічування НО і резистор R. Негативна півхвиля струму - відповідно через VD2, C2, НО і R. Струм буде текти через обмотки перетворювача до тих пір, поки повністю не зарядяться конденсатори C1 і C2. Резистор R служить для обмеження струму розмагнічування.

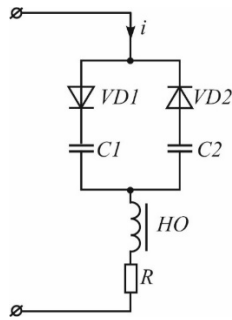


Рис. 8. Електрична схема пристрою розмагнічування

На рис. 9 приведена функціональна схема пристрою розмагнічування [12]. Вона складається з одновібраторів 1, 2, 3, оптронних ключів 4, 5, тиристорних ключів 6, 7 і обмотки пристрою розмагнічування 8.

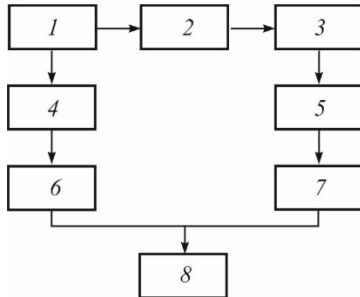


Рис. 9. Функціональна схема управління електричною схемою пристрою розмагнічування

Пристрій працює наступним чином. Після спрацювання одновібратора 1 включається послідовно оптронний ключ 4 і тиристорний ключ 6, який, в свою чергу, підключає змінну напругу до обмотки намагнічування 8. Після закінчення часу роботи одновібратора 1 спрацьовує одновібратор 2, що виконує функції затримки включення одновібратора 3. Останній служить для розряду конденсаторів  $C1$  і  $C2$  пристрою розмагнічування. Сигналом з одновібратора 3 через оптронний ключ 5 і тиристорний ключ 7 здійснюється розряд конденсаторів і тим самим пристрій готується до наступного циклу. В результаті струм, що проходить через обмотку намагнічування  $HO$ , буде змінним (рис. 10), і зменшуватися за експоненціальним законом.

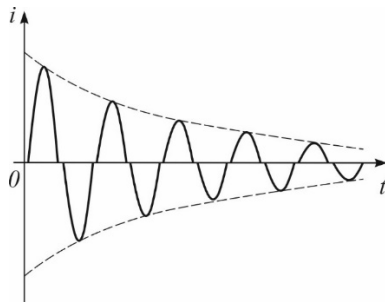


Рис. 10. Змінення струму розмагнічування

Експериментальним підбором напруженості поля, що розмагнічує  $H_p$  можна домогтися мінімального значення  $\Delta M_r$  і загальна намагніченість осі буде в допустимих межах. Для цього необхідно здійснювати контроль магнітного стану матеріалу осі після кожного включення і відключення поля, що розмагнічує, і мати можливість вимірювати величину поля розмагнічування. Технічно це вирішується таким чином. У торця осі встановлюється ферозонд Ф31 (рис. 11), що вимірює напруженість магнітного поля розсіювання в точці його максимального значення. Другий ферозонд Ф32 розміщений на деякій відстані від першого (200 ÷ 300 мм) і служить для компенсації зовнішніх магнітних полів. Вихідні сигнали ферозондів включені за диференціальною схемою. Різницевий сигнал ферозондів посилюється і подається на прилад реєстрації, встановлений на пульті управління магнітною установкою [13].

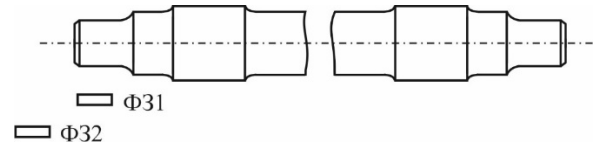


Рис. 11. Схема розташування вимірювальних ферозондів

Таким чином оператор має можливість відразу контролювати магнітний стан матеріалу осі за показаннями приладу і при неповному розмагнічуванні, змінюючи величину  $H_p$  в ту чи іншу сторону в залежності від показань приладу вчинювати повторне розмагнічування. Такий спосіб поліпшить якість розмагнічування і дозволить вести тільки вибірко-вий контроль магнітного стану матеріалу осі.

Намагніченість матеріалу осі оцінюється непрямим методом за результатами вимірювання тангенціальної складової напруженості магнітного поля на поверхні осі. Можна вважати, що напруженість магнітного поля всередині металу становить

$$H_l = (1,2 \div 1,3) \cdot H_e,$$

де  $H_e$  – напруженість магнітного поля на поверхні металу осі;

$H_l$  – напруженість магнітного поля всередині металу.

Якщо врахувати, що проникність форми осі становить  $m \approx 25$ , то величину намагніченості можна вважати рівною

$$M = (m - 1) \cdot H_l = (30 \div 32) \cdot H_e,$$

де  $H_e$  – показання приладу при вимірюванні тангенціальної складової напруженості магнітного поля на поверхні металу осі.

Таким чином, якщо максимально допустиме значення напруженості  $H_e = 500$  А/м, то

$$M \approx 15000 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

Напруженість магнітного поля розсіювання буде більше у торців осі і складати

$$H_{\text{ет}} = (0,1 \div 0,15) \cdot M = 1500 \dots 1750 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

Ці співвідношення зберігаються і при менших значеннях  $H_e$ .

Якщо матеріал осі розмагнічений, то вісь перебуваючи в магнітному полі Землі, має  $H_{\text{emin}} = 40$  А/м. При цьому

$$M_{\text{min}} = 1200 \frac{\text{А}}{\text{м}}, \quad H_{\text{ет}} = 120 \dots 130 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

При вимірюванні приладом напруженості у поверхні металу на ребрі торця необхідно мати на увазі, що навіть при розмагніченому стані осі, напруженість поля може бути в 3 ... 3,2 рази більше, ніж поле Землі.

У першому наближенні можна вважати, що максимальна напруженість магнітного поля на поверхні намагніченої деталі не може перевищити величину коерцитивної сили при будь-якому способі намагнічування.

**Висновки.** У статті за результатами аналізу основних способів розмагнічування феромагнітних деталей вибрано і обґрунтовано спосіб та визначені і проаналізовані основні вимоги до пристрою розмагнічування осей колісних пар. Запропоновано реалізацію пристрою, який гарантує необхідну якість розмагнічування осі колісної пари на підставі визначення її магнітного стану. Намагніченість матеріалу осі пропонується оцінювати непрямим методом за результатами вимірювання ферозондом тангенціальної складової напруженості магнітного поля на поверхні осі. Напрямою подальших досліджень є автоматизація процесу розмагнічування.

### Література

1. Останин С.Н. Неисправности вагонных колесных пар и их элементов / С.Н. Останин // Вагонный парк. – 2015. – № 9-10 (102-103). – С. 32-36.
2. Інструкція з формування, ремонту та утримання колісних пар тягового рухомого складу залізниць України колії 1520 мм. ВНД 32.0.07.001-2001 (Нова редакція). – К., 2011. – 168 с.
3. Інструкція по магнітному контролю відповідальних деталей тягового рухомого складу залізниць України. №ЦТ-0066 – Офіц. вид. – К., 2003. – 85 с. (Нормативний документ. Інструкція).
4. Безлюдько Г.Я. Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлоконструкций неразрушающим магнитным (коэрцитивным) методом / Г.Я. Безлюдько // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. – №2. – С. 38-49.
5. Асташенко П.П. Применение автоматического размагничивания для неразрушающего контроля / П.П. Асташенко, Н.Н. Зацепин, Г.А. Михальцевич, Н.И. Рысейкин // Дефектоскопия. – 1988. – №3 – С. 50–55.
6. Мирошников В.В. Устройство глубокого размагничивания / В.В. Мирошников, В.В. Яковенко,

В.Я. Гальченко // Машиностроитель. - 1987. - №4. - С.9.

7. Мирошников В.В. Размагничивание и контроль остаточной намагниченности деталей из инструментальной стали / В.В. Мирошников // Вісник Східноукраїнського державного університету. - 1997. - №1(5). - С. 240-243.
8. Шайхутдинов, Д.В. Определение распределения намагниченности внутри образцов из магнитомягкого материала сложной формы по экспериментально определенной картине внешнего поля. / Д.В. Шайхутдинов // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 11-1. – С. 37-38.
9. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.
10. Демирчян, К.С. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. 5-е изд. Т. 2. / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин. – СПб.: Питер. – 2009. – 432 с.
11. Шевченко О.І. Магнітний ферозондовий контроль осей колісних пар / О.І. Шевченко, В.В. Мирошников, І.О. Шведчикова // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2001. – №2(11). – С. 207-209.
12. Шведчикова І.О., Шевченко О.І. Ферозондовий контроль осей колісних пар рухомого складу залізних доріг: [монографія] / І.О. Шведчикова, О.І. Шевченко. – Северодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2018. – 196 с.
13. Мирошников В.В. Ферозондовый магниторегистрационный канал приборов магнитного контроля / В.В. Мирошников, А.И. Шевченко, С.Н. Швеца // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2002. – №3(49). – С. 142 -144.

