

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



В І С Н И К

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 2 (288)
2025**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 2 (288) 2025

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

№ 2 (288) 2025

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.), (Наказ МОН №157 від 09.02.2021 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(print)

ISSN 2664-6498 (online)

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,

Глікіна І.М., 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,

Могила В.І., докт. 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,

Целіщев О. Б., докт. техн. наук

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

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 8 від 28 березня 2025 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2025

© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2025

З М І С Т

Спеціальність 122

- Лаговський В.В., Лаговський О.В., Ніжегородцев В.О., Філоненко М.М., Скасків Л.В.**
ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРНИХ ПРОГРАМНИХ РІШЕНЬ З ТЕХНОЛОГІЄЮ RSS 5
- Помінчук Я.В., Грищенко С.М.**
ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРСОНАЛЬНОГО ВЕБСАЙТУ В ПОРІВНЯННІ З ТРАДИЦІЙНИМИ
МЕТОДАМИ ПОШУКУ РОБОТИ 14

Спеціальність 133

- Лях М.М., Фурса Р.П., Витвицький В.С., Михайлюк В.В., Процюк Г.Я., Михайлюк В.Т.**
МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ГАЗОРІДІННОГО СЕПАРАТОРА 24

Спеціальність 141

- Brozhko R.M.**
TYPES AND PROSPECTS OF NON-TRADITIONAL AND RENEWABLE ENERGY
SOURCES IN UKRAINE 32
- Кириченко О.С.**
АНАЛІЗ ПРИСТРОЮ ПЕЛЬТЬЄ З ЕПОКСИДНИМ КОМПАУНДОМ ДЛЯ СУДНОВИХ
АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ТА ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ 37
- Стрункін Г.М.**
ОЦІНЮВАННЯ МАСИ ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ
УСТАНОВКИ З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ НА БАЗІ
АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ФАЗНИМ РОТОРОМ 49

Спеціальність 151

- Водяник Б.Р., Лорія М.Г., Дуришев О.А.**
ЗАСТОСУВАННЯ ФІЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ГАЗОВОЇ ФАЗИ
ТА УПРАВЛІННЯ КАТАЛІТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ У ВИРОБНИЦТВІ АМІАКУ 56
- Карпюк Л.В., Давіденко Н.О., Кобзарев Є.О.**
ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ AUTOCAD
ПРИ ВИВЧЕННІ ТЕХНІЧНИХ ДИСЦИПЛІН 61
- Моркун В.С., Моркун Н.В., Олійник Т.А., Грищенко Я.О.**
МОДЕЛЮВАННЯ ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО
СИГНАЛУ ДЛЯ ВИРШЕННЯ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ЗАЛІЗНОЇ РУДИ 68

Спеціальність 273

- Фомін О.В., Козинка О.С., Красулін О.С., Саченок Д.С.**
АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ ЕПОКСИДНОГО ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ
ДЛЯ НЕСІВНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ЗАСОБІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ 79

CONTENTS

Speciality 122

- Lagovskyi V.V., Lahovskyi O.V., Nizhehorodtsev V.O., Filonenko M.M., Skaskiv L.V..**
STRUCTURAL FEATURES OF SOFTWARE SOLUTIONS WITH RSS TECHNOLOGY..... 5
- Pominchuk Y.V., Hryshchenko S.M.**
THE EFFECTIVENESS OF A PERSONAL WEBSITE COMPARED TO TRADITIONAL
JOB SEARCH METHODS..... 14

Speciality 133

- Liakh M.M., Fursa R.P., Vytvytskyi V.S., Mykhailiuk V.V., Protsiuk H.Y., Mykhailiuk V.T.**
MODELING OF THE OPERATION OF A GAS-LIQUID SEPARATOR 24

Speciality 141

- Brozhko R.M.**
TYPES AND PROSPECTS OF NON-TRADITIONAL AND RENEWABLE ENERGY
SOURCES IN UKRAINE 32
- Kyrychenko O.S.**
ANALYSIS OF THE PELTIER DEVICE WITH EPOXY COMPOUND FOR SHIP
AUTOMATED COOLING AND THERMOSTABILIZATION SYSTEMS..... 37
- Strunkin H.M.**
EVALUATION OF THE MASS OF THE MAIN EQUIPMENT OF A WIND POWER PLANT
WITH AERODYNAMIC MULTIPLICATION BASED ON AN ASYNCHRONOUS GENERATOR
WITH A PHASE ROTOR 49

Speciality 151

- Vodianyuk B.R., Loria M.G., Duryshch O.A.**
APPLICATION OF THE KALMAN FILTER FOR GAS PHASE MONITORING
AND CONTROL OF CATALYTIC PROCESSES IN AMMONIA PRODUCTION 56
- Karpiuk L.V., Davidenko N.O., Kobzarev E.O.**
PARAMETRIC MODELING IN THE AUTOCAD ENVIRONMENT IN THE STUDY
OF TECHNICAL DISCIPLINES 61
- Morkun V.S., Morkun N.V., Oliynyk T.A., Hryshchenko Y.O.**
MODELING OF EDDY CURRENT TRANSFORMATION OF AN ELECTROMAGNETIC
SIGNAL TO SOLVE THE PROBLEM OF DETERMINING THE CHARACTERISTICS
OF IRON ORE 68

Speciality 273

- Fomin O.V., Kozyinka O.S., Krasulin A.S., Sachenok D.S.**
ANALYSIS OF THE PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF EPOXY
PROTECTIVE COATING FOR LOAD-BEARING METAL STRUCTURES
OF RAILWAY TRANSPORT VEHICLES..... 79

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-5-13>

УДК 004.89:659

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРНИХ ПРОГРАМНИХ РІШЕНЬ З ТЕХНОЛОГІЄЮ RSS

Лаговський В.В., Лаговський О.В., Ніжегородцев В.О.,
Філоненко М.М., Скасків Л.В.

STRUCTURAL FEATURES OF SOFTWARE SOLUTIONS WITH RSS TECHNOLOGY

Lagovskyi V.V., Lahovskyi O.V., Nizhehorodtsev V.O.,
Filonenko M.M., Skaskiv L.V.

Стаття присвячена аналізу структурних особливостей та архітектурних підходів до розробки програмних рішень, що інтегрують технологію RSS (Really Simple Syndication). Підкреслюється актуальність RSS для автоматизованого збору, обробки й поширення інформації з веб-ресурсів. Цінність технології полягає у стандартизованому XML-форматі, що спрощує агрегацію та дозволяє ефективно керувати інформаційними потоками.

Розглянуто ключові переваги RSS: оптимізація отримання даних, контроль користувача над контентом без алгоритмів, анонімність, уніфікований формат без реклами, надійність та офлайн-доступ. Проаналізовано недоліки: змінна повнота контенту, відсутність інтерактивності, потреба у спеціалізованих агрегаторах, ризик інформаційного перевантаження та обмежена підтримка мультимедіа.

Обговорюються технічні аспекти побудови RSS-систем. Обґрунтовано критичну важливість автономного збору та збереження даних у власній БД агрегатора. Це запобігає навантаженню на джерела, підвищує швидкість доступу та уможливує реалізацію пошуку, фільтрації, аналізу. Порівнюється доцільність використання документно-орієнтованих БД (гнучкість) та реляційних (структурованість, цілісність, усунення дублікатів).

Приділено увагу проблемі дублювання новин; розглядаються методи дедуплікації на основі порівняння заголовків/описів, аналізу текстової та семантичної схожості. Висвітлено виклики інтернаціоналізації: необхідність автовизначення мови та уніфікації часу публікації до UTC.

Запропоновано архітектурний підхід з окремим програмним модулем обробки RSS. Модуль включає підсистеми збору/парсингу, обробки (дедуплікація, уніфікація, визначення мови/часу, класифікація), збереження даних у БД та сортування/пошуку (з індексацією). Наголошено на потребі автономної роботи модуля, обробки помилок та взаємодії через API.

У висновках зазначено, що RSS залишається ефективним інструментом, але вимагає продуманих структурних рішень. Правильна архітектура забезпечує ефективну агрегацію, знижує навантаження на джерела, дає масштабованість та інтеграцію функцій. Перспективним напрямком є використання ШІ та машинного навчання для глибшого аналізу й персоналізації RSS-контенту.

Ключові слова: RSS, програмний модуль, база даних, структура програмного забезпечення, XML, парсинг, дедуплікація.

Вступ. У сучасному світі, де інформація стала одним із найважливіших ресурсів, технології, що спрощують її збір, обробку та поширення, набувають особливого значення. Однією з таких технологій є RSS – (Really Simple Syndication), яка дозволяє автоматизувати процес отримання оновлень з різних джерел у зручному форматі. Використання RSS у структурних програмних рішеннях відкриває нові можливості для інтеграції даних, створення динамічних систем та підвищення ефективності роботи з інформацією.

У статті розглядаються особливості впровадження технології RSS у програмні рішення, її переваги, а також ключові аспекти, які необхідно враховувати при розробці таких систем. Дослідження цієї теми є актуальним, оскільки, незважаючи на зростання популярності соціальних мереж та інших методів розповсюдження контенту, впровадження RSS у сучасні програмні рішення залишається актуальним [12]. RSS продовжує залишатися важливим інструментом у сферах, пов'язаних із збором, аналізом та розповсюдженням даних.

RSS використовується для автоматичного отримання оновлень із вебсайтів, зокрема новинних порталів, блогів, подкастів, форумів та інших ресурсів, що регулярно публікують новий контент. Завдяки RSS користувачі можуть підписуватися на стрічки новин і отримувати нові публікації в одному місці - у спеціальних RSS-ридерах або агрегаторах, не заходячи щоразу на кожен сайт окремо. Це зручно для тих, хто стежить за великою кількістю джерел інформації, адже RSS дозволяє економити час і не пропускати важливі оновлення.

Цей успіх намагається перехопити технологія Atom, яка є його логічним продовженням і спробою створити більш сучасний, структурований та універсальний формат для розповсюдження вебконтенту. Однак в спробах удосконалити попередній формат було втрачено його особливості, які з часом виявилися потрібнішими ніж очікувалося.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Опис об'єкту дослідження та розглянутий стандарт RSS 2.0. було наведено в офіційній документації RSS [1]; інформація про розвиток ІТ сектору у світі та попит на технології швидкої та уніфікованої передачі даних розкриті у дослідженні [2]; тенденції використання технології RSS підтвержені у праці [3]; актуальність RSS та подібних технологій для обробки великими з мовними моделями та подібними нейронними мережами для аналізу інформації представлена в змісті [4]; демонстрація перспектив технологій RSS наведено в джерелі [5]; інші можливості, тренди та тенденції, а також можливість використовувати публічних агрегаторів для популяризації свого продукту чи платформи описані в працях [6-12].

Метою даної роботи є узагальнення необхідних особливостей архітектури додатків або програмних модулів для роботи з

технологію RSS і їй подібних. Найбільший акцент буде стояти на аспектах зберігання даних і їх подальшої обробки.

Постановка задачі. Для досягнення цієї мети були розглянуті сучасні методи та інструменти програмування та аналізу даних. Результатом роботи став детальний опис вимог до програмного коду для правильної роботи з обраним типом даних. У дослідженні було описано методи збору інформації з RSS каналів для подальшої обробки та надано рекомендації щодо структури бази даних, які можуть бути використанні в тандемі з технологією RSS. Для програмної реалізації обрано сучасні засоби розробки, апаратна платформа базується на поширеній компонентній базі.

Викладання основного матеріалу. У сучасному інформаційному суспільстві однією з ключових технологій обміну та доставки контенту є RSS (Really Simple Syndication). Цей формат став фундаментальним для організації автоматизованого доступу до оновлень вебресурсів. В контексті програмної інженерії, інтеграція RSS вимагає розробки специфічних структурних рішень, які забезпечують ефективну обробку, зберігання та передачу даних. Програми, що працюють з RSS, зазвичай реалізуються за принципами клієнт-серверної архітектури. Сервери надають стрічки новин у вигляді XML-файлів, а клієнти (RSS-агрегатори) періодично перевіряють наявність оновлень. У таких системах важливе значення має модульність, що дозволяє розмежувати обробку XML-даних, збереження інформації в базах даних і візуалізацію для користувача.