### References

1. Ostanin S. N. Neispravnosti vagonnyh kolesnyh par i ih yelementov / S.N. Ostanin // Vagonnyy park – 2015. – № 9-10 (102-103). – S. 32-36.
2. Instruktziya z formuvannya, remontu ta utrymannia kolisnykh par tyahovoho rukhomoho skladu zaliznyts Ukrainy kolii 1520 mm. VND 32.0.07.001-2001. (Nova redakcija). – K., 2011. – 168 s.
3. Instruktziya po magnitnomu kontrolyu vidpovidalnykh detaley tyagovogo rukhomoho skladu zaliznyts Ukrainy. – Ofits. vyd. – K., 2003. – 85 s. (Normatyvnyy dokument. Instruktziya).
4. Bezlyudko G.YA. Ekspluatatsionnyy kontrol ustalostnogo sostoyaniya i resursa metallokonstruktivnykh nerazrushayushchim magnitnym (koertsitivnym) metodom / G.YA. Bezlyudko // Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol.- 2003. - №2. –S. 38-49.
5. Astashenko P.P. Primenenie avtomaticheskogo razmagnichivaniya dlya nerazrushayushchego kontrolya / P.P. Astashenko, N.N. Zatselin, G.A. Mikhailtsevich, N.I. Ryseykin // Defektoskopiya. - 1988. – №3 – S. 50–55.
6. Myroshnykov V.V. Ustroystvo glubokogo razmagnichivaniya / V.V. Myroshnykov, V.V. Yakovenko, V.YA. Galchenko // Mashinostroitel. - 1987. - №4. - С.9.
7. Myroshnykov V.V. Razmagnichivaniye i kontrol ostatochnoy namagnichenosti detaley iz insrtumentalnoy stali / V.V. Myroshnykov // Visnyk Skhidnoukrainskogo natsionalnogo universitetu imeni Volodymyra Dalya. – 1997. - №1(5). – S. 240-243.

8. Shaykhutdinov D.V., Opredeleniye raspredeleniya namagnichennosti vnutri obraztsov iz magnitomyagkogo materiala slozhnoy formy po eksperimentalno opredelennoy kartine vneshnego polya / D.V. Shaykhutdinov // Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniya . – 2015. – № 11-1. – S. 37-38.
9. Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika: spravochnik / pod. red. V.V. Klyueva. – M.: Mashinostroeniye, 2003. – 656 s.
10. Demirchyan K.S. Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki: Uchebnik dlya vuzov. 5-e izd. T. 2. / K.S. Demirchyan, L.R. Neyman, N.V. Korovkin. – SPB.: Piter. - 2009. – 432 s.
11. Shevchenko O.I. Magnitnyy ferrozondovyy kontrol osey kolisnykh par / O.I. Shevchenko, V.V. Myroshnykov, I.O. Shvedchikova // Visnyk Kremenchutskogo derzhavnogo politekhnichnogo universitetu. – 2001. - №2 (11). – S. 207-209.
12. Shvedchikova I.O., Shevchenko O.I. Ferozondovyy kontrol osey kolisnykh par rukhomogo skladu zaliznykh dorig: [monografiya] / I.O. Shvedchikova, O.I. Shevchenko. – Syevyerodonsk: vyd-vo SNU im. V. Dalya, 2018. – 196 s.
13. Myroshnykov V.V. Ferrozondovyy magnitoregistratsionnyy kanal priborov magnitnogo kontrolya / V.V. Myroshnykov, O.I. Shevchenko, S.N. Shvets // Visnyk Skhidnoukrainskogo natsionalnogo universitetu imeni Volodymyra Dalya. – 2002. - №3(49). – S. 142-144.

**Шевченко А.И. Мелконов Г.Л. Устройство размагничивания установки магнитной дефектоскопии осей колесных пар**

*В статье показана необходимость размагничивания оси колесной пары, при котором остаточная намагниченность доводится до такого значения, при котором ферромагнитные частицы, образующиеся при обработке, не удерживались бы на поверхности оси, в результате чего значительно повышается срок службы оси и ее эксплуатационная надежность. С этой целью определены и проанализированы основные способы размагничивания деталей и изделий, выполненных из ферромагнитных материалов: обратным импульсом, свободный колебательный процесс и импульсный способ. По результатам сравнительного анализа выбран и обоснован способ размагничивания оси колесной пары, основанный на циклическом перемагничивании синусоидально изменяющимся магнитным полем с плавно убывающей до нуля амплитудой. Выбор основан на возможности получения высоких значений амплитуд тока в размагничивающем устройстве при малом потреблении мощности из сети, а также принципиальном отсутствии постоянной составляющей размагничивающего поля. Предложено устройство размагничивания, реализующее данный способ, который обеспечивает качественное размагничивание оси на основании определения ее магнитного состояния с последующей корректировкой величины размагничивающего поля.*

**Ключевые слова:** ось колесной пары, магнитная дефектоскопия, остаточная намагниченность, размагничивание, измерение, феррозонд.

**Shevchenko O.I. Melkonov H.L. Device for demagnetization of magnetic defectoscopy unit of wheel pair**

*The article shows the need for high-quality demagnetization of the axle of the wheelset, which is one of the most critical parts of the rolling stock. The main task of demagnetization is to bring the remanent magnetization to such a value at which the ferromagnetic particles formed during processing would not be retained on the surface of the axle, as a result of which its service life will significantly increase. The method of comparative analysis was used to assess the effectiveness of methods for demagnetizing the axle of a wheelset, which ensures the durability and operational reliability of the rolling stock. Based on the results of the analysis, three main methods of demagnetizing ferromagnetic parts and products are identified: a reverse pulse, a free oscillatory process and a pulse method. A method of demagnetization based on cyclic magnetization reversal by a sinusoidal changing magnetic field with an amplitude smoothly decreasing to zero has been selected and substantiated. The basic requirements for the device for demagnetizing the axles of wheelsets have been determined and analyzed. The proposed implementation of the device, which guarantees the required quality of demagnetization of the axle of a wheelset based on its magnetic state. The magnetization of the axis material is proposed to be estimated indirectly from the results of measuring the tangential component of the magnetic field strength on the axis surface with a fluxgate. To compensate for external magnetic fields, a second flux gate is used, located at some distance from the first. The output signals of the flux gates are connected according to the differential circuit. The difference signal of the flux gates is amplified and fed to a recording device, depending on the readings of which the demagnetizing field is corrected.*

*The proposed implementation of the device, which guarantees the required quality of demagnetization of the axle of a wheelset on the basis of determining its magnetic state. The magnetization of the axis material is proposed to be estimated by an indirect method based on the results of measuring the fluxgate tangential component of the magnetic field strength on the axis surface. The direction of further research is the automation of the demagnetization process.*

**Keywords:** axis of wheel pair, magnetic flaw detection, residual magnetization, demagnetization, measurement, flux gate.

**Шевченко О.І.** – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, alexshev2014@i.ua

**Мелконов Г.Л.** – к.т.н., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, g.melkonov78@gmail.com

Стаття подана 27.10.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-264-8-73-77>

УДК 681.5.015

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ОБ'ЄДНАНИХ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Асманкіна А.А., Лорія М.Г., Целіщев О.Б. Гезеві Абдалхалех Гома Ахмед

## AUTONOMOUS ENERGY INDEPENDENCE COMBINE SYSTEMS LABORATORY SETTING AUTOMATION

Asmankina A.A., Loria M.G., Tselishchev O.B., Ghezewi Abdulkhaleg Goma Ahmed

*Тепер всі світові тенденції енергії прямують на використання і комбінуванні поновлюваних джерел енергії. Поєднання декількох поновлюваних джерел енергії і залучення не поновлюваних джерел приводить до часткової незалежності. У цій роботі була протестований лабораторний пристрій для нагріву і охолодження рідини. Протягом експерименту були використані правила Карно, гідродинаміка, динамічна компресія газів і багато інших принципів. Запропоноване поєднання декількох систем замінимої енергії, зазначене у графіках, відобразило кількість джерел, необхідних для роботи експериментального врегулювання. Були зняті показники в різних термінах роботи експериментального врегулювання, для цієї мети воно було обладнане великою кількістю чутливих елементів. Досліджуваний час, температура, тиск на різних проміжках врегулювання управляється он-лайн з мобільного пристрою. Для конструкції і оцінки адекватності математичного зразкового збирання показників від сенсорів залежно від температурних індексів умови експлуатації, яка вимагає детальніших спостережень, для цього дослідження знадобилося більше року, залежно від часу щорічної і бажаної температури в приміщенні. Зняті показники з експериментальної частини, дозволили отримати апроксимовану інформацію для конструкції діаграм залежностей нагнітання тиску від температур. Дослідним результатом стали побудовані графічні залежності тиску від температур на трьох основних ділянках врегулювання. Отримані дані надають можливості побудувати математичну модель для послідовної модернізації врегулювання.*

**Ключові слова:** комплексна установка, фільтр-осушувач, хладагент, компресор, сонячні панелі, автоматизація, мікроконтролер.

**Вступ.** При розробці будь-якої технології особливу увагу приділяють розробці технологічної схеми та апаратів, які реалізують цю технологію. Процес розробки технологічної схеми можна умовно поділити на декілька етапів: розробка лабораторної установки; розробка пілотної установки; розробка

напівпромислової установки; розробка промислової установки.

Було вирішено розробити та сконструювати пілотну установку, яку потім доповнювати. Вдосконалена лабораторна установка дозволила врегулювати необхідні параметри, а використання великої кількості датчиків дозволило знімати показники цих параметрів. Також одним із важливих питань було вирішено впровадити в загальну систему альтернативні джерела енергії. Альтернативні джерела енергії можуть поставляти енергію, як правило, за допомогою контролерів заряду акумуляторних батарей (АКБ) і інверторів (перетворювачів постійної напруги АКБ в змінне 220В). При необхідності АКБ можуть так само заряджатися від стаціонарного генератора, або від мережі 220 вольт, якщо енергії від альтернативних джерел бракує.

Для наочності були розглянуті різні системи з використанням різних джерел енергії та їх кількості. Була досліджена необхідна кількість датчиків та допоміжних конструкцій.

**Основний матеріал.** Результатом пошуку та обговорення необхідних компонентів став список першочергових кроків: залив хладагенту R134a, паяння мідних трубок, під'єднання в систему манометрів, ватметра, пускової кнопки, для екстреного відключення живлення, та емностей з водою. Було прийнято рішення робити установку на побутовому компресорі із звичайного холодильника, тому і робився залив саме хладагенту R134a, який використовується безпосередньо у компресорах такого типу та є безпечним для людини. Мідні трубки були обрані за теплоємністю. Так як систему потрібно контролювати було вирішено вмонтувати манометри на вхід і на вихід з компресору. Для контролю за споживанням електричної енергії та спостереженням передів напруги у централізованих електромережах.

Для побудови експериментальної установки була спроектована та сконструйована підставка (рис.1).

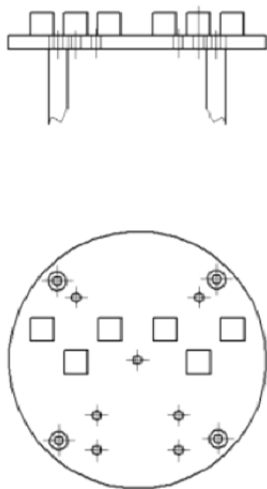


Рис.1. Стационарна підставка експериментальної лабораторної установки

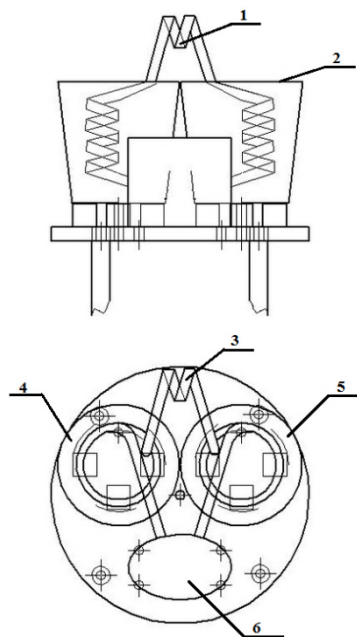


Рис. 2. Зображення експериментальної лабораторної установки(схематичне)

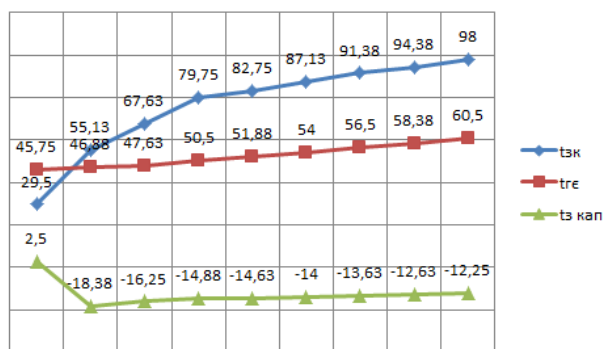
На рис.2 показана розроблена та зібрана експериментальна лабораторна установка на підставці (рис.1), де 1 – фільтр-осушувач хладагента; 2 – ізолююча кришка; 3 – мідна трубка; 4 – ємність з проточною водою, в якій знімається тепло; 5 – ємність, в якій відбувається нагрів; 6 – мотор-компресор побутового холодильника. Спочатку, установка складалася з наступних компонентів: компресор, дві ємності з водою, мідні трубки, два манометри (вхід і вихід системи), хладагент R 134a, а також 6 датчиків для зняття свідчень (температура води в обох ємкостях, температура трубок входу і

виходу з компресора, температура на вході капіляра, температура компресора). Середній показник температури нагрітої води в ємкості при знятті свідчень тепла був рівний 40-50° С при нагріві компресора до 60-80° С. До недоліків первинної конструкції установки можна віднести неефективне підведення нагріву води з вершини ємкості. Доцільніше нагрівати воду від підстави ємкості, щоб тепло піднімалося вгору. Також відсутність перемішування води, що підігрівається, в ємкості приводила до надмірного підвищення тиску в трубах системи.

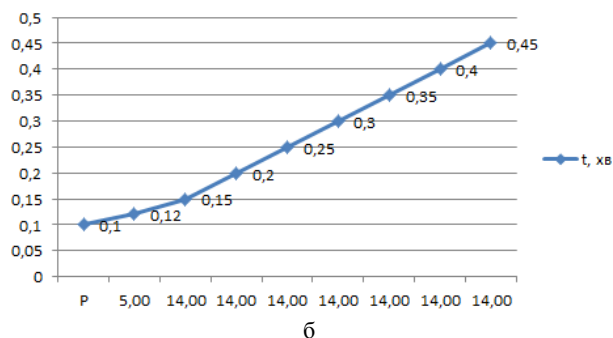
Після того, як установка була переконструйована з врахуванням вищеперелічених проблем, був доданий другий компресор (звичайний акваріумний компресор), який істотно знижував тиск шляхом перемішування води. Були перепаєані і заізольовані трубки на виході з компресора, які були призначені для передачі тепла. Також була заізольована судина з водою, що нагрівалася, та мідна трубка, що виходить з компресора. Це дозволило запобігти деяким тепловим втратам. Як видно зі всього вищеописаного, упроваджені конструктивні рішення дозволили усунути ряд проблем і істотно збільшити ефективність роботи установки.

Далі, для проведення автоматичного збору даних, їх обробки, контролю і можливості регулювання параметрів були приєднані датчики і запрограмований контролер.

Проведені експерименти дозволили отримати апроксимовані дані для побудови графіків залежностей нагнітання тиску від температур: виходу з компресора, з капіляра і, безпосередньо, в резервуарі з рідиною, а так само тиску від часу дії.



a



б

Рис. 3. Результати запусків

У частині а) на графіках представлені: червоним – залежність тиску від температури нагрівальної трубки до фільтру-осушувача хладагента, синім – залежність тиску від температури води, що нагрівається, зеленим – залежність тиску від температури нагрівальної трубки після фільтру-осушувача хладагента. У частині б) червоним показаний графік залежності тиску від часу. Як видно з графіків, при досягненні компресором температури 70°C при першому запуску, рівень тиску залишається стабільним 14 мПа. При подальших запусках, досягаючи тиску в 14мПа, приймалося рішення відключення уручну із за технічних характеристик використаного компресора і сполучних трубок.