RSS це технологія, яка дозволяє автоматично отримувати оновлення з вебсайтів, блогів, новинних ресурсів або інших джерел контенту у стандартизованому форматі, вона являє собою формат веб-синдикації, що використовується для надання користувачам та програмам доступу до оновлень вебсайтів у машиночитаному форматі [6].

Основна мета RSS полягає в тому, щоб спростити процес поширення та отримання інформації. Замість того, щоб постійно особисто відвідувати різні сайти виявлення та дослідження оновленого контенту, користувачі можуть підписатися на оновлення через RSS-канали, що дозволяє їм залишатися в курсі новин без зайвих зусиль.

RSS використовує XML-формат для структурування даних, що робить його зручним для обробки різними програмами та сервісами. Вебсайти, які підтримують RSS, публікують

свої оновлення у вигляді спеціальних стрічок, які називаються RSS-каналами. Ці стрічки містять заголовки, короткі описи, посилання на повні версії статей або інший контент, а також інші метадані. Коли на сайті з'являється нова публікація, RSS-канал автоматично оновлюється, і користувачі, які підписалися на цей канал, отримують сповіщення через спеціальні програми, відомі як RSS-агрегатори або RSS-рідери. Технічно, RSS-канал вебсайту можна знайти за постійною URL-адресою, і він надає користувачам найновішу версію машиночитаного XML-файлу.

До переваг RSS найчастіше відносять:

– оптимізація процесу отримання актуальної інформації. RSS усуває необхідність у періодичному ручному моніторингу численних вебсайтів, оскільки технологія централізує надходження нового контенту в єдиному інтерфейсі RSS-агрегатора, адже це призводить до значного підвищення ефективності споживання інформації та скорочення часових витрат користувача;

– надання користувачеві контролю над інформаційним потоком, оскільки на відміну від багатьох сучасних платформ, що застосовують алгоритмічну фільтрацію контенту, RSS забезпечує доставку всіх матеріалів із обраних користувачем джерел, а контент зазвичай подається у хронологічній послідовності або відповідно до налаштувань користувача, що унеможливує пропуск релевантних публікацій через зовнішні алгоритмічні впливи;

– процес підписки на RSS-канали, як правило, є анонімним і не вимагає надання персональних ідентифікаційних даних (наприклад, адреси електронної пошти), що мінімізує ризики несанкціонованого збору даних про інформаційні пререференції користувача та знижує ймовірність отримання небажаних комерційних повідомлень;

– використання RSS-агрегаторів часто сприяє концентрованому сприйняттю контенту, а багато таких програмних рішень представляють інформацію (заголовки, анотації, повні тексти) в уніфікованому, мінімалістичному форматі, позбавленому сторонніх візуальних елементів інтерфейсу вихідних вебсайтів, включно з рекламними блоками та іншими компонентами, що можуть відволікати увагу від основного змісту;

– забезпечує надійність та повноту інформаційного моніторингу обраних ресурсів, оскільки відсутній механізм зовнішньої алгоритмічної фільтрації та всі опубліковані

матеріали з підписаних каналів доставляються в агрегатор користувача;

– деякі програмні RSS-агрегатори підтримують функцію кешування контенту, що уможливує його відкладений перегляд в умовах відсутності доступу до мережі Інтернет (офлайн-доступ).

Однак RSS має і свої недоліки:

– неуніфікованість повноти контенту, оскільки відсутній єдиний стандарт щодо обсягу інформації, яка передається через RSS-канал; деякі джерела надають лише заголовки та короткі анотації, що вимагає переходу на оригінальний сайт для ознайомлення з повним текстом статті, інші надають повний контент; форматування та структура даних можуть суттєво відрізнятися між різними фідами, що впливає на консистентність представлення інформації в агрегаторі;

– відсутність інтерактивності, оскільки RSS за своєю архітектурою є переважно односпрямованою технологією передачі даних; стандартний протокол не передбачає вбудованих механізмів для взаємодії користувача з контентом, таких як коментування; оцінювання (лайки) чи поширення матеріалів безпосередньо з інтерфейсу більшості RSS-агрегаторів, а для здійснення таких дій необхідний перехід на першоджерело;

– необхідність використання спеціалізованого програмного забезпечення, оскільки для роботи з RSS-каналами користувачеві потрібен окремий програмний інструмент: RSS - агрегатор (десктопна програма, мобільний додаток або вебсервіс), адже це може створювати певний поріг входження для осіб - не знайомих з цією технологією та вимагає додаткових дій порівняно з прямим відвідуванням вебсайтів або використанням інтегрованих платформ;

– ризик інформаційного перевантаження, хоча й RSS покликаний оптимізувати споживання інформації: підписка на значну кількість джерел та може призвести до протилежного ефекту - інформаційного перевантаження; великий обсяг непрочитаних повідомлень в агрегаторі може ускладнити виокремлення дійсно важливої інформації;

– проблеми з оновленням статичного контенту; інформація, передана через RSS-канал, може бути статичним знімком на момент публікації; якщо оригінальну статтю на сайті було оновлено або виправлено після синдикації,

ці зміни не завжди автоматично відображаються в RSS-фіді та, відповідно, в агрегаторі користувача;

— обмежена підтримка мультимедіа; технічно RSS може передавати посилання на мультимедійні файли, їх вбудоване відображення та інтерактивність в середовищі RSS-агрегаторів часто є менш функціональними та уніфікованими порівняно з досвідом перегляду на оригінальних вебсайтах.

Відповідно до цих особливостей сформувалася чітка ніша для цієї технології. RSS широко використовується на новинних сайтах для швидкого поширення новин, у блогах для інформування підписників про нові статті, а також у подкастах для розповсюдження аудіо-або відеоконтенту. Електронні бібліотеки також часто використовують RSS для повідомлення про нові книги або статті.

Таким чином, RSS залишається важливим інструментом для тих, хто прагне ефективно управляти інформаційними потоками та отримувати актуальні оновлення з обраних джерел. Його простота та універсальність роблять його зручним рішенням для поширення та отримання інформації в Інтернеті. Не зважаючи на чітку структуру RSS-файлів, зустрічаються випадки коли деякі теги ігноруються. Таким чином вони просто залишаються пустими або ж не присутні взагалі. Це дуже важлива особливість яка повинна враховуватися при обробці відповідних файлів.

Збереження RSS-даних є важливим не лише для зручності користувачів, а й для етичного та ефективного використання ресурсів джерел. Якщо для кожного окремого користувача виконувати збір даних безпосередньо з сайтів у режимі реального часу, це може призвести до надмірного навантаження на сервери цих ресурсів. Особливо це актуально для популярних сайтів із великою кількістю читачів. Часті запити від численних користувачів фактично створюють ефект розподіленої атаки на відмову в обслуговуванні (DDoS), навіть якщо це не є навмисною дією. Таке навантаження не лише шкодить власникам сайтів, а й може призвести до обмежень або блокування доступу для сервісів, що збирають RSS-канали.

Натомість оптимальним рішенням є періодичне збереження RSS-даних на стороні агрегатора. Це дозволяє виконувати збір інформації з джерел із оптимальною періодичністю — наприклад, кожні кілька хвилин або годин, залежно від потреб.

Збережені дані зберігаються в базі даних і стають доступними для користувачів без потреби повторного звернення до джерела. Такий підхід не лише знижує навантаження на сторонні сайти, а й підвищує швидкість доступу до даних для користувачів, оскільки інформація надається безпосередньо з локального сховища. Крім того, це дозволяє реалізувати додаткові функції, як-от фільтрація, пошук за ключовими словами, аналіз дублювань та персоналізовані рекомендації, не порушуючи етичних принципів використання веб-ресурсів.

Таким чином, збереження RSS-даних у власній базі даних є не лише технічно доцільним, а й необхідним для підтримання стабільної та взаємовигідної взаємодії між сервісом агрегування та джерелами інформації. Вибір між документно-орієнтованою та реляційною базою даних для зберігання даних із RSS-стрічок залежить від природи додатку і способу його використання. Документні бази даних, такі як MongoDB, особливо добре підходять для роботи з RSS-даними завдяки своїй гнучкості. Оскільки RSS-потоки можуть мати різні структури особливості — з різною кількістю вкладених елементів та додатковими метаданими — можливість зберігати дані без жорсткої схеми спрощує збір даних. У таких базах кожен запис зберігається у вигляді JSON-подібного документа, де можна легко зберегти всі деталі окремої новини: заголовок, посилання, опис, дату публікації, категорії та автора. До того ж, документно-орієнтовані бази часто демонструють високу продуктивність при зчитуванні даних і легко масштабуються горизонтально, що важливо при роботі з великою кількістю потоків.

З іншого боку, реляційні бази даних, такі як PostgreSQL або MySQL, підходять для ситуацій, коли структура даних є чітко визначеною та стабільною що ускладнює процес інтеграції нових смуг, які будуть мати яку структурну особливість, на кшталт ігнорування тегів мови чи джерела, однак обробка спрощується, так як в кінцевому результаті ми зводимо всі дані до одного формату. Таким чином, вибір залежить від конкретних потреб: якщо додаток зберігає дані без ніякої обробки то документно-орієнтовані бази даних краще справляються з цією задачею. Однак, якщо перед застосунком стоїть задача перекладу, фільтрації, цензурування, тощо, то реляційні бази даних краще виконують цю роботу.

Одна з ключових проблем при роботі з RSS-стрічками — це повторення ідентичних або

дуже схожих новин, які надходять із різних джерел. Оскільки багато інформаційних сайтів публікують новини на схожі теми, часто трапляється ситуація, коли одна й та сама подія висвітлюється декількома ресурсами майже одночасно. Це призводить до дублювання контенту в базі даних і ускладнює аналіз інформації, адже користувачам доводиться переглядати безліч повторів, щоб знайти унікальні деталі. Проблема загострюється, якщо RSS-потіки налаштовані для автоматичного збору новин, адже система не завжди здатна визначити, чи є новина справді новою, чи лише варіацією вже наявної.

Для розв'язання цієї проблеми часто застосовують алгоритми дедуплікації — методи порівняння заголовків, описів та основного тексту новини. Також можна використовувати аналіз схожості на основі ключових слів або семантичне порівняння змісту, що допомагає виділяти унікальний контент і фільтрувати дублікати. Однак навіть ці підходи не гарантують стовідсоткової точності, особливо коли різні джерела описують ту саму подію різними словами. Тому проблема повторів залишається актуальною задачею для розробників систем агрегування новин.

Також окремо слід зазначити, що для уникнення такої проблеми можна використати внутрішні механізми реляційних баз даних. Так, якщо заголовок, зміст, та посилання на новину співпадають, то можна однозначно визначити що це дублікат. MySQL має ідеальний механізм для вирішення цієї проблеми, а саме властивість унікальності полів. Якщо правильно описати це правило, то дублікатів можна уникнути.

Натомість, документно-орієнтовані бази даних мають багато переваг для зберігання даних із RSS-стрічок, вони не здатні автоматично розв'язувати проблему дублювання ідентичних новин. Оскільки кожна новина зберігається як окремий документ, база даних не виконує перевірку на унікальність вмісту за замовчуванням. Навіть якщо використовувати індекси для пошуку схожих заголовків або посилань, це не гарантує виявлення дублікату, якщо новини дещо відрізняються формулюванням чи структурою. Документно-орієнтовані бази даних добре підходять для швидкого доступу до даних, але вони не пропонують вбудованих механізмів для аналізу текстової подібності чи семантичного порівняння. Тому для боротьби з повтореннями потрібно додатково реалізувати логіку дедуплікації на рівні застосунку або

використовувати зовнішні інструменти, які порівнюють новини за допомогою алгоритмів обробки природної мови чи пошуку схожості. Таким чином, вибір документно-орієнтованої бази даних не усуває проблему дублювання, а лише відкладає її розв'язання на етап обробки даних.

Якщо додаток здійснює збір даних із зовнішніх сайтів, він має працювати автономно та незалежно від дій користувачів. Такий підхід забезпечує стабільність роботи сервісу та знижує навантаження на джерела даних. Це дозволяє користувачам миттєво отримувати потрібні дані без очікування завантаження та мінімізує кількість зовнішніх запитів.