Сконструйована лабораторна установка відноситься до складних, але з'явилася можливість експериментально дослідити її роботу та отримати статичні характеристики. Було прийняте рішення виявити функціональний зв'язок вихідних величин від змін вхідних. Під час дослідження статичних характеристик і кривих перехідного процесу найчастіше використовують ступінчасту одиничну функцію, тому були зняті необхідні параметри при роботі установки. Вхідні величини ступінчасто послідовно змінювалися від мінімального до максимально можливого, в залежності від параметрів встановленого обладнання, на кожному з обраних інтервалах часу.

Таблиця 1

Значення показників

№ зп	t, хв	P	tзк	tre	tз кап
1	0	5	19,5	17,25	-11,13
2	0,01	6	36,88	17,63	-38
3	0,05	6,2	46,5	18,88	-25,75
⋮					
N	0,4	9,2	79,88	31,5	-20,38

Найважливішим показником є температура у гарячій ємності.

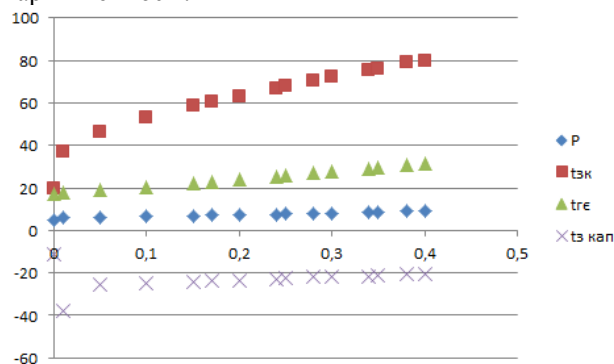


Рис. 4. Кореляційне поле дослідів

Після обробки зібраних показників була побудована експериментальна лінія регресії та знайдені середні значення показників, які були потрібні для знаходження коефіцієнта кореляції. Знайдений коефіцієнт належить до проміжку [0;1] та є ознакою сильної кореляції.

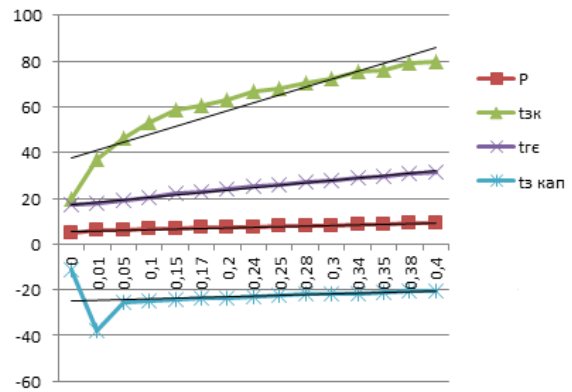


Рис. 5. Емпіричні та теоретичні лінії регресії знятих показників

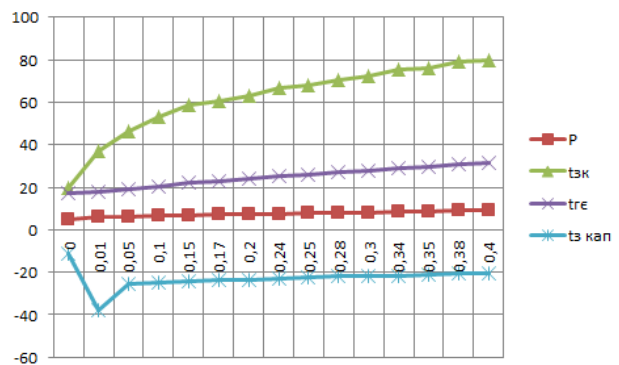


Рис.6. Емпіричні та теоретичні лінії регресії поділені на ділянки |Δx|

**Висновки.** Результатом даної роботи є розробка і тестування дослідної лабораторної установки. Аналіз існуючих розробок систем автономного енергозабезпечення і характеристик вироблюваного устаткування дозволив виявити основні тенденції розвитку даної області, сформулювати перспективний напрям практичної реалізації самої установки для зняття свідчень з датчиків.

Розроблена експериментальна лабораторна установка не має достатньо потужності задля забезпечення енергією цілої будівлі. Тому виникає необхідність побудови та дослідження математичної моделі, що уможливить розрахунок необхідних параметрів для подальшого вибору необхідної кількості матеріалів для забезпечення необхідної кількості енергії при зміні будь-яких змінних параметрів.

**Л і т е р а т у р а**

1. Целіщев О.Б. Математичне моделювання технологічних об'єктів: підруч./ О.Б. Целіщев, П.Й.Єлісеєв, М.Г. Лорія, І.І. Захаров – Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту, 2011. – 421с.
2. Huber P. The Bottomless Well. The Twilight of Fuel, The Virtue of Waste, and Why we Will Never Run Out of Energy / P. Huber, M. Mills. – Basic Books, Cambridge. – 2005.
3. Roberts P. The End of Oil / P. Roberts. – Houghton Mifflin Company, New York. – 2004.

4. Energy Technologies for the 21st Century, International Energy Agency, Paris. – 1997.
5. Симанков В. С. Синтез адаптивных АСУ сложными системами с применением моделей распознавания образов / В. С. Симанков, Е. В. Луценко // Автоматизация и современные технологии, 1999. – № 1. – С. 32–37.
6. Роткоп Л.Л. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры/ Л.Л. Роткоп, Ю.Н.Спокойный.- М.: Сов.радио,1976.-232с.
7. Климентьев К. Е. Системы реального времени / К. Е. Климентьев. – Самара: СГАУ, 2008. – 52 с.
8. World Energy Statistics 2004, International Energy Agency, Paris. – 2004.
9. Голенкевич Т.А. Прикладная теория надежности.- М.: Высш.шк., 1985.-168с.
10. Schobert H. H. Energy and Society, an Introduction / H. H. Schobert. – Taylor and Francis. – New York. – 2002.
11. Угрюмов Е.П. Проектирование элементов и узлов ЭВМ.- М.: Высш.шк., 1987.- 317с.
12. США №3385287. кл. 126–127 Способ нагрева жидкостей / Кладов А.Ф. – опубл. 1969. Патент СССР № 1329629. кл. F24G3/00. – 1982, SU 1656980 A1.
13. Варламов Р.Г. Справочник конструирования РЭА: Общие принципы конструирования/ Под ред. Р.Г. Варламов.- М.: Сов.радио, 1980.-480с.
14. Преснухин Л.Н. Расчет элементов цифровых устройств./ Л.Н. Преснухин,
15. Н.В Воробьев., А.А. Шишкевич - М.: Высш.шк., 1982.- 382с.
16. Гурвич И.С. Защита ЭВМ от внешних помех.-М.: Энергоатомиздат, 1984.- 224с.
17. Иванов Ю.В. Гибкая автоматизация производства РЭА с применением микропроцессоров и роботов./ Ю.В. Иванов, Н.А. Лагота - М.: Радио и связь, 1987. - 464с.
18. Bechtold R. L. Alternative Fuels for Heavy Duty Engines: Status of Fleet Trials / R. L. Bechtold / Sypher-Mueller International, Inc., Ottawa (Ontario), Department of Energy Report DOE/CE/50182-T2. – Nov 1990.
19. Автоматизация и механизация сборки и монтажа узлов на печатных платах /Под ред. Журавского В.Г.-М.: Радио и связь, 1988.- 280с.
20. Маркевич К. Энергетична галузь України: підсумки 2015 року / К. Маркевич. –Центр Разумкова. : Видавництво «Заповіт». – 2016. – 71с.
21. 20 Оптимальні настроювання регуляторів промислових систем керування технологічними об'єктами: монографія / М. Г. Лорія, О. В. Поркуян, М. В. Ананьев, О. Б. Целищев [за ред. М.Г. Лорія]. – Северодонецьк: вид-во СНУ ім. В.Даля, 2019. – 192 с.
22. Ананьев М. В. Идентификация об'єктів керування / М. В. Ананьев, О. Б. Целищев, М. Г. Лорія [та ін.] // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: міжнародний науково-технічний журнал. – Хмельницький, 2010. – №2 (36). – С.178 – 181
23. Energy Technologies for a Sustainable Future: Transport, International Energy Agency (IBA), 2004.
3. Roberts P. The End of Oil / P. Roberts. – Houghton Mifflin Company, New York. – 2004.
4. Energy Technologies for the 21st Century, International Energy Agency, Paris. – 1997.
5. Simankov V. S. Sintez adaptivny`kh ASU slozhny`mi sistemami s primeneniem modelej raspoznavaniya obrazov / V. S. Simankov, E. V. Luczenko // Avtomatizaciya i sovremenny`e tekhnologii, 1999. – # 1. – S. 32–37.
6. Rotkop L.L. Obespechenie teplovy`kh pezhimov ppi konstpuipovanii padioe`lektponnoj appapatuty`/ L.L. Rotkop, Yu.N.Spokojny`j.- M.: Sov.padio,1976.-232s.
7. Kliment`ev K. E. Sistem`ev real`nogo vremeni / K. E. Kliment`ev. – Samara: SGAU, 2008. – 52 с.
8. World Energy Statistics 2004, International Energy Agency, Paris. – 2004.
9. Golenkevich T.A. Ppikladnaya teopiya nadezhnosti.- M.: Vy`ssh.shk., 1985.-168s.
10. Schobert H. H. Energy and Society, an Introduction / H. H. Schobert. – Taylor and Francis. – New York. – 2002.
11. Ugyumov E.P. Ppoektipovanie e`lementov i uzlov E`VM.- M.: Vy`ssh.shk., 1987.- 317s.
12. SSHA #3385287. kl. 126–127 Sposob nagreva zhidkостей / Kladov A.F. – opubl. 1969. Patent SSSR # 1329629. kl. F24G3/00. – 1982, SU 1656980 A1.
13. Vaplamov R.G. Sppavochnik konstpuipovaniya RE`A: Obshhie ppincziy` konstpuipovaniya/ Pod ped. R.G. Vaplamov.- M.: Sov.padio, 1980.-480s.
14. Ppesnukhin L.N. Raschet e`lementov czifpovy`kh ustpojstv./ L.N. Ppesnukhin, N.V Vopob`ev., A.A. Shishkevich - M.: Vy`ssh.shk., 1982.-382s.
15. Gupvich I.S. Zashhita E`VM ot vneshinkh pomekh.-M.: E`nepgoatomizdat, 1984.- 224s.
16. Ivanov Yu.V. Gibkaya avtomatizaciya ppoizvodstva RE`A s ppimeneniem mikpoppoccessopov i pobotov./ Yu.V .Ivanov, N.A. Lakota - M.: Radio i svyaz`, 1987. - 464s.
17. Bechtold R. L. Alternative Fuels for Heavy Duty Engines: Status of Fleet Trials / R. L. Bechtold / Sypher-Mueller International, Inc., Ottawa (Ontario), Department of Energy Report DOE/CE/50182-T2. – Nov 1990.
18. Avtomatizaciya i mekhanizaciya sbopki i montazha uzlov na pechatny`kh platakh /Pod ped. Zhupavskogo V.G. -M.: Radio i svyaz`, 1988.- 280s.
19. Markevich K. Energetichna galuz` Ukrayini: pi`dsumki 2015 roku / K. Markevich. –Czentr Razumkova. : Vidavnicztvo «Zapovi`t». – 2016. – 71s.
20. Optymalni nastroiuvannia rehuliatoriv promslovykh sstem keruvannia tekhnolohichnymy obiekamy: monohrafiia / M. H. Loria, O. V. Porkuian, M. V. Ananiev, O. B. Tselishchev [za red. M.H. Loria]. – Sievierodonetsk: vyd-vo SNU im. V.Dalia, 2019. – 192 s.
21. Ananiev M. V. Identyfikatsiia obektiv keruvannia / M. V. Ananiev, O. B. Tselishchev, M. H. Loria [ta in.] // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh: mizhnarodnyi naukovotekhnichniy zhurnal. – Khmelnytskyi, 2010. – №2 (36). – S.178 – 181
22. Energy Technologies for a Sustainable Future: Transport, International Energy Agency (IBA), 2004.

#### References

1. TsellschEv O.B. Matematichne modelyuvannya tehnologichnih ob`ektiv: plidruh./ O.B. TsellschEv, P.Y.EllsEEv, M.G. LorIya, I.I. Zaharov – Lugansk: Vid-vo ShIdnoukr. nats. un-tu, 2011. – 421s.
2. Huber P. The Bottomless Well. The Twilight of Fuel, The Virtue of Waste, and Why we Will Never Run Out of Energy / P. Huber, M. Mills. – Basic Books, Cambridge. – 2005.

**Асманкіна А.А., Лорія М.Г., Целищев А.Б., Гезеві Абдалхалех Гома Ахмед. Автоматизация объединенных систем автономного энергообеспечения лабораторной установки**

Теперь все мировые тенденции энергии направляются на использование и комбинирование возобновляемых источников энергии. Сочетание нескольких возобновляемых источников энергии и привлечение не возобновляемых источников приводит к частичной независимости. В этой работе было протестированное лабораторное устройство для нагрева и охлаждения жидкости. В течение эксперимента были использованы правила Карно, гидродинамика, динамическая компрессия газов и много других принципов. Предложенное сочетание нескольких систем заменяемой энергии, отмечены в графиках, отобразило количество источников, необходимых для работы экспериментального урегулирования. Были сняты показатели в разных сроках работы экспериментального урегулирования, для этой цели оно было оборудовано большим количеством чувствительных элементов. Исследуемое время, температура, давление, на разных промежутках урегулирования управляется он-лайн из мобильного устройства. Для конструкции и оценки адекватности математического образцового сбора показателей от сенсоров в зависимости от температурных индексов условия эксплуатации, которое требует более детальных наблюдений, понадобилось больше года, в зависимости от времени ежегодной и желаемой температуры в помещении. Снятые показатели, позволили получить аппроксимированную информацию для конструкции диаграмм зависимостей нагнетания давления от температур. Опытным результатом были построены графические зависимости давления от температур на трех основных участках урегулирования. Полученные данные предоставляют возможность построить математическую модель для последовательной модернизации урегулирования.

**Ключевые слова:** комплексная установка, фильтр-осушитель, хладагент, компрессор, солнечные панели, автоматизация, микроконтроллер.

**Asmankina A.A., Loria M.G., Tselishchev O.B., Ghezewi Abdulkhalegn Goma Ahmed. Autonomous energyindependence combine systems laboratory setting automation**

Now all world tendencies of energy are sent on the use and combining of renewable energy sources. Combination of a few renewable energy sources bringing in of not renewable sources results in partial independence. In this work was the tested laboratory device for heating and cooling of liquid. During an experiment rules were used Carnot, hydrodynamics, dynamic compression of gases and many other principles. The offered combination of a few systems of

replaceable energy, marked in graphic arts, represented the amount of sources, necessary for work of experimental settlement. There were the taken off indexes in the different terms of work of experimental settlement, for this purpose it was equipped plenty of pickoffs. A this job performance is development and testing of pilot laboratory plant. Constructed the laboratory setting behaves to difficult, but possibility experimentally to probe its work and get static descriptions appeared. There was the accepted decision to find out functional connection of initial sizes from changes an entrance. A major index is a temperature in a hot capacity. After treatment of the collected indexes the experimental line of regression was built and the mean values of indexes, which was needed for finding of coefficient of correlation, are found. The probed time, temperature, pressure, on the different intervals of settlement is managed on-line from a mobile device. For a construction and estimation of adequacy of mathematical exemplary collection of indexes from touch-controls depending on the temperature indexes of condition of exploitation, which requires more detailed supervisions, for this research it may need anymore the river, depending on time of annual and desired temperature in an apartment. Taken off indexes, allowed to get the approximated information for the construction of diagrams of dependences of festering of pressure from temperatures. By an experimental result graphic dependences of pressure became built on temperatures on three basic areas of settlement. Findings are given by possibilities to build a mathematical model for successive modernization of settlement.

**Keywords:** filter-vaporiser, complex setting, coolagent, compressor, sun panels, automation, microcontroller.

**Асманкіна Анастасія Анатоліївна** – аспірант кафедри електронних апаратів, ст. лаборант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, asmankina@ukr.net

**Лорія Марина Генадіївна** – д.т.н., проф. кафедри електронних апаратів та кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля

**Целищев Олексій Борисович** - д.т.н., проф., проректор з наукової роботи Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля

**Гезеві Абдалхалех Гома Ахмед** - аспірант кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих систем управління» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, e-mail: ghezewi@ukr.net.

Стаття подана 11.10.2020.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-264-8-78-83>

УДК 621.391.175

## ОЦІНКА ПЕРІОДИЧНОСТІ КОНТРОЛЮ СПРАВНОСТІ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ З РЕЗЕРВУВАННЯМ ТА ПОКАНАЛЬНИМ КОНТРОЛЕМ СПРАВНОСТІ НА ОСНОВІ ЗАДАНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Чумаков Л.Д., Мисов О.П., Савченко М.О., Кравець В.І., Тітова О.В.