Інтернаціональність є одним із ключових викликів при роботі з RSS-стрічками. Оскільки різні джерела публікують контент різними мовами та в різних часових поясах, їх уніфікація стає складним завданням. Додаткову складність створює різниця в часових поясах, яка впливає на коректне відображення часу публікації новин. Хоча стандарт RSS передбачає вказівку часової зони у форматі ISO 8601, не всі джерела дотримуються цієї вимоги.

На основі проведеного аналізу маємо - обробку RSS-даних, яка є складним процесом та який доцільно виокремити в окремий програмний модуль. Такий модуль має забезпечувати збір, збереження, обробку та сортування інформації, гарантуючи стабільну та ефективну роботу системи.

Розглянемо детально основні складові цього модуля та їхні функції.

1. База даних як центральний елемент модуля. Центральним елементом модуля є база даних, яка виконує роль сховища для зібраної інформації. Вибір між документно-орієнтованою та реляційною базами даних залежить від потреб проекту. Документно-орієнтовані бази даних, як-от MongoDB чи Firebase Firestore, забезпечують гнучке збереження даних, що важливо для RSS-стрічок із різною структурою. Водночас реляційні бази даних, такі як PostgreSQL або MySQL, зручні для організації зв'язків між даними, а також для пошуку дублікатів та виконання складних запитів. Ідеальним підходом є поєднання обох типів баз даних або використання гібридних рішень. Наприклад, документно-орієнтована база даних може зберігати сирі дані RSS-стрічок, тоді як реляційна - оброблені та структуровані дані для подальшого аналізу. Збереження даних у власній базі дозволяє уникнути повторних запитів до зовнішніх

сайтів, що не тільки прискорює роботу системи, а й запобігає перевантаженню джерел інформації.

2. Парсинг даних (підсистема збору інформації). Перша підсистема модуля відповідає за збір та парсинг даних. Її основне завдання - завантажувати RSS-стрічки з різних джерел і витягувати ключову інформацію, як-от заголовок, опис, дату публікації, посилання на оригінальну статтю та назву джерела. Ця підсистема повинна працювати автономно та періодично, не залежачи від дій користувачів. Для цього можна використовувати планувальники завдань на кшталт cron або вбудовані механізми, такі як Celery у Python. Парсинг має враховувати специфіку кожного джерела, оскільки структура RSS-файлів може відрізнятися. Для обробки стандартних форматів, як-от RSS 2.0 чи Atom, можна використовувати бібліотеки, наприклад, feedparser для Python. Якщо джерело не дотримується стандартів, необхідно налаштувати індивідуальний підхід для парсингу. Після вилучення даних інформація зберігається в базі даних разом із метаданими, такими як час завантаження та унікальний ідентифікатор джерела.

3. Обробка даних (підсистема аналізу та уніфікації). Друга підсистема модуля займається обробкою отриманих даних. Її завдання — привести інформацію до єдиного формату, видалити дублікати, визначити мову та часовий пояс, а також класифікувати новини за категоріями. Для пошуку однакових новин можна порівнювати заголовки та описи. Якщо тексти відрізняються, можна застосувати алгоритми обчислення схожості, наприклад, Levenshtein distance або TF-IDF для аналізу ключових слів. Це допоможе виявити дублікати, навіть якщо формулювання відрізняються. Оскільки RSS-джерела можуть бути різними мовами, необхідно автоматично визначити мову кожної новини. Для цього можна використати бібліотеки, такі як langdetect або langid, які аналізують текст і визначають мову з високою точністю. Якщо мову вказано в метаданих RSS-стрічки, її можна використовувати без додаткового аналізу. Час публікації має бути наведений до єдиного стандарту - зазвичай це UTC. Якщо джерело не вказує часовий пояс, його можна визначити на основі домену сайту або метаданих. У випадку відсутності чіткої інформації використовується часова зона за замовчуванням із можливістю ручного налаштування для конкретних джерел. Для

групування новин за темами можна використовувати ключові слова або алгоритми машинного навчання. Наприклад, моделі на основі TF-IDF або Naive Bayes дозволяють автоматично відносити статті до певних категорій: політика, спорт, наука, технології тощо. Якщо потрібна складніша класифікація, можна застосувати нейронні мережі або моделі, такі як BERT, які розуміють контекст тексту. Після обробки результати зберігаються в базі даних у структурованому вигляді, готовому до подальшого використання.

4. Сортування даних (підсистема впорядкування та пошуку). Окремим компонентом модуля є підсистема сортування, яка впорядковує дані відповідно до потреб користувачів. Сортування може здійснюватися за різними критеріями, зокрема:

- за часом публікації - найсвіжіші новини відображаються першими, що є стандартним підходом для агрегаторів;

- за релевантністю - якщо користувач виконує пошук за ключовими словами, результати можна відсортувати за ступенем відповідності пошуковому запиту. Для цього застосовуються алгоритми пошуку за схожістю, наприклад, BM25;

- за популярністю джерела - деякі користувачі можуть надавати перевагу новинам із перевірених або авторитетних сайтів, тому система повинна дозволяти пріоритетувати такі джерела;

- за пріоритетністю тем - якщо користувач підписаний на кілька категорій, можна надавати перевагу новинам із найбільш релевантних для нього тем;

- сортування може комбінувати кілька факторів одночасно, оскільки можна спочатку показувати найсвіжіші новини, але серед них вищі позиції займатимуть статті з авторитетних джерел або ті, що відповідають інтересам користувача;

- для підвищення продуктивності слід реалізувати індексацію даних у базі, використовуючи індекси для часто використовуваних полів, таких як час публікації, мова та категорія, що дозволить швидко виконувати запити навіть за великої кількості даних.

5. Взаємодія з іншими компонентами системи:

- оскільки модуль обробки RSS-даних працює автономно, він повинен взаємодіяти з іншими компонентами системи через

інтерфейси API: інтерфейс для отримання оброблених даних у вигляді JSON або XML, який використовується клієнтським додатком для відображення новин;

– API для пошуку та фільтрації даних за ключовими словами, мовою чи категорією;

– адміністративний інтерфейс для налаштування параметрів збору даних, періодичності оновлення та керування списком джерел;

– автономність і стабільність роботи.

Модуль повинен працювати незалежно від дій користувачів. Збір даних виконується за розкладом або в режимі безперервного моніторингу, залежно від потреб проекту. Для підвищення надійності варто реалізувати механізми обробки помилок: наприклад, якщо джерело тимчасово недоступне, система має повторити спробу через певний інтервал часу. Також слід передбачити обмеження на кількість запитів до одного джерела, щоб уникнути блокування або перевантаження сайту.

Технологія RSS залишається ефективним інструментом для автоматизованого отримання оновлень із різних джерел завдяки своїй стандартизованій структурі на основі XML. Її ключова перевага - це економія часу та централізований доступ до інформації без необхідності відвідувати кожен сайт окремо. Проте для побудови ефективної системи збору та обробки RSS-даних необхідно враховувати низку технічних та організаційних аспектів:

– по-перше, оскільки формат RSS має чітку ієрархічну структуру з елементами `<rss>`, `<channel>` та `<item>`, важливо правильно інтерпретувати ці теги під час парсингу, однак на практиці не всі RSS-канали дотримуються стандарту: деякі теги можуть бути порожніми або відсутніми, що ускладнює обробку даних і вимагає гнучкості від системи;

– по-друге, автономний збір даних є не лише технічно доцільним, а й етично необхідним; якщо кожен користувач робитиме запити до джерел у реальному часі, це створить надмірне навантаження на сервери сайтів, подібне до DDoS-атак, тому рекомендовано періодично завантажувати та зберігати RSS-дані у власній базі даних, що не лише прискорює доступ користувачів до інформації, а й мінімізує зовнішні запити;

– по-третє, вибір типу бази даних залежить від характеру роботи системи; документно-орієнтовані бази даних, такі як MongoDB, добре підходять для зберігання різноманітних

структур RSS-даних без необхідності жорсткої схеми; реляційні бази даних, як-от MySQL або PostgreSQL - ефективні для обробки даних, пошуку дублікатів та виконання складних запитів.

Окремою проблемою залишається повторення ідентичних або схожих новин з різних джерел, оскільки більшість сайтів висвітлює однакові події, у базі даних накопичується дубльований контент, що ускладнює аналіз інформації. Для виявлення дублікатів потрібно порівнювати заголовки та описи новин або застосовувати алгоритми на основі ключових слів, такі як Levenshtein distance та TF-IDF. У реляційних БД проблема дублювання вирішується завдяки унікальності полів, наприклад, збігу заголовка, змісту та посилання.

Ще один виклик - це інтернаціональність даних. Оскільки RSS-стрічки можуть надходити різними мовами та в різних часових поясах, необхідно забезпечити їхню уніфікацію. Для автоматичного визначення мови можна використовувати бібліотеки на кшталт langdetect чи langid, тоді як час публікації слід зводити до стандарту UTC. Якщо часовий пояс не вказаний явно, його можна визначати на основі домену сайту або конфігурації для кожного джерела.

Висновок. Загалом обробка RSS-даних потребує створення окремого модуля з чітким розподілом функцій: автономний збір даних за розкладом, парсинг із урахуванням нестандартних структур, видалення дублікатів, визначення мови та часового поясу, а також сортування за часом публікації, релевантністю та іншими критеріями. Правильна організація цього процесу дозволяє не лише знизити навантаження на зовнішні джерела, а й забезпечити користувачам швидкий доступ до актуальної та унікальної інформації.

Структуровані рішення на основі RSS можна легко масштабувати: додавання нових джерел новин або фільтраційних модулів не вимагає повної переробки системи. Завдяки чіткій структурі, RSS-застосунки можуть реалізовувати фільтрацію шкідливих даних, перевірку підписів і сертифікатів, що актуально при роботі з великими інформаційними потоками. Таким чином, технологія RSS задає чіткі вимоги до структури програмних рішень, стимулює використання модульного підходу, спрощує масштабування і забезпечує стабільну передачу інформації. Вона залишається актуальною в епоху цифрових технологій,

особливо у сфері медіа, освіти та ІТ. Перспективним напрямком дослідження може стати використання ІІІ для аналізу, класифікації та персоналізації RSS-контенту. Завдяки машинному навчанню, системи можуть адаптуватися до інтересів користувача, фільтрувати неактуальну або недостовірну інформацію. Технологія RSS ще має багато можливостей для розвитку — особливо в контексті автоматизації, персоналізації та цифрової безпеки.

Література

1. Офіційний веб-сайт посібник *rssboard* [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – URL: <https://www.rssboard.org/rss-specification>.
2. Alen Šimec, Mia Čarapina, Sanja Duk RSS as medium for information and communication technology Хорватія 2011.
3. Статистика використання RSS [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – URL: <https://trends.builtwith.com/feeds/RSS>.
4. Ramkrishna Patel; Vikas Choudhary; Deepika Saxena; Ashutosh Kumar Singh Review of Stock Prediction Using Machine Learning Techniques 2021 Tirunelveli, India
5. «Is RSS still relevant» веб-стаття [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – URL: <https://modulars.com/en/still-being-the-rss-relevant-in-2024-an-glimpse-at-its-possibilities/>.
6. Robert Stelzle & Elias Koch «Using RSS to keep track of the latest Journal Articles» Elephant in the room 19 July 2023.
7. Jim Doree RSS: A Brief Introduction Journal of Manual & Manipulative Therapy 2007.
8. Atul Sajjanhar, Ying Zhao Web Service to Deliver Filtered RSS Items to a Mobile Application ChinaGrid Annual Conference (ChinaGrid), 2012 Seventh.
9. Somnath Paulchoudhury Reading RSS Feed in Google Sheets Web Broadcast July 2020.
10. Basavaraj Kumbar, Mulla K. R A survey study on awareness about rss feeds and social book markings of working library professionals in engineering colleges in karnataka: a study International Journal of Library Science and Research December 2021.
11. RSS Feeds in 2024: Are You Missing Out on This Quiet Powerhouse for Your Website? - Ross Gerring [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – URL: <https://www.itomic.com.au/rss-feeds-in-2024-are-you-missing-out-on-this-quiet-powerhouse-for-your-website/>.
12. The Enduring Value of RSS Feeds: Connecting Content and Community - 99 Park Row, доступ отримано січня 21, 2025. URL: <https://www.99parkrow.com/2024/09/the-enduring-value-of-rss-feeds-connecting-content-and-community/>.