## EVALUATION OF THE PERIODICITY OF MONITORING THE MALFUNCTION OF A TECHNICAL SYSTEM WITH RESERVATION AND PAN-CHANNEL MONITORING OF MALFUNCTION ON THE BASIS OF A SET EFFICIENCY

Chumakov L.D., Mysov O.P., Savchenko M.O., Kravets V.I., Titova O.V.

Сучасні технічні системи містять, як правило, велику кількість елементів, які можуть відмовляти в процесі її експлуатації. Для забезпечення високої ефективності використання технічної системи протягом усього призначеного терміну експлуатації необхідно проводити її технічне обслуговування з метою виявлення можливих відмов і відновлення працездатного стану системи. Досліджено вплив ступеня наближення цільової функції на величину інтервалу між перевірками і ефективність використання технічних систем. Основним завданням проектування обладнання є забезпечення високого рівня його ефективності в процесі експлуатації. Це досягається як конструктивними методами, так і вибором експлуатаційних характеристик. У більшості випадків протягом усього призначеного терміну експлуатації планується проводити його обслуговування з метою виявлення можливих збоїв та відновлення стану. У цьому випадку може статися прихований збій у певному наборі параметрів, що визначають стан роботи системи. Для його усунення обладнання перевіряється на справний стан. Різні групи параметрів можуть відслідковуватися постійно, періодично або не контролюватися протягом відведеного терміну експлуатації пристрою. У статті розглядається випадок періодичного моніторингу стану. Однією з важливих експлуатаційних характеристик обладнання є розмір інтервалу між перевірками. Розподіл часу роботи каналу вважається експоненціальним. Наближене рішення задачі полягає у розширенні показника для коефіцієнта доступності підряд та пошуку коренів нелінійного рівняння. Проведено аналіз впливу на точність вирішення задачі про кількість термінів розширення. Використання цього методу зменшить кількість перевірок порівняно з оптимальною кількістю.

**Ключові слова:** перевірка, технічна система, резервування, періодичність контролю, оцінка несправності.

**Вступ.** Сучасні технічні системи містять, як правило, велику кількість елементів, які можуть відмовляти в процесі її експлуатації.

Для забезпечення високої ефективності використання технічної системи протягом усього призначеного терміну експлуатації необхідно проводити її технічне обслуговування з метою виявлення можливих відмов і відновлення працездатного стану системи.

Однією з важливих експлуатаційних характеристик системи є величина інтервалу між перевірками, яка задається в тактико-технічних вимогах. Розробнику необхідно обґрунтувати виконання цих вимог.

Як правило, вирішують задачу оптимізації:

$$K_r(\bar{\theta}^*) = \max_{\bar{\theta} \in R} K_r(\bar{\theta}),$$

де  $K_r(\bar{\theta})$  - коефіцієнт готовності,

$\bar{\theta}$  - множина інтервалів між перевірками,

$\bar{\theta}^*$  - оптимальна множина інтервалів між перевірками,

$R$  - область, яка визначає сукупність допустимих стратегій контролю.

Вирішення цього завдання для експоненціального закону часу безвідмовної роботи системи наведено в роботах [1, 2].

Зазвичай крива залежності значень коефіцієнта готовності від величини інтервалу між перевірками в районі оптимуму має пологую форму і, отже, можна зменшити кількість перевірок за умови виконання вимог до коефіцієнта готовності.

Тоді умова вибору величини  $\bar{\theta}^*$  має вигляд:

$$K_r(\bar{\theta}^*) = K_r^{зад}, \quad (1)$$

де  $\theta^*$  - множина інтервалів між перевірками, коли виконана умова (1),

$K_r^{зад}$  - задана величина коефіцієнта готовності.

**Мета статті** - показати рішення задачі вибору тривалості інтервалу між перевірками для цього випадку. Подібна задача для системи без резервування вирішена в роботі [3], а для системи з дублюванням - в роботі [4].

У цій роботі розглядається технічна система, що знаходиться в стані готовності виконати поставлене перед нею завдання на інтервалі  $[0, T]$ , де  $T$  - призначений термін експлуатації. Система складається з трьох каналів, які з'єднані за схемою "2 з 3-х" або за схемою "1 з 3-х".

У випадковий момент часу, рівномірно розподілений на інтервалі  $[0, T]$ , може надійти команда на застосування технічної системи. При цьому можливе існування прихованої відмови по деякій множині параметрів, що визначають працездатність системи. Для його усунення проводяться перевірки справності технічної системи. Різні групи параметрів можуть контролюватися безперервно, періодично або не контролюватися протягом усього терміну експлуатації. Завдання оцінки ефективності експлуатації технічної системи при агрегатному методі ремонту розглянуті в роботах [5, 6].

**Результати досліджень.** В даному випадку розглядається періодичний контроль справності.

Нехай час безвідмовної роботи каналу розподілено по експонентному закону  $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ , де  $\lambda$  - інтенсивність відмов одного з каналів системи. Для системи без резерву оптимальною стратегією контролю в повному обсязі є рівномірне розташування перевірок [1-5], тому в нашому випадку можна розглянути один інтервал між перевірками.

Вираз для коефіцієнта готовності при резервуванні за схемою "2 з 3-х", прийнявши, що час заміни дуже малий, запишемо наступним чином:

$$K_r(\theta) = \frac{\frac{3}{2}(1 - e^{-2\lambda\theta}) - \frac{2}{3}(1 - e^{-3\lambda\theta})}{\lambda(\theta + \tau)}, \quad (2)$$

де  $\theta$  - величина інтервалу між перевірками;

$\tau$  - тривалість перевірки.

Тоді умова вибору величини  $\theta^*$  має вигляд (1).

Наближене рішення задачі можна шукати, розкладаючи експоненти у виразі (2) в ряд і беручи різне число членів розкладання.

Формула (2) буде виглядати наступним чином: для 3-х членів розкладання

$$K_r(\theta) \approx \frac{\theta - \lambda^2\theta^3}{\theta + \tau}, \quad (3)$$

для 4-х членів розкладання

$$K_r(\theta) \approx \frac{\theta - \lambda^2\theta^3 + \frac{5}{4}\lambda^3\theta^4}{\theta + \tau}, \quad (4)$$

для 5-ти членів розкладання

$$K_r(\theta) \approx \frac{\theta - \lambda^2\theta^3 + \frac{5}{4}\lambda^3\theta^4 - \frac{19}{20}\lambda^4\theta^5}{\theta + \tau}, \quad (5)$$

Нехай канал системи складається з одного комп'ютера з інтенсивністю відмов  $\lambda = 0,8649$  1/г. Час перевірки справності системи  $\tau = 0,0044$  м [7]. При оптимальній стратегії контролю  $K_r(\theta^{opt}) = 0,9176$ . Якщо потрібно забезпечити  $K_r^{зад} = 0,95$ , то в цьому випадку необхідно застосувати резервування каналів, наприклад, за схемою "2 з 3-х".

Графіки залежності коефіцієнта готовності системи від величини інтервалу між перевірками, побудовані на підставі формул (2-5) наведені на рис.1.

Для пошуку величини інтервалу між перевірками з умови (1) знайдемо відповідні рівняння.

Використовуючи вираз (3), отримаємо наступне рівняння:

$$\lambda^2\theta^3 - (1 - K_r^{зад})\theta + K_r^{зад}\tau = 0, \quad (6)$$

Якщо використовувати вираз (4), то рівняння матиме такий вигляд:

$$\frac{5}{4}\lambda^3\theta^4 - \lambda^2\theta^3 + (1 - K_r^{зад})\theta - K_r^{зад}\tau = 0, \quad (7)$$

Перетворюючи вираз (5), отримаємо рівняння 5-го ступеня:

$$\frac{19}{20}\lambda^4\theta^5 - \frac{5}{4}\lambda^3\theta^4 + \lambda^2\theta^3 - (1 - K_r^{зад})\theta + K_r^{зад}\tau = 0, \quad (8)$$

Рішення таких рівнянь викликає певні труднощі, однак розроблені алгоритми, що дозволяють знаходити їх вирішення [8]. Як видно з малюнка 1, кращі рішення виходять при використанні виразу (8).

Оцінимо величини шуканих і оптимальних міжперевірочний інтервалів для нашого прикладу.

Таким чином, відмова від призначення оптимальних величин міжперевірочний інтервалів і використання інтервалів, що забезпечують заданий рівень готовності, може зменшити число перевірок і зменшити вартість експлуатації.