References

1. Ofitsiinyi veb-sait posibnyk rssboard [Elektronnyi resurs]: [Veb-sait]. – URL: <https://www.rssboard.org/rss-specification>.
2. Alen Šimec, Mia Čarapina, Sanja Duk RSS as medium for information and communication technology Khorvatiia 2011.
3. Statystyka vykorystannia RSS [Elektronnyi resurs]: [Veb-sait]. – URL: <https://trends.builtwith.com/feeds/RSS>.
4. Ramkrishna Patel; Vikas Choudhary; Deepika Saxena; Ashutosh Kumar Singh Review of Stock Prediction Using Machine Learning Techniques 2021 Tirunelveli, India
5. «Is RSS still relevant» veb-stattia [Elektronnyi resurs]: [Veb-sait]. – URL: <https://modulars.com/en/still-being-the-rss-relevant-in-2024-an-glimpse-at-its-possibilities/>.
6. Robert Stelzle & Elias Koch «Using RSS to keep track of the latest Journal Articles» Elephant in the room 19 July 2023.
7. Jim Doree RSS: A Brief Introduction Journal of Manual & Manipulative Therapy 2007.
8. Atul Sajjanhar, Ying Zhao Web Service to Deliver Filtered RSS Items to a Mobile Application ChinaGrid Annual Conference (ChinaGrid), 2012 Seventh.
9. Somnath Paulchoudhury Reading RSS Feed in Google Sheets Web Broadcast July 2020.
10. Basavaraj Kumbar, Mulla K. R A survey study on awareness about rss feeds and social book markings of working library professionals in engineering colleges in karnataka: a study International Journal of Library Science and Research December 2021.
11. RSS Feeds in 2024: Are You Missing Out on This Quiet Powerhouse for Your Website? - Ross Gerring [Elektronnyi resurs]: [Veb-sait]. – URL: <https://www.itomic.com.au/rss-feeds-in-2024-are-you-missing-out-on-this-quiet-powerhouse-for-your-website/>.
12. The Enduring Value of RSS Feeds: Connecting Content and Community - 99 Park Row, dostup otrymano sichnia 21, 2025. URL: <https://www.99parkrow.com/2024/09/the-enduring-value-of-rss-feeds-connecting-content-and-community/>.

Lagovskyi V. V., Lahovskyi O. V., Nizhehorodtsev V.O., Filonenko M. M., Skaskiv L.V. Structural features of software solutions with RSS technology

The article analyzes structural features and architectural approaches for developing software solutions integrating RSS (Really Simple Syndication) technology.

The relevance of RSS for automated collection, processing, and distribution of information from web resources is emphasized. The technology's value lies in its standardized XML format, simplifying aggregation and enabling effective management of information flows.

Key advantages of RSS are reviewed: optimized data retrieval, user control over content without algorithms, anonymity, a unified ad-free format, reliability, and offline access. Drawbacks analyzed include variable content completeness, lack of interactivity, the need for specialized aggregators, risk of information overload, and limited multimedia support.

Technical aspects of building RSS systems are discussed. The critical importance of autonomous data collection and storage in the aggregator's own database is substantiated. This prevents load on sources, increases access speed, and enables the implementation of search, filtering, and analysis. The feasibility of using document-oriented DBs (flexibility) versus relational DBs (structuredness, integrity, duplicate elimination) is compared.

Attention is paid to the problem of news duplication; deduplication methods based on title/description comparison and textual/semantic similarity analysis are considered. Internationalization challenges are highlighted: the need for language auto-detection and unification of publication time to UTC.

An architectural approach with a separate software module for RSS processing is proposed. The module includes subsystems for collection/parsing, processing (deduplication, unification, language/time detection, classification), DB data storage, and sorting/searching (with indexing). The need for autonomous module

operation, error handling, and interaction via API is stressed.

The conclusion states that RSS remains an effective tool but requires well-thought-out structural solutions. Proper architecture ensures efficient aggregation, reduces source load, provides scalability, and allows feature integration. Using AI and Machine Learning for deeper analysis and personalization of RSS content is a promising direction.

Keywords: RSS, software module, database, software structure, xml, parsing, deduplication.

Лаговський Володимир Вікторович – к.е.н., доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету (Ірпінь), vlagovsky2@gmail.com.

Лаговський Олександр Володимирович – магістр Факультету фінансів та цифрових технологій, освітньо-професійної програми «Інформаційні управляючі системи і технології в економіці» Державного податкового університету (Ірпінь), oles_l@i.ua.

Ніжегородцев Владислав Олександрович – к.пед.н., доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету (Ірпінь), nizhegorodcev@ukr.net.

Філоненко Михайло Миколайович – к.фіз.-мат. н., завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету (Ірпінь), filonenko.mykhaylo@gmail.com.

Скасків Лілія Василівна – к.фіз.-мат.н., доцент кафедри вищої та прикладної математики Державного податкового університету (Ірпінь), liliaskaskiv@gmail.com.

Стаття подана 09.03.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-14-23>

УДК 004.738.5

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРСОНАЛЬНОГО ВЕБСАЙТУ В ПОРІВНЯННІ З ТРАДИЦІЙНИМИ МЕТОДАМИ ПОШУКУ РОБОТИ

Помінчук Я.В., Грищенко С.М.

THE EFFECTIVENESS OF A PERSONAL WEBSITE COMPARED TO TRADITIONAL JOB SEARCH METHODS

Pominchuk Y.V., Hryshchenko S.M.

У статті проведено комплексне дослідження ефективності персонального вебсайту як сучасного інструменту пошуку роботи та самопрезентації у порівнянні з традиційними методами в умовах активної цифровізації ринку праці України. Розглянуто еволюцію процесу рекрутингу, де роботодавці все частіше аналізують цифровий слід кандидатів, що підвищує значущість контрольованих онлайн-ресурсів. Детально проаналізовано ефективність, переваги та недоліки традиційних каналів: резюме на спеціалізованих порталах, використання професійних соціальних мереж, особистих рекомендацій, нетворкінгу та співпраці з рекрутинговими агентствами, спираючись на актуальні статистичні дані та дослідження.

Метою дослідження, представленого в статті, є комплексний аналіз та порівняння ефективності персонального вебсайту як інструменту пошуку роботи з традиційними методами, а також надання обґрунтованих практичних рекомендацій щодо його створення, впровадження та оцінки результативності для підвищення конкурентоспроможності кандидатів. Систематизовано роль персонального вебсайту як багатofункціонального інструменту для розширеної самопрезентації, формування особистого бренду, демонстрації портфоліо та унікальних професійних компетенцій. Визначено ключові переваги сайту (гнучкість формату, контроль над контентом, можливість демонстрації практичних навичок) та основні виклики (витрати часу та ресурсів, необхідність оновлення, залежність від SEO, складність оцінки ефективності). Розглянуто галузеву специфіку застосування сайту, виявлено його особливу результативність для представників креативних індустрій, IT-спеціалістів, маркетологів та фрілансерів. Як кейс-стаді проаналізовано досвід

пошуку роботи IT-спеціалістами у 2023 році, що демонструє здатність персонального сайту підвищувати видимість кандидатів та долати ринкові бар'єри. Стаття також містить детальний опис ключових етапів практичної реалізації ефективного персонального вебсайту: від стратегічного вибору технологій, розробки структури та дизайну, створення ціннісного контенту та SEO-оптимізації до тестування, запуску та методів оцінки його ефективності за допомогою вебаналітики та зворотного зв'язку. Обґрунтовано, що системний підхід до створення, управління та аналізу персонального вебсайту дозволяє суттєво підвищити конкурентоспроможність фахівця на сучасному ринку праці.

Ключові слова: персональний вебсайт, пошук роботи, ефективність, самопрезентація, традиційні методи, IT-спеціалісти, веброзробка.

Вступ. У сучасних умовах динамічного розвитку ринку праці здобуття бажаної посади потребує від кандидатів не лише високого рівня кваліфікації, а й ефективного самопросування. Традиційні методи працевлаштування, такі як використання професійних платформ для пошуку роботи, рекомендаційні листи та особисті зв'язки, залишаються актуальними, проте їхня ефективність значною мірою залежить від наявності конкурентних переваг кандидата. В умовах зростаючої конкуренції на ринку праці одним із ефективних інструментів самопрезентації є персональний вебсайт.

Завдяки цифровізації та глобальному доступу до Інтернету процес пошуку роботи зазнав суттєвих змін: роботодавці дедалі частіше

аналізують не лише подані резюме, а й цифровий слід кандидатів. Дослідження свідчать, що значна частина роботодавців використовує соціальний рекрутинг для пошуку потенційних працівників і перевіряє кандидатів у соціальних мережах, що може суттєво вплинути на рішення про найм.

У цьому контексті персональний вебсайт стає важливим інструментом самопрезентації, що дозволяє систематизовано представити інформацію про професійний досвід, кваліфікації та досягнення. Він не лише підкреслює індивідуальні компетенції та унікальність кандидата, але й допомагає сформуванню позитивного професійного іміджу. Дослідження підтверджують значущість цього інструменту, вказуючи, що роботодавці вважають наявність персонального вебсайту важливим фактором під час оцінки кандидатів, особливо у галузях, де важлива візуальна демонстрація навичок (дизайн, маркетинг, IT, креативні індустрії). Персональний вебсайт дозволяє відвідувачам швидко сформуванню уявлення про кандидата, його професійну діяльність та пропозицію цінності, і його активно використовують фрилансери, професіонали у сфері освіти та творчості, малий бізнес, блогери та публічні особи.

Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю систематизації знань щодо ефективності різних методів пошуку роботи в умовах цифрової трансформації ринку праці та визначення оптимальних стратегій використання персонального вебсайту для підвищення конкурентоспроможності кандидатів, а також надання практичних рекомендацій щодо його створення та оцінки.

Питання ефективності інструментів пошуку роботи та самопрезентації кандидатів в умовах цифровізації є предметом численних досліджень та публікацій. Аналізуються тенденції онлайн-рекрутингу, практика використання соціальних мереж роботодавцями для оцінки кандидатів, а також ефективність різних каналів залучення талантів, що відображено у звітах міжнародних компаній та аналітиці українських кар'єрних порталів і галузевих ресурсів. Окремий напрям досліджень присвячений важливості особистого брендингу та самомаркетингу для підвищення конкурентоспроможності фахівців на ринку праці, що знаходить підтвердження у відповідних академічних працях. Також існує значний масив технічної літератури щодо практичних аспектів веброзробки. Однак,

комплексне дослідження, яке б системно поєднувало порівняльний аналіз ефективності персонального вебсайту і традиційних методів пошуку роботи з детальним описом практичних кроків його створення та оцінки саме в українському контексті, потребує подальшого висвітлення, що й зумовлює актуальність даної роботи.

Мета дослідження полягає у комплексному аналізі та порівнянні ефективності персонального вебсайту як інструменту пошуку роботи з традиційними методами в умовах сучасного цифрового ринку праці, а також у наданні обґрунтованих практичних рекомендацій щодо його створення, впровадження та оцінки результативності для підвищення конкурентоспроможності кандидатів.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети було проаналізовано сучасні тенденції ринку праці та ефективність традиційних методів пошуку роботи (резюме на порталах, соціальні мережі, нетворкінг, рекрутингові агентства), визначені роль, функції, переваги, недоліки та галузеву специфіку використання персонального вебсайту для самопрезентації та кар'єрного розвитку, досліджено досвід використання різних каналів пошуку роботи IT-спеціалістами та оцінено потенціал персонального сайту для подолання ринкових викликів на їхньому прикладі, було систематизовано та детально описано ключові етапи практичної реалізації персонального вебсайту: вибір технологій, розробку структури та дизайну, створення контенту, SEO-оптимізацію, тестування та запуск, обґрунтовано методику оцінки ефективності персонального вебсайту за допомогою вебаналітики та якісного зворотного зв'язку.

Розміщення резюме на спеціалізованих порталах з пошуку роботи залишається одним із найпопулярніших методів серед українців. Згідно з онлайн-опитуванням Factum Group Ukraine та OLX Робота, проведеним у 2020 році, 88% респондентів використовують спеціалізовані сайти для пошуку вакансій [5]. Важливо відзначити, що ефективність розміщення резюме значною мірою залежить від якості його оформлення та структури. Дослідження кар'єрного порталу The Ladders у 2021 році показало, що рекрутери витрачають у середньому лише 7,4 секунди на перегляд одного резюме. Враховуючи таку короткотривалу увагу рекрутерів, експерти

рекомендують розмішувати ключову інформацію у найбільш помітних місцях — на початку та в кінці документа. Саме ці секції отримують найбільше уваги, тому доцільно виділити в них найважливіші факти про професійний досвід і навички, щоб максимізувати шанси на проходження до наступного етапу відбору [6].

Професійні соціальні мережі, такі як LinkedIn, стали важливим інструментом пошуку роботи. За даними дослідження EvoTalents (2022), 96,5% рекрутерів використовують цю платформу для пошуку кандидатів [7]. Соціальні мережі виконують подвійну функцію: з одного боку, вони слугують платформою для професійної самопрезентації, а з іншого – інструментом перевірки кандидатів. Згідно з опитуванням Harris Poll, понад 55% рекрутерів знаходили причини відмовити кандидатам через інформацію у їх соцмережах [8]. Професійні соціальні мережі дозволяють продемонструвати не лише досвід роботи, але й залученість до професійної спільноти, розвинену мережу контактів та рекомендації від колег. Так за дослідженням CareerBuilder, 34% рекрутерів мали досвід, коли вони приймали рішення на користь фахівців, які мали креативний підхід до власних соціальних мереж [9]. Цей факт доводить, що грамотно сформований професійний онлайн-профіль може стати вирішальним чинником у прийнятті позитивного рішення про працевлаштування.

Особисті рекомендації та нетворкінг залишаються одним із найефективніших методів пошуку роботи на сучасному ринку праці. Цей метод базується на використанні професійних зв'язків та соціального капіталу для отримання доступу до вакансій, часто ще до їхньої публічної появи. За даними опитування DOU, 26,5% фахівців IT-сфери знаходять роботу завдяки рекомендаціям знайомих, що робить цей метод найпопулярнішим серед пошукачів. Реферальні програми вигідні як для компаній, так і для співробітників. Роботодавці використовують їх для закриття складних вакансій, покращення атмосфери в колективі та зміцнення бренду. Працівники, в свою чергу, отримують не лише можливість працевлаштувати знайомих, а й фінансову винагороду чи інші бонуси, сприяючи формуванню сильної команди з односторонців [10].

Співпраця з професійними рекрутинговими агентствами залишається важливим методом пошуку роботи, особливо для висококваліфікованих спеціалістів та керівних

посад. Основними перевагами цього методу є доступ до прихованого ринку вакансій, який не публікується у відкритих джерелах, та професійний супровід на всіх етапах пошуку роботи. Рекрутингові агентства часто мають налагоджені зв'язки з роботодавцями та доступ до вакансій, які не оприлюднюються на загальнодоступних порталах з пошуку роботи. Однак, цей метод має певні обмеження. По-перше, він найбільш ефективний для досвідчених фахівців з унікальною експертизою. По-друге, процес пошуку роботи через агентства може тривати довше, ніж через інші канали. Розгорнутий процес пошуку кандидатів, проведення співбесід та узгодження умов працевлаштування через посередника вимагає додаткового часу. Варто зазначити, що ефективність співпраці з рекрутинговими агентствами також залежить від рівня спеціалізації агентства та його репутації на ринку. Спеціалізовані рекрутингові агентства, які фокусуються на конкретних галузях або професійних сферах, часто демонструють вищу ефективність у закритті вакансій у порівнянні з універсальними агентствами завдяки глибшому розумінню потреб ринку та вимог роботодавців.

Персональний вебсайт є багатофункціональним інструментом професійної самопрезентації, що дозволяє кандидатам розкрити свій потенціал у розширеному форматі. На відміну від традиційного резюме, вебсайт не обмежений обсягом та форматом, що дозволяє представити додаткову інформацію про професійний досвід та навички.

Персональний вебсайт забезпечує розширену самопрезентацію, представляючи не лише базову інформацію про освіту та досвід роботи, але й демонструючи особистісні якості, цінності та професійні інтереси. Важливою перевагою вебсайту є можливість представити портфоліо робіт у зручному форматі з детальним описом кожного проекту, що особливо важливо для креативних професій.

Вебсайт дозволяє сформувати цілісний професійний образ, що відображає унікальні конкурентні переваги фахівця на ринку праці. У своєму комплексному дослідженні С. Домінік-Феррейра, Руї Брага та Марія до Сеу Дуарте демонструють, що розвиток персонального бренду значно підвищує конкурентоспроможність кандидатів на ринку праці. За допомогою комбінованих кількісних та якісних методологій науковці встановили, що ефективний самомаркетинг позитивно впливає

на сприйняття кандидатів потенційними роботодавцями, які розглядають їх як цінний людський капітал для своїх організацій [11].

Незважаючи на значні переваги, персональний вебсайт має певні обмеження як інструмент пошуку роботи. Створення та підтримка якісного вебсайту вимагає значних зусиль, часу та часто фінансових ресурсів. Для підтримки актуальної інформації вебсайт потрібно регулярно оновлювати, що вимагає додаткових часових ресурсів. Без спеціальних інструментів аналітики складно оцінити ефективність вебсайту та відслідковувати конверсію відвідувань у пропозиції про роботу. Крім того, без належної SEO-оптимізації персональний вебсайт може мати низьку видимість у пошукових системах та не досягати цільової аудиторії.

Ефективність персонального вебсайту як інструменту пошуку роботи значно варіюється залежно від галузі та професії. Серед професійних категорій, де цей інструмент демонструє найвищу результативність, відзначаються:

- Фахівці креативних індустрій, зокрема дизайнери, фотографи та архітектори, розглядають персональний вебсайт як невід'ємний елемент професійної ідентичності та основний канал представлення портфоліо робіт.
- Спеціалісти у сфері інформаційних технологій використовують персональні вебсайти не лише для демонстрації завершених проєктів, але й як практичне підтвердження власної технічної компетентності та навичок розробки.
- Професіонали у сфері маркетингу та комунікацій застосовують персональні вебсайти для демонстрації навичок створення контенту, стратегічного мислення та формування брендів, що є ключовими компетенціями для їхніх професійних ролей.
- Незалежні консультанти та фрілансери розглядають персональний вебсайт як центральний елемент бізнес-стратегії, що забезпечує залучення потенційних клієнтів та утвердження професійної експертизи на ринку.

Варто зазначити, що для фахівців у традиційних галузях економіки або кандидатів на посади початкового рівня персональний вебсайт може демонструвати нижчу ефективність порівняно з усталеними методами пошуку роботи та професійної самопрезентації.

Досвід пошуку роботи IT-спеціалістами у 2023 році [12] демонструє потенціал сайту в конкурентному середовищі. Згідно з опитуванням, основними каналами працевлаштування IT-фахівців у 2023 році є Djinni.co (32% серед тих, хто знайшов роботу), рекомендації (20%), LinkedIn (11%) та прямі контакти від компаній (16%). В умовах, коли 66% респондентів відчують труднощі з пошуком роботи, персональний вебсайт може стати ключовим інструментом для підвищення ефективності саме цих каналів. Наприклад, маючи професійний вебсайт з портфоліо проєктів, IT-спеціаліст може значно виділитися на Djinni.co чи LinkedIn, де стандартні профілі можуть бути менш інформативними. Посилання на вебсайт у розділі контактів або в описі досвіду дає рекрутерам та потенційним роботодавцям можливість отримати більш глибоке уявлення про навички та досягнення кандидата. При використанні рекомендацій, наявність власного вебсайту полегшує знайомим можливість якісно презентувати кандидата. Навіть при прямому зверненні до компаній, добре оформлений сайт підвищує шанси на позитивну відповідь [12].

Опитування виявило ряд якісних труднощів, з якими стикаються IT-спеціалісти: мала кількість вакансій та висока конкуренція (45%), відсутність зворотного зв'язку від компаній (41%), тривалий процес співбесід (37%) та високі вимоги до кандидатів (31%) [12]. Персональний вебсайт може стати ефективним засобом для подолання цих перешкод. Якісно розроблений сайт з унікальним контентом та портфоліо може привернути увагу роботодавців. Він може створити сильне перше враження та продемонструвати серйозність намірів кандидата, зменшуючи проблему відсутності зворотного зв'язку. Відповідність високим вимогам може бути підтверджена детальним портфоліо проєктів. Ведення блогу на власному сайті може продемонструвати експертність та зацікавленість кандидата [12].

Згідно з опитуванням, активність рекрутерів на LinkedIn у 2023 році значно знизилася (з 80% до 51%). У такій ситуації IT-фахівцям необхідно шукати альтернативні способи привернути увагу потенційних роботодавців [12]. Персональний вебсайт стає цінною інвестицією, яка може принести довгострокові результати. Він працює як цілодобова візитна картка та портфоліо. Регулярне оновлення сайту демонструє професійний розвиток. Розміщення посилань на

вебсайт на інших платформах та активна участь у професійних спільнотах можуть підвищити його видимість. Враховуючи, що 91% IT-фахівців активно моніторять ринок праці, наявність власного вебсайту також сприяє формуванню особистого бренду та підвищенню впізнаваності [12].

Створення ефективного персонального вебсайту – це процес, що вимагає не лише технічних навичок, але й стратегічного бачення. Він діє як цифрова візитівка та портфоліо, доступне 24/7 потенційним роботодавцям. Цей розділ детально розглядає ключові етапи розробки, від вибору технологічного стеку до запуску та первинного просування готового ресурсу.

Правильний вибір технологій визначає гнучкість, вартість та складність підтримки сайту в майбутньому.

1. Аналіз платформ та CMS (Систем управління контентом).

- Конструктори сайтів (Wix, Tilda, Squarespace): Це платформи, що пропонують візуальний редактор (часто drag-and-drop), готові шаблони та вбудований хостинг. Ідеально підходять для новачків без досвіду програмування, представників креативних професій (дизайнери, фотографи), яким важливий швидкий запуск та візуальна привабливість. Wix пропонує велику гнучкість у дизайні, Tilda чудово підходить для лендінгів та сайтів з блоковою структурою, Squarespace відомий своїми елегантними шаблонами. Переваги: Низький поріг входу, швидкість розробки, відсутність потреби в окремому хостингу (зазвичай), технічна підтримка від платформи. Недоліки: Обмеження у кастомізації поза можливостями шаблонів, потенційно гірші SEO-можливості порівняно з CMS, залежність від тарифного плану (безкоштовні плани часто мають рекламу платформи та обмежений функціонал), складність міграції на іншу платформу. Витрати: Існують безкоштовні плани з обмеженнями, платні тарифи зазвичай починаються від \$10-20 на місяць.

- CMS (WordPress.org): Це система управління контентом з відкритим кодом, яка є найпопулярнішою у світі (~43% всіх сайтів). Вона встановлюється на власний хостинг. Оптимальна для тих, хто прагне повного контролю над сайтом, планує вести блог, потребує специфічного функціоналу (завдяки плагінам) або кращих SEO-можливостей. Підходить для IT-спеціалістів, маркетологів, блогерів. Переваги: Максимальна гнучкість,

величезний вибір тем (дизайнів) та плагінів (функціоналу), відмінні SEO-можливості, повний контроль над кодом та даними, велика спільнота підтримки. Недоліки: Вищий поріг входу порівняно з конструкторами, необхідність самостійно обирати та оплачувати хостинг і домен, відповідальність за оновлення, безпеку та резервне копіювання. Витрати: Сама CMS безкоштовна, але потрібні витрати на хостинг (від \$3-5 на місяць) та домен (~\$10-15 на рік). Платні теми та плагіни можуть збільшити вартість.