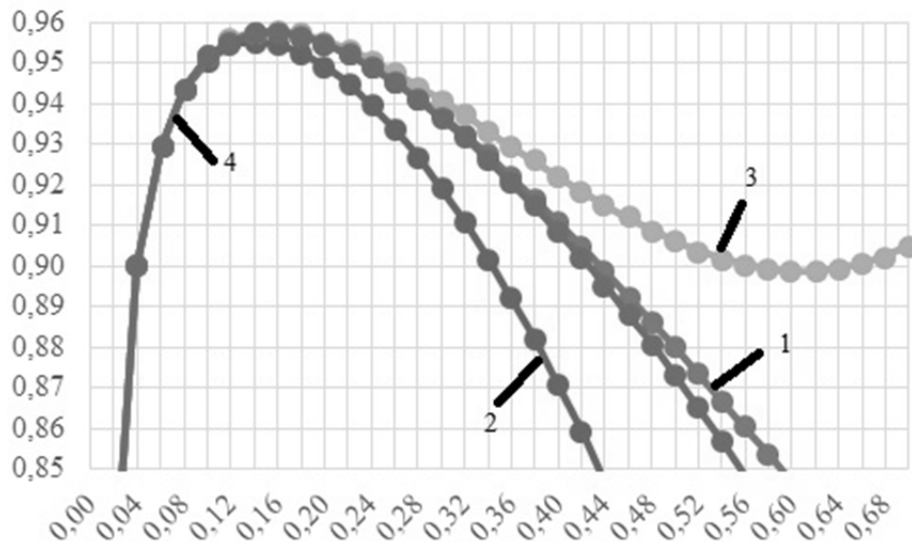


Рис. 1. Залежність коефіцієнта готовності від величини інтервалу між перевірками, де 1 – ехр; 2 - 3 ступінь; 3 - 4 ступінь; 4 - 5 ступінь

Таблиця 1

Величини інтервалів між перевірками і коефіцієнтів готовності

Рівняння	$\theta^*$ год	$\theta^{\text{опт}}$ год	$K_r(\theta^*)$	$K_r(\theta^{\text{опт}})$	$\theta^*/\theta^{\text{опт}}$
Експоненти	0,235	0,15	0,9499	0,9576	1,6
3-я ступінь	0,196	0,14	0,9499	0,9553	1,4
4-я ступінь	0,244	0,16	0,9501	0,9578	1,5
5-я ступінь	0,234	0,15	0,9499	0,9575	1,6

Розглянемо систему з резервуванням "1 з 3-х".  
Вираз для коефіцієнта готовності

$$K_r(\theta) = \frac{18(1 - e^{-\lambda\theta}) - 9(1 - e^{-2\lambda\theta}) + 2(1 - e^{-3\lambda\theta})}{6\lambda(\theta + \tau)}, \quad (9)$$

Розкладаючи експоненти у виразі (9) в ряд і беручи різне число членів розкладання, отримаємо:  
для 2-х членів розкладання

$$K_r(\theta) \approx \frac{\theta - \frac{1}{4}\lambda^3\theta^4}{\theta + \tau}, \quad (10)$$

для 3-х членів розкладання

$$K_r(\theta) \approx \frac{\theta - \frac{1}{4}\lambda^3\theta^4 + \frac{3}{10}\lambda^4\theta^5}{\theta + \tau}, \quad (11)$$

для 4-х членів розкладання

$$K_r(\theta) \approx \frac{\theta - \frac{1}{4}\lambda^3\theta^4 + \frac{3}{10}\lambda^4\theta^5 - \frac{5}{24}\lambda^5\theta^6}{\theta + \tau}, \quad (12)$$

для 5 членів розкладання

$$K_r(\theta) \approx \frac{\theta - \frac{1}{4}\lambda^3\theta^4 + \frac{3}{10}\lambda^4\theta^5 - \frac{5}{24}\lambda^5\theta^6 + \frac{3}{28}\lambda^6\theta^7}{\theta + \tau}, \quad (13)$$

Якщо потрібно забезпечити  $K_r^{\text{зад}} = 0,98$ , то в цьому випадку необхідно застосувати резервування каналів за схемою "1 з 3-х".

Графіки залежності коефіцієнта готовності системи від величини інтервалу між перевірками, побудовані на підставі формул (9-13) наведені на рис. 2.

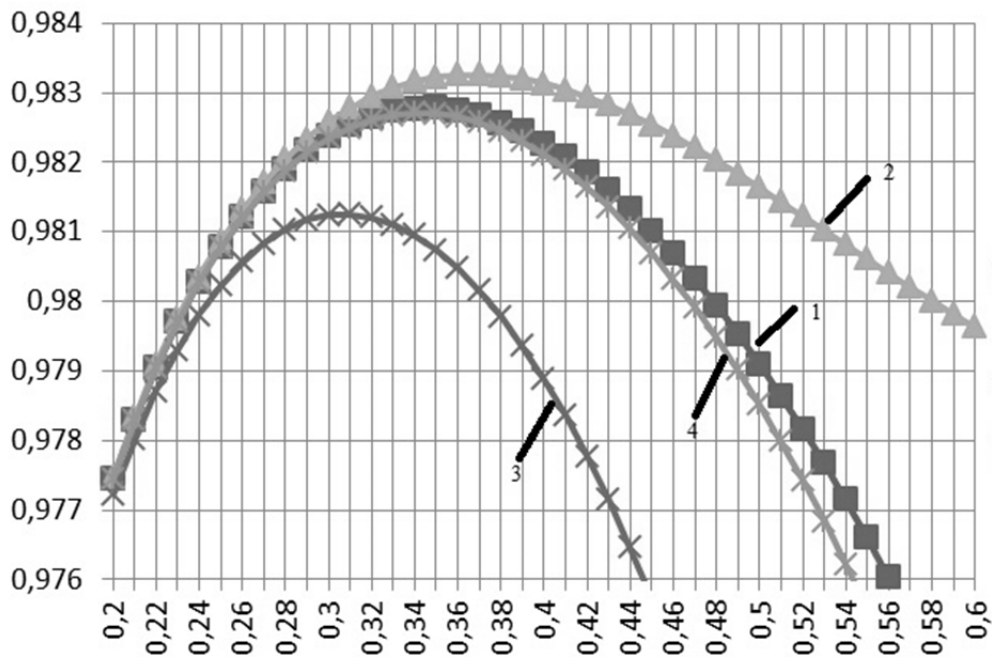


Рис. 2. Залежність коефіцієнта готовності від величини інтервалу між перевірками для схеми "1 з 3-х", де 1 - 5 ступінь; 2 - 4 ступінь; 3 - 6 ступінь; 4 - 7 ступінь

Таблиця 2

Величини інтервалів між перевірками і коефіцієнтів готовності

Рівняння	$\theta^*$ год	$\theta^{опт}$ год	$K_r(\theta^*)$	$K_r(\theta^{опт})$	$\theta^*/\theta^{опт}$
Експоненти	0,48	0,35	0,9799	0,9828	1,4
5-я ступінь	0,48	0,35	0,9799	0,9828	1,4
4-я ступінь	0,58	0,37	0,9800	0,9833	1,6
6-я ступінь	0,38	0,31	0,9799	0,9798	1,2
7-я ступінь	0,47	0,34	0,9801	0,9827	1,4

Використовуючи вираз (10), отримаємо наступне рівняння:

$$\lambda^3 \theta^4 - 4(1 - K_r^{зад})\theta + 4K_r^{зад} \tau = 0, \quad (14)$$

Якщо використовувати вираз (11), то рівняння матиме такий вигляд:

$$12\lambda^4 \theta^5 - 10\lambda^3 \theta^4 + 40(1 - K_r^{зад})\theta - 40K_r^{зад} \tau = 0, \quad (15)$$

Перетворюючи вираз (12), отримаємо рівняння 6-го ступеня:

$$111\lambda^5 \theta^6 - 216\lambda^4 \theta^5 + 180\lambda^3 \theta^4 - 720(1 - K_r^{зад})\theta + 720K_r^{зад} \tau = 0, \quad (16)$$

З виразу (13) випливає:

$$4247\lambda^6 \theta^7 - 777\lambda^5 \theta^6 + 1512\lambda^4 \theta^5 - 1260\lambda^3 \theta^4 + 5040(1 - K_r^{зад})\theta - 5040K_r^{зад} \tau = 0, \quad (17)$$

**Висновок.** Відмова від призначення оптимальних величин інтервалів між перевірками і використання інтервалів, що забезпечують заданий рівень готовності, може також зменшити число перевірок і вартість експлуатації.