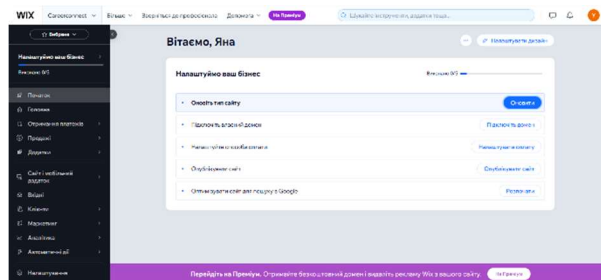


Рис. Інтерфейс адміністративної панелі конструктора сайтів Wix

- Інші варіанти: Існують й інші CMS (Joomla, Drupal – більш складні), а також статичні сайти-генератори (Jekyll, Hugo, Next.js для React) – популярні серед розробників за швидкістю, безпеку та використання Git для версіонування контенту, але вимагають глибоких технічних знань.

2. Вибір мов програмування та фреймворків.

- Основи (HTML, CSS, JavaScript): HTML (HyperText Markup Language) створює структуру (заголовки, параграфи, списки, зображення). CSS (Cascading Style Sheets) відповідає за візуальне оформлення (кольори, шрифти, відступи, розташування). JavaScript додає інтерактивність (анімації, валідація форм, динамічне завантаження контенту). Ці три технології є фундаментом вебу. Знання їх основ корисне навіть при роботі з конструкторами чи CMS для дрібних налаштувань.

- Front-end Фреймворки (React, Angular, Vue.js): Це інструменти на базі JavaScript, що дозволяють створювати складні, швидкі та інтерактивні користувацькі інтерфейси, часто у форматі односторінкових додатків (SPA). Використання їх для створення персонального сайту є чудовим способом для Front-end розробника продемонструвати свої навички потенційному роботодавцю. Однак для простого

сайту-портфоліо це може бути надмірним ускладненням.

- Back-end Мови (PHP, Python, Node.js, Ruby): Зазвичай не потрібні для простого персонального сайту. Вони використовуються, якщо потрібна серверна логіка, робота з базами даних, реєстрація користувачів тощо (наприклад, для складного блогу з коментарями чи інтерактивних вебдодатків). WordPress працює на PHP.

3. Вибір хостингу та доменного імені.

- Доменне ім'я: При виборі доменного імені доцільно керуватися легкістю читання, написання та запам'ятовування. Найкращі варіанти: ім'япрізвище.com (або .net, .me), ім'яфах.com (наприклад, ivanpetrenkodev.com). Бажано уникати дефісів (якщо можливо) та цифр. Перевірити доступність та зареєструвати домен можна у реєстраторів (наприклад, GoDaddy, Namecheap, українські Hostiq, Mirohost). Реєстрація зазвичай річна.

- Хостинг: Це "дім" для сайту. Shared (Віртуальний) хостинг: Найдоступніший варіант, де ресурси сервера діляться між багатьма сайтами. Підходить для більшості персональних сайтів. VPS (Віртуальний приватний сервер): Надає гарантовані ресурси та більше контролю, але потребує технічних знань для адміністрування. Cloud хостинг: Гнучкий варіант з оплатою за використані ресурси. Dedicated (Виділений) сервер: Оренда цілого сервера, надлишково для персонального сайту. При виборі хостингу слід звертати увагу на швидкість (SSD диски), надійність (uptime), розташування серверів (ближче до цільової аудиторії), наявність SSL-сертифікату (для HTTPS – безпечного з'єднання, що є обов'язковим сьогодні) та якість техпідтримки.

Продумана структура та естетичний дизайн не лише справляють гарне перше враження, але й допомагають користувачеві (рекрутеру) швидко знайти потрібну інформацію.

1. Створення макетів та прототипів (Wireframing & Prototyping).

- Wireframe: Це схематичне зображення сторінки, що показує розташування основних блоків (хедер, футер, контентна область, сайдбар), навігаційних елементів та ключових компонентів (кнопки, форми). Допомагає сфокусуватися на структурі та функціональності, не відволікаючись на візуальні деталі.

- Prototype: Більш деталізований макет, часто інтерактивний, що імітує реальну взаємодію з сайтом (наприклад, переходи між

сторінками при кліку на кнопки меню). Дозволяє протестувати користувацький досвід (User Experience - UX) на ранньому етапі.

- Інструменти: Figma (найпопулярніший, безкоштовний), Sketch (macOS), Adobe XD, Balsamiq (для швидких wireframes), або навіть папір та олівець.

- Ключові сторінки: Зазвичай персональний сайт включає: Головна (Home), Про мене (About), Портфоліо/Проекти (Portfolio/Projects), Резюме/CV (Resume), Контакти (Contact). Опційно – Блог (Blog), Послуги (Services).

2. Розробка дизайну (UI - User Interface).

- Персональний бренд: Дизайн має відображати індивідуальність та професійну сферу кандидата. Доцільно використовувати консистентну кольорову палітру (2-3 основних кольори), читабельні шрифти (один для заголовків, інший для основного тексту), якісний логотип (якщо є).

- Цільова аудиторія: Важливо враховувати, що сайт призначений в першу чергу для рекрутерів та роботодавців. Дизайн має бути професійним, чистим, не перевантаженим.

- Візуальна ієрархія: Важливі елементи (ім'я, спеціалізація, заклик до дії – СТА) мають привертати увагу в першу чергу. Для керування увагою використовуються розмір шрифту, колір, відступи.

- Адаптивність (Responsive Design): Обов'язковий елемент. Сайт має автоматично підлаштовуватися під розмір екрану будь-якого пристрою. Необхідно перевіряти відображення на різних роздільних здатностях.

- Доступність (Accessibility): Дотримання базових принципів WCAG (Web Content Accessibility Guidelines) робить сайт зручним для людей з обмеженими можливостями та покращує SEO. Це включає достатній контраст тексту та фону, використання alt-атрибутів для зображень, логічну структуру заголовків.

3. Оптимізація для пошукових систем (SEO).

- On-Page SEO: Оптимізація елементів на самому сайті. Ключові слова: Необхідно дослідити, за якими запитами можуть шукати кандидата (наприклад, за допомогою Google Keyword Planner або Ahrefs Free Keyword Generator) – "Java developer Kyiv", "UX designer portfolio", "копірайтер віддалено". Ключові слова інтегруються природно в заголовки сторінок (<title>), мета-описи (<meta name="description">), заголовки на сторінці (<h1>, <h2>), тексти та атрибути alt для

зображень. Контент: Важливо створювати унікальний, корисний та релевантний контент.

- Технічне SEO: Зрозуміла структура URL (наприклад, /portfolio/project-name), правильне використання заголовків H1-H6, створення XML-карти сайту (sitemap.xml) для пошукових роботів, наявність файлу robots.txt, швидкість завантаження, мобільна оптимізація, використання HTTPS.

- Off-Page SEO: Фактори поза сайтом, головним чином – якісні зворотні посилання (backlinks) з інших авторитетних ресурсів (наприклад, з LinkedIn, GitHub, гостьових статей). Для персонального сайту це менш критично, ніж для комерційного, але посилання з професійних профілів є важливими.

Якісний та релевантний контент – це те, заради чого відвідувачі приходять на сайт.

1. Створення якісного контенту.

- Сторінка "Про мене": Має представляти професійну історію, а не просто перелік фактів. Хто кандидат? Чим займається? Які його сильні сторони та цінності? Яких кар'єрних цілей прагне? Доцільно додати професійне фото.

- Резюме/CV: Можна представити як окрему сторінку з текстом, так і вбудувати інтерактивне резюме, або просто надати можливість завантажити актуальну версію у PDF-форматі. Важливо забезпечити синхронізацію з профілем на LinkedIn.

- Портфоліо: Найважливіший розділ. Відбір робіт: Слід обирати найкращі та найрелевантніші проекти (якість важливіша за кількість). Опис проектів: Для кожного проекту необхідно надати контекст: яка була задача (проблема), який внесок та роль кандидата, які технології/інструменти використовувалися, який результат було досягнуто (якщо можливо, з кількісними показниками). Доцільно додати візуальні матеріали (скріншоти, макети, фото, відео демо). Якщо проект під NDA, його слід описати узагальнено, фокусуючись на навичках. Структура: Проекти можна групувати за категоріями, якщо їх багато.

- Блог та статті (опціонально): Чудовий спосіб продемонструвати експертність, ділитися знаннями (туторіали, кейс-стаді, огляди інструментів, аналітичні статті), покращити SEO (залучення трафіку за інформаційними запитамі) та показати пристрасть до професії.

- Контактна інформація: Необхідно надати зручні способи зв'язку: email (бажано професійний, наприклад, contact@yourdomain.com), посилання на LinkedIn, GitHub (для розробників),

Behance/Dribbble (для дизайнерів). Можна додати просту контактну форму.

2. Використання мультимедійних матеріалів.

- Зображення: Рекомендується використовувати якісні, унікальні (не стокові, якщо можливо) зображення. Обов'язково є їх оптимізація для вебу (стиснення без втрати якості, правильний формат – JPG для фото, PNG для графіки з прозорістю, WebP для кращого стиснення). Слід використовувати описові імена файлів та alt-тексти.

- Відео: Можна вбудовувати відео з YouTube або Vimeo (краще для швидкості сайту) для демонстрації проектів, процесів або навіть короткої відео-презентації себе.

- Аудіо: Можливе використання аудіо-елементів (наприклад, уривки подкастів, аудіо-відгуки, музичні демо для відповідних професій), оптимізованих для веб.

- Інтерактивні елементи: Для розробників – вбудовані приклади коду (code snippets) або посилання на CodePen/JSFiddle. Для дизайнерів – інтерактивні прототипи (наприклад, з Figma).

3. Інтеграція з соціальними мережами. Доцільно розмістити іконки з посиланнями на активні професійні профілі (LinkedIn – обов'язково, інші – за релевантністю: GitHub, Behance, Twitter тощо) у хедері або футері сайту. Якщо ведеться блог, слід додати кнопки "Поділитися" (Share). Рекомендується уникати вбудовування стрічок соцмереж, якщо вони не є частиною контенту, бо це може сповільнювати сайт.

Ретельне тестування перед запуском допоможе уникнути неприємних сюрпризів та гарантує позитивний досвід для відвідувачів.

1. Тестування функціональності та зручності використання (Usability).

- Кросбраузерність: Необхідно перевірити, як сайт виглядає та працює в останніх версіях популярних браузерів (Chrome, Firefox, Safari, Edge).

- Кросплатформеність: Важливо протестувати на різних пристроях (десктоп з різною роздільною здатністю, ноутбук, планшет, смартфон – як Android, так і iOS) та операційних системах. Для емуляції різних пристроїв можна використовувати інструменти розробника в браузері.

- Функціонал: Слід перевірити всі посилання (чи ведуть вони куди потрібно, чи немає "битих" посилань), кнопки, форми (чи відправляються дані, чи приходять сповіщення), інтерактивні елементи.

- Юзабіліті: Потрібно оцінити, наскільки легко знайти потрібну інформацію, наскільки зрозуміла навігація. Корисним є залучення друзів або колег для тестування та надання зворотного зв'язку щодо виконання певних завдань (наприклад, знайти контакти, завантажити резюме).

2. Оптимізація швидкості завантаження.

- Інструменти: Для аналізу швидкості та отримання рекомендацій використовуються Google PageSpeed Insights, GTmetrix, WebPageTest.

- Методи: Оптимізація зображень (розмір, формат, стиснення), увімкнення кешування браузера, мініфікація CSS, JavaScript та HTML файлів (видалення зайвих пробілів, коментарів), зменшення кількості HTTP-запитів (наприклад, об'єднання файлів CSS/JS), використання CDN (Content Delivery Network) для швидкої доставки контенту по світу (актуально при орієнтації на міжнародний ринок), вибір швидкого хостингу. Швидкий сайт важливий як для користувачів, так і для SEO.

3. Запуск та просування.

- Перед запуском: Рекомендується фінальна вичитка всіх текстів на помилки, перевірка налаштувань SEO (заголовки, описи), налаштування Google Analytics та Google Search Console (для відстеження трафіку та індексації). Необхідно створити резервну копію сайту.

- Запуск: Зробити сайт доступним для всіх (якщо він був у режимі розробки).