Таким чином, в даній роботі проведені дослідження по визначенню величини інтервалу між перевірками справності технологічної системи з резервуванням за схемою "2 з 3-х" і "1 з 3-х" за умови виконання вимог до її ефективності.

Показано, що цей підхід може скоротити кількість перевірок у порівнянні з оптимальною стратегією і дати економічний ефект.

Для резервування за схемою "2 з 3-х" і "1 з 3-х" скорочення кількості перевірок менше, ніж при системі з дублюванням.

## Література

1. Волик Б.Г. Работоспособность управляющих систем. Датчики и системы, - 2010. №5 с. 75-78.
2. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности: Основные характеристики надежности и их статистический анализ. Изд.2. М.: URSS, 2013. - 584 с.
3. Черкесов, Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: учеб, пособие / Г. Н. Черкесов. — СПб.: Питер, 2005.
4. Шубинский, И. Б. Функциональная надежность информационных систем: методы анализа / И. Б. Шубинский. — Ульяновск : Надежность, 2012.
5. Сердаков А.С. Автоматический контроль и техническая диагностика. — Киев : Техника, 1971. — 244 с.
6. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики / Под ред. П.П. Пархоменко. — М. : Энергия, 1981. — 320 с.
7. L.D. Chumakov, Selection of strategy of control of good state of technical system with duplication of channels and verification of their good state on the basis of given value of efficiency, System technologies., 4(123), Dnipro, 2019., P.106-111.
8. Calculation of the roots of a polynomial [Electronic resource], Electronic data., Access Mode: www.wolframalpha.com, free, The title from the screen.

## References

1. Volik B.G. Rabotosposobnost' upravlyayushchikh sistem. Datchiki i sistemy [The performance of control systems. Sensors and Systems]. 2010. No. 5 p. 75-78 p. (in Russian).
2. Gnedenko B.V., Belyayev YU.K., Solov'yev A.D. Matematicheskiye metody v teorii nadezhnosti: Osnovnyye kharakteristiki nadezhnosti i ikh statisticheskiy analiz [Mathematical methods in the theory of reliability: The main characteristics of reliability and their statistical analysis]. Vol. 2. M. : URSS, 2013. - 584 p. (in Russian).
3. Cherkesov, G. N. Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov [Reliability of hardware and software systems]. Textbook, manual. St. Petersburg: Peter, 2005. (in Russian).
4. Shubinskiy, I. B. Funktsional'naya nadezhnost' informatsionnykh sistem: metody analiza [Functional reliability of information systems: analysis methods]. Ulyanovsk: Reliability, 2012. (in Russian).
5. A.S. Serdakov, Avtomaticheskii kontrol' i tekhnicheskaya diagnostika [Automatic control and technical diagnostics]. Kiev, Technique, 1971. (in Russian).
6. P.P. Parkhomenko, E.S. Soghomonyan, Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki [Fundamentals of technical diagnostics], Ed. P.P. Parkhomenko]. M., Energy, 1981. (in Russian).
7. L.D. Chumakov, Selection of strategy of control of good state of technical system with duplication of channels and verification of their good state on the basis of given value of efficiency, System technologies, 4(123), Dnipro, 2019., pp.106-111.
8. Calculation of the roots of a polynomial [Electronic resource], Electronic data., Access Mode: www.wolframalpha.com, free, The title from the screen.

**Чумаков Л.Д., Мысов О.П., Савченко М.О., Кравец В.И., Титова Е.В. Оценка периодичности контроля исправности технической системы с резервированием и поканальным контролем исправности на основе заданной эффективности**

*Современные технические системы содержат, как правило, большое количество элементов, которые могут отказывать в процессе ее эксплуатации. Для обеспечения высокой эффективности использования технической системы в течение всего назначенного срока эксплуатации необходимо проводить ее техническое обслуживание с целью выявления возможных отказов и восстановления работоспособного состояния системы. Исследовано влияние степени приближения целевой функции на величину интервала между проверками и эффективность использования технических систем. Основной задачей проектирования оборудования является обеспечение высокого уровня его эффективности при эксплуатации. Это достигается как конструктивными методами, так и выбором эксплуатационных характеристик. В большинстве случаев в течение всего назначенного срока службы планируется проводить техническое обслуживание, чтобы выявить возможные сбои и восстановить работоспособное состояние. В этом случае возможен скрытый сбой в определенном наборе параметров, которые определяют состояние системы. Чтобы устранить это, оборудование проверяется на исправность. Различные группы параметров могут отслеживаться непрерывно, периодически или не контролироваться в течение всего назначенного срока службы устройства. В статье рассмотрен случай периодического мониторинга работоспособного состояния. Одной из важных эксплуатационных характеристик оборудования является величина интервала между проверками. Распределение времени работы канала предполагается экспоненциальным. Приближенное решение задачи состоит в увеличении показателя степени для коэффициента доступности в ряд и нахождении корней нелинейного уравнения. Проведен анализ влияния на точность решения задачи числа членов разложения. Использование этого метода уменьшит количество проверок по сравнению с оптимальным количеством.*

**Ключевые слова:** проверка, техническая система, резервирование, периодичность контроля, оценка неисправности.

**Chumakov L.D., Mysov O.P., Savchenko M.O., Kravets V.I., Titova O.V. Evaluation of the periodicity of monitoring the malfunction of a technical system with reservation and pan-channel monitoring of malfunction on the basis of a set efficiency**

*Modern technical systems contain, as a rule, a large number of elements that may fail during its operation. To ensure high efficiency of the use of the technical system during the entire designated period of operation, it is necessary to carry out its maintenance in order to identify possible failures and restore the working state of the system. In article discusses the issues of finding the duration of the interval between checks of the serviceable condition of technical systems with redundant channels when monitoring the health of the channels carried out according to the criterion of a set value of availability function. The influence of the degree of approximation of the objective function on the value of the interval between checks and the efficiency of using technical systems is investigated. The main task of designing equipment is to ensure a high level of its efficiency during operation. This is achieved both by constructive methods and by the choice of operational characteristics. In most cases, during the entire*

*assigned lifetime, it is planned to carry out its maintenance in order to identify possible failures and restore an up state. In this case, there may be a latent failure in a certain set of parameters that determine the up state of the system. To eliminate it, the equipment is checked for good state. Different groups of parameters can be monitored continuously, periodically or not monitored throughout the assigned lifetime of the device. The article considers the case of periodic monitoring of an up state. One of the important operational characteristics of the equipment is the size of the interval between checks. Channel operating time distribution is assumed to be exponential. An approximate solution to the problem consists in expanding the exponent for the availability factor in a row and finding the roots of the nonlinear equation. The analysis of the influence on the accuracy of solving the problem of the number of expansion terms is carried out. Thus, refusal to assign the optimal values of the intervals between checks and the use of intervals that provide a given level of readiness can reduce the number of checks and the operation cost.*

**Keywords:** *verification, technical system, reservation, frequency of control, fault assessment*

**Чумаков Лев Дмитрович** – доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та автоматизації ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна), e-mail: [chucha08@meta.ua](mailto:chucha08@meta.ua)

**Мисов Олег Петрович** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та автоматизації ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна), e-mail: [musov@ua.fm](mailto:musov@ua.fm)

**Савченко Марія Олегівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри кафедра технології неорганічних речовин і екології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна), e-mail: [mashanew1@rambler.ru](mailto:mashanew1@rambler.ru)

**Кравець Василь Іванович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна), e-mail: [kravetsvasiliyivanovich@gmail.com](mailto:kravetsvasiliyivanovich@gmail.com)

Адреса для переписки: відділення Нової пошти № 13, м. Дніпро

**Тітова Олена Василівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та автоматизації ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» (м. Дніпро, Україна). e-mail: [elenatitova@gmail.com](mailto:elenatitova@gmail.com)

**ВІСНИК  
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ  
№ 8 (264) 2020**

**Науковий журнал**

Відповідальний за випуск

Лорія М.Г.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

**Статті надруковано в авторській редакції**

Підписано до друку 12.01.2021 р.  
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.  
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 9,7. Обл.-вид. арк. 10,9.  
Наклад 50 прим. Вид. № 3303. Заказ № 4(2021). Ціна вільна.

Видавництво  
Східноукраїнського національного університету  
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

**Адреса університета:** просп. Центральний 59-А  
м. Северодонецьк, 93400, Україна  
**E-mail:** [vidavnictvoSNU.ua@gmail.com](mailto:vidavnictvoSNU.ua@gmail.com)

Надруковано:  
Відділ технічного обслуговування СНУ ім. В. Даля  
Адреса: просп. Центральний, 59-а  
м. Северодонецьк, 93400