- Просування: Додати URL сайту до резюме, профілів на LinkedIn, Djinni, GitHub та інших професійних платформах. Вказати посилання в підписі електронної пошти. Поділитися посиланням у соціальних мережах (з коротким описом). Повідомити контактам та колегам про запуск сайту. При веденні блогу – регулярно публікувати новий контент та ділитися ним.

Створення сайту – це лише перший крок. Щоб зрозуміти його реальну цінність та вдосконалити його, необхідно систематично аналізувати його ефективність у контексті кар'єрних цілей.

Оцінка має базуватися на об'єктивних даних та якісному зворотному зв'язку.

1. Аналіз статистики відвідувань та конверсії.

- Використання Google Analytics: Цей безкоштовний інструмент надає вичерпну інформацію. Ключові метрики для аналізу: Аудиторія (кількість унікальних відвідувачів, нові та повторні візити, географія, типи пристроїв). Джерела трафіку (Organic Search,

Direct, Referral, Social). Поведінка (найпопулярніші сторінки, середній час на сторінці/сесії, показник відмов (Bounce Rate)). Конверсії (Goals): Необхідно налаштувати відстеження цільових дій (завантаження резюме, клік на email, відправка форми, перехід на LinkedIn). Це прямі індикатори зацікавленості.

- Використання Google Search Console: Ще один безкоштовний інструмент від Google. Показує, за якими пошуковими запитами сайт з'являється в результатах пошуку, його позиції, CTR (Click-Through Rate), а також повідомляє про технічні проблеми з індексацією сайту.

- Інтерпретація даних: Регулярний (наприклад, щомісячний) аналіз цих даних допоможе зрозуміти, чи досягає сайт цільової аудиторії, який контент є найефективнішим, які канали просування працюють, і де є точки росту.

2. Опитування потенційних роботодавців та рекрутерів.

- Як отримати: Найпростіший спосіб – запитати під час або після співбесіди, чи переглядали вони сайт і яке їхнє враження. Можна також попросити про фідбек колег або менторів, які працюють у сфері рекрутингу.

- Питання для зворотного зв'язку: Чи був сайт корисним? Яке враження від дизайну/структури? Чи легко знайти інформацію? Чи достатньо деталей у портфоліо? Що сподобалося/що покращити?

- Цінність зворотного зв'язку: Цей якісний фідбек надає інсайти, які неможливо отримати з аналітики, і допомагає побачити сайт очима роботодавця.

3. Аналіз успішних кейсів використання персональних вебсайтів.

- Де шукати приклади: Доцільно шукати сайти лідерів думок, успішних фрілансерів або фахівців у відповідній галузі (можна знайти через LinkedIn, професійні спільноти, рейтинги).

- Що аналізувати: Слід звертати увагу на: структуру та навігацію; спосіб презентації портфоліо; якість контенту "Про мене" та блогу; дизайн; унікальні "фішки".

- Цінність аналізу: Аналіз конкурентів та успішних прикладів дає натхнення, ідеї для покращення власного сайту та розуміння стандартів у відповідній індустрії.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує зростаючу роль персонального вебсайту як ефективного інструменту самопрезентації та пошуку роботи, що доповнює традиційні методи в умовах

цифрового ринку праці. Аналіз показав його переваги у формуванні особистого бренду, гнучкості представлення портфолію та демонстрації унікальних компетенцій, особливо для IT, креативних та маркетингових спеціальностей, що підтверджується досвідом 2023 року. Водночас успішна реалізація вимагає значних зусиль на створення якісного контенту, дизайну, технічну оптимізацію та подальшу оцінку ефективності.

Для максимізації впливу персонального вебсайту рекомендується застосовувати системний підхід. Важливо проводити регулярний аналіз його роботи за допомогою вебаналітики та збирати зворотний зв'язок для виявлення слабких місць та можливостей для розвитку. Необхідно систематично оновлювати контент (особливо портфолію та резюме) та, за потреби, дизайн, адаптуючи їх до актуальних кар'єрних цілей та трендів. Також слід активно займатися просуванням сайту, використовуючи SEO-оптимізацію, інтеграцію з професійними соціальними мережами та іншими релевантними каналами для залучення цільової аудиторії.

Література

1. Держстат. URL: <https://stat.gov.ua/uk> (дата звернення: 20.03.2024)
2. 70% of Employers Use Social Networking Sites to Research Candidates During Hiring Process. URL: <https://surl.li/ackoco> (date of application: 20.03.2024)
3. 5 Personal Branding Tips for Your Job Search. URL: <https://themanifest.com/digital-marketing/5-personal-branding-tips-job-search> (date of application: 20.03.2024)
4. Досліджуємо ринок, аналізуємо тренди та ділимося досвідом. URL: <https://gl.ua/blog/shcho-take-sayt-vizytka-ta-komu-vin-potribnyy> (дата звернення: 20.03.2024)
5. Тренди ринку праці: 53% пошукачів шукають вакансії, не розмішуючи резюме. URL: <https://blog.olx.ua/24498/trendi-rinku-praci-53-poshukachiv-shukayut-vakansii-ne-rozmishhuyuchi-rezume/> (дата звернення: 20.03.2024)
6. We showed 3 resume designs to recruiters and they ALL picked the same one. URL: <https://www.theladders.com/career-advice/we-showed-3-resume-designs-to-recruiters-and-they-all-picked-the-same-one> (date of application: 20.03.2024)
7. Портрет українського IT-рекрутера у 2022 році. URL: <https://evotalents.com/uk/blog/79> (дата звернення: 20.03.2024)
8. 71% of Hiring Decision-Makers Agree Social Media is Effective for Screening Applicants. URL: <https://www.prweb.com/releases/71-of-hiring-decision-makers-agree-social-media-is-effective-for-screening-applicants-815808007.html> (date of application: 20.03.2024)
9. More Than Half of Employers Have Found Content on Social Media That Caused Them NOT to Hire a Candidate, According to Recent CareerBuilder¹ Survey. URL: <https://surl.li/bosunb> (date of application: 20.03.2024)
10. \$2000 за рекомендацію та робота в оточенні друзів. Як працюють реферальні програми в IT. URL: <https://dou.ua/lenta/articles/referral-programs/> (дата звернення: 20.03.2024)
11. The role of Self Marketing and Personal Branding in job search. URL: https://www.researchgate.net/publication/334290449_The_role_of_Self_Marketing_and_Personal_Branding_in_job_search (date of application: 20.03.2024)
12. Як IT-спеціалісти шукають роботу у 2023-му. Для 66% це важко - результати опитування. URL: <https://dou.ua/lenta/articles/job-survey-results-2023/> (дата звернення: 20.03.2024)

References

1. Derzhstat. URL: <https://stat.gov.ua/uk> (data zvernennja: 20.03.2024).
2. 70% of Employers Use Social Networking Sites to Research Candidates During Hiring Process. URL: <https://surl.li/ackoco> (date of application: 20.03.2024).
3. 5 Personal Branding Tips for Your Job Search. URL: <https://themanifest.com/digital-marketing/5-personal-branding-tips-job-search> (date of application: 20.03.2024).
4. Doslidzhujemo rynek, analizujemo trendy ta dilymosja dosvidom. URL: <https://gl.ua/blog/shcho-take-sayt-vizytka-ta-komu-vin-potribnyy> (data zvernennja: 20.03.2024).
5. Trendy rynku praci: 53% poshukachiv shukajutj vakansiji, ne rozmishhujuchy rezjume. URL: <https://blog.olx.ua/24498/trendi-rinku-praci-53-poshukachiv-shukayut-vakansii-ne-rozmishhuyuchi-rezjume/> (data zvernennja: 20.03.2024).
6. We showed 3 resume designs to recruiters and they ALL picked the same one. URL: <https://www.theladders.com/career-advice/we-showed-3-resume-designs-to-recruiters-and-they-all-picked-the-same-one> (date of application: 20.03.2024)
7. Portret ukraïnskoho IT-rekrutera u 2022 rotsi. URL: <https://evotalents.com/uk/blog/79> (data zvernennia: 20.03.2024).
8. 71% of Hiring Decision-Makers Agree Social Media is Effective for Screening Applicants. URL: <https://www.prweb.com/releases/71-of-hiring-decision-makers-agree-social-media-is-effective-for-screening-applicants-815808007.html>

- [for-screening-applicants-815808007.html](#) (date of application: 20.03.2024).
9. More Than Half of Employers Have Found Content on Social Media That Caused Them NOT to Hire a Candidate, According to Recent CareerBuilder¹ Survey. URL: <https://surl.li/bosunb> (date of application: 20.03.2024)
 10. \$2000 за rekomendatsiui ta robota v otochenni druziv. Yak pratsiuiut referalni prohramy v IT. URL: <https://dou.ua/lenta/articles/referral-programs/> (date of application: 20.03.2024).
 11. The role of Self Marketing and Personal Branding in job search. URL: https://www.researchgate.net/publication/334290449_The_role_of_Self_Marketing_and_Personal_Branding_in_job_search (date of application: 20.03.2024).
 12. Yak IT-spetsialisty shukaiut robotu u 2023-mu. Dlia 66% tse vazhko - rezultaty opytuvannia. URL: <https://dou.ua/lenta/articles/job-survey-results-2023/> (data zvernennia: 20.03.2024).

Pominchuk Y.V., Hryshchenko S.M. The effectiveness of a personal website compared to traditional job search methods

The article conducts a comprehensive study of the effectiveness of a personal website as a modern tool for job search and self-presentation in comparison with traditional methods in the context of active digitalisation of the Ukrainian labour market. The evolution of the recruitment process is considered, where employers are increasingly analysing the digital footprint of candidates, which increases the importance of controlled online resources. The article analyses in detail the effectiveness, advantages and disadvantages of traditional channels: resumes on specialised portals, use of professional social networks, personal recommendations, networking and cooperation with recruitment agencies, based on current statistics and research.

The purpose of the study presented in the article is to comprehensively analyse and compare the effectiveness of a personal website as a job search tool with traditional methods, and to provide sound practical recommendations on its creation, implementation and

evaluation of its effectiveness to increase the competitiveness of candidates. The author systematises the role of a personal website as a multifunctional tool for enhanced self-presentation, personal branding, demonstration of a portfolio and unique professional competences. The key advantages of the website (flexibility of format, control over content, the ability to demonstrate practical skills) and the main challenges (time and resource costs, the need for updates, dependence on SEO, difficulty in evaluating effectiveness) are identified. The article considers the industry specifics of the site's use and reveals its particular effectiveness for representatives of creative industries, IT specialists, marketers and freelancers. The article analyses the experience of job search by IT specialists in 2023 as a case study, which demonstrates the ability of a personal website to increase the visibility of candidates and overcome market barriers. The article also provides a detailed description of the key stages of practical implementation of an effective personal website: from strategic choice of technologies, development of structure and design, creation of value-added content and SEO optimisation to testing, launch and methods of evaluating its effectiveness using web analytics and feedback. It is substantiated that a systematic approach to the creation, management and analysis of a personal website can significantly increase the competitiveness of a specialist in the modern labour market.

Keywords: personal website, job search, efficiency, self-presentation, traditional methods, IT specialists, web development.

Помінчук Яна Віталіївна – студентка групи ЦДБ-21-1, факультет фінансів та цифрових технологій, Державний податковий університет, м. Ірпінь, email: yanapominchuk2004@gmail.com

Грищенко Світлана Миколаївна - к.пед.н., доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, Державний податковий університет, м. Ірпінь, s-grischenko@ukr.net

Стаття подана 15.03.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-24-31>

УДК 66.069.84

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ГАЗОРІДИННОГО СЕПАРАТОРА

Лях М.М., Фурса Р.П., Витвицький В.С.,
Михайлюк В.В., Процюк Г.Я., Михайлюк В.Т.

MODELING OF THE OPERATION OF A GAS-LIQUID SEPARATOR

Liakh M.M., Fursa R.P., Vytvytskyi V.S.,
Mykhailiuk V.V., Protsiuk H.Y., Mykhailiuk V.T.

У статті виконано комплексне дослідження конструкцій та принципів дії газорідних сепараторів, які широко використовуються в промисловості для очищення газових потоків від краплинної рідини та твердих домішок. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності розділення фаз, мінімізації втрат енергії, зменшення габаритів та витрат на експлуатацію обладнання. Автори провели огляд сучасних технологій сепарації, проаналізували конструктивні особливості газорідних сепараторів та методи оптимізації їхньої роботи. Основну увагу зосереджено на використанні програм CFD для імітаційного моделювання процесів у газорідному сепараторі. Для дослідження вибрано та побудовано тривимірну модель сепаратора, у якій визначено розподіли тиску, температури та масової концентрації компонентів у газовому потоці. Під час моделювання враховано різні умови експлуатації, такі як зміна температури, тиску та об'ємної витрати. Також враховано багатокомпонентність газового потоку. О'ємна концентрація компонентів газової суміші: метан – 93 %, водень – 0,1 %, етан – 2,5 %, пропан – 0,31 %, бутан – 0,11 %, метанол – 0,08 %. Особливу увагу приділено впливу конструктивних елементів сепаратора на ефективність розділення фаз. Встановлено, що із зменшенням температури газорідного потоку зменшується ефективність роботи сепаратора. Побудовано графічну залежність масової концентрації води у вихідному газовому потоці від витрати та температури газорідної суміші. Досліджено вплив підігріву корпусу сепаратора на ефективність його роботи. Застосування підігріву корпусу сепаратора дозволяє значно знизити масову концентрацію краплинної рідини у вихідному газовому потоці. Отримані результати можуть бути використані для

модернізації існуючих газорідних сепараторів, а також при розробці нових високоефективних конструкцій. Практичне значення роботи полягає у зменшенні енергозатрат та підвищенні надійності роботи обладнання в різних галузях промисловості, таких як нафтогазова, хімічна та енергетична. Для забезпечення оптимальних витрат на відокремлення з газового потоку води в подальшому планується виконати оптимізаційне параметричне дослідження.

Ключові слова: газорідний сепаратор, сепарація сумішей, газорідний потік, краплинна рідина, очищення газу, імітаційне моделювання, масова концентрація

Вступ. Різноманітні промислові виробничі процеси вимагають розділення газорідних сумішей з метою очищення продуктів або вторинної переробки корисної сировини. Природний газ, який видобувається з нафтогазових свердловин, містить певну частку рідин (води або газового конденсату), які можуть блокувати трубопроводи та обладнання, а також знижувати точність контрольно-вимірювальних приладів. Ці рідини можуть також викликати корозію обладнання, трубопроводів і контрольно-вимірювальних приладів, та навіть спричиняти вібрації, які пошкоджують трубопроводи та обладнання, що впливає на нормальний видобуток і збільшує витрати на експлуатацію обладнання. Тому газорідні суміші необхідно зневоднювати перед надходженням до станції збору. Газорідне розділення також використовується в хімічній промисловості, на

атомних електростанціях, мембранних біореакторах, для видалення пилу, утилізації відпрацьованих газів гідрування дизельного палива тощо. Особливо актуальним є вплив температури на ефективність роботи газорідних сепараторів. В нафтогазовій галузі сепараційне обладнання в основному знаходиться під відкритим небом, тому зміна температур суттєво впливає на експлуатаційні характеристики. Це стосується як сезонних змін температури, так і її зміни протягом доби.

Аналіз закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій. Очищення газу від рідких та твердих домішок, розділення гетерогенних газорідних і трифазних сумішей – найпоширеніші процеси в нафто- і газовидобувній, нафтогазопереробній, хімічній та нафтохімічній, будівельній та інших галузях промисловості [1-3]. Обладнання, що при цьому застосовується є різноманітні газорідні сепаратори, які є конструктивно простими пристроями. Відділення краплинної рідини з газового потоку у сепараторах може відбуватись за рахунок відцентрової сили, сили тяжіння тощо. Перевагами цих пристроїв є низька вартість їх експлуатації, простота технічного обслуговування, оскільки у їх конструкції відсутні складні елементи та рухомі частини. Сьогодні основним завданням при вдосконаленні сепараторів є мінімізація перепаду тиску, підвищення ефективності сепарації, збільшення продуктивності та зменшення габаритних розмірів і маси [4, 5].

У роботах [6, 7] аналізуються особливості процесу сепарації потоку двофазної газорідної суміші. Краплі рідкої фази (конденсату) формуються в потоці починаючи від джерела надходження і до самого входу в сепаратор. Для того, щоб оцінити ефективність роботи сепаратора, необхідно знати об'ємний вміст рідкої фази, середній радіус краплі та розподіл їх за розмірами. Вздовж шляху руху газу від джерела надходження до сепаратора тиск і температура неперервно змінюються. Під час руху порушується термодинамічна рівновага двофазної багатокомпонентної системи і відбувається процес масообміну між фазами.

Конденсація веде до утворення дрібних крапель, розмір яких змінюється за рахунок конденсаційного росту в умовах перенасичення і коагуляції, а також подрібнення в потоці газу. В результаті в підвідній трубі перед сепаратором встановлюється розподіл крапель за розмірами, який характеризується: вмістом рідкої фази,

середнім діаметром краплі та дисперсією розподілу.

Якщо перед сепаратором відсутній пристрій попередньої конденсації, то потік газу зі встановленим розподілом потрапляє в сепаратор, в якому відбувається розділення фаз. В цьому випадку основними механізмами формування крапель в турбулентному потоці газу є процеси подрібнення і коагуляції, що протікають одночасно [6, 8, 9].

Основним параметром, який характеризує ступінь відділення рідини від газу в сепараторі, є коефіцієнт ефективності.

Коефіцієнт ефективності залежить від особливостей конструкції сепаратора, термобаричних умов, параметрів технологічної схеми, складу і фізико-хімічних властивостей газорідного потоку [10, 11].

Донедавна розробку нових конструкцій сепараційного обладнання проводили на основі практичного досвіду попередніх дослідників, а також використовуючи спрощені математичні моделі. Такий підхід вимагав значних фізичних та економічних затрат та часто не забезпечував очікуваних результатів. В сучасних умовах розвитку комп'ютерної техніки вирішення складних актуальних задач здійснюється з допомогою програмних комплексів, які дають можливість моделювати різноманітні робочі процеси та явища [12,13,14]. Сьогодні під час розроблення сепараційного обладнання застосовуються програми обчислювальної гідродинаміки (англ. computational fluid dynamics, CFD) [15, 16]. Завдяки розвитку комп'ютерної техніки і впровадженню програмних комплексів, таких як SolidWorks Flow Simulation, стало можливим ефективно вирішувати складні задачі проектування, що значно підвищує точність і економічність ефективності інженерних рішень. [17, 18].

Дослідження поведінки частинок нафти в сепараторах за допомогою CFD проведено у працях [19, 20]. У роботі [19] проведено дослідження підтверджує точність засобів і методів CFD шляхом порівняння чисельних результатів з експериментальними даними. З іншого боку, автори в роботі [20] у основному представляють різні CFD дослідження сепараторів з використанням методу VOF, дійшовши висновку, що чисельний підхід має багато переваг, оскільки є економічно ефективним і гнучким щодо конструкційних змін. Крім того, використовуючи чисельні результати, оптимізація процесу сепарації призводить до покращених конструкцій

сепараторів, що дає можливість вловлювати частинки рідини розміром до 10 мікрметрів [21]. У роботах [18, 22, 23] автори застосовують інструменти CFD для дослідження руху потоку через сепаратор з різними конструкціями входу, дійшовши висновку, що методи CFD є ефективним інструментом для оцінки продуктивності та процесів оптимізації конструкції сепаратора.

Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання

Метою роботи є оцінка експлуатаційних характеристик газорідинного сепаратора з використанням імітаційного моделювання.

Для досягнення мети необхідно:

- провести аналітичний огляд літературних джерел, які стосуються відділення краплинної рідини з газового потоку та особливостей роботи газорідинних сепараторів;

- дослідити роботу газорідинного сепаратора, встановити його характеристики.

Викладення основного матеріалу

Для імітаційного моделювання роботи та оцінки характеристик вибрано газорідинний сепаратор, будова якого показана на рисунку 1.

Сепаратор для відділення краплинної рідини від газового потоку складається з вхідного патрубку 5 який приєднано до труби 8, у якій виконано отвори як у радіальному напрямку, так і у торцевій його кришці. На зовнішній поверхні труби 8 встановлений завихрювач 9, зовнішня частина якого має зазор з корпусом 10. У нижній частині до корпусу 10 приєднано днище 13, до якого кріпиться арматура, серед якої: вентилі, патрубок відводу 14, витратомір 15, фільтр 16. У верхній частині корпусу 10 розміщено перехідник циліндричний 4. Цей перехідник з'єднується з корпусом за допомогою фланців 6 та 7. До перехідника 4 приєднано вихідний патрубок очищеного газу 1. На зовнішній поверхні корпусу 10 розміщено кожух 11, до якої приєднано вентилі 12 та 17.

Неочищений газ подається у вхідний патрубок 5, далі газ рухається по трубі 8 та виходить з неї через отвори у трубі в корпус 10. На виході з отворів труби 8 з газу відділяється краплинна рідина, яка рухається разом з ним вгору. Далі газорідинна суміш потрапляє на завихрювач 9 у якому осьовий рух суміші переходить у гвинтовий. За такого виду руху відбувається збільшення відцентрової складової швидкості, і відповідно, відцентрової сили. За рахунок різниці густин газу та краплинної рідини остання під дією відцентрової сили відкидається на внутрішню поверхню корпусу

10. Далі ця рідина стікає вниз у днище 13 та відводиться з сепаратора через фільтр 16, витратомір 15 та патрубок відводу уловленої рідини 14. Очищений від краплинної рідини газ відводиться з сепаратора через вихідний патрубок 1.

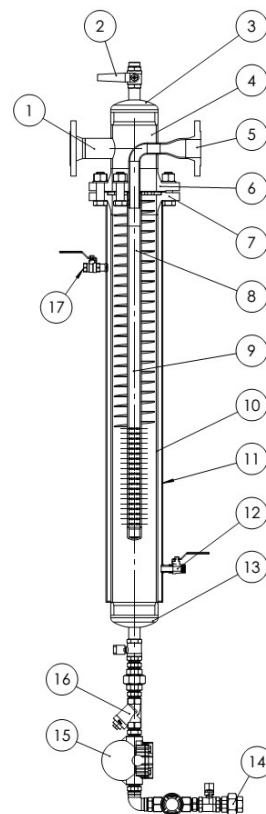


Рис. 1. Конструкція газорідинного сепаратора:
 1 – вихідний патрубок очищеного газу; 2 – кран;
 3 – кришка еліптична; 4 – перехідник циліндричний;
 5 – вхідний патрубок; 6 – фланець перехідника циліндричного; 7 – фланець корпусу; 8 – труба;
 9 – завихрювач; 10 – корпус; 11 – кожух;
 12 – вентиль; 13 – днище; 14 – патрубок відводу уловленої рідини; 15 – витратомір; 16 – фільтр;
 17 – вентиль

Для встановлення характеристик газорідинного сепаратора використано його тривимірну модель, яка зображена на рисунку 2.

Для пришвидшення імітаційного моделювання частину елементів, що входять в склад газорідинного сепаратора, вилучено – залишено тільки ті елементи, які приймають безпосередню участь у процесі сепарації (рис. 3).

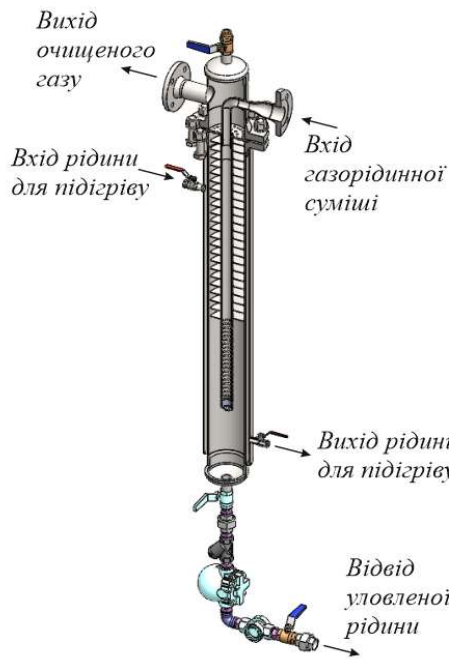


Рис. 2. Тривимірний модель газорідинного сепаратора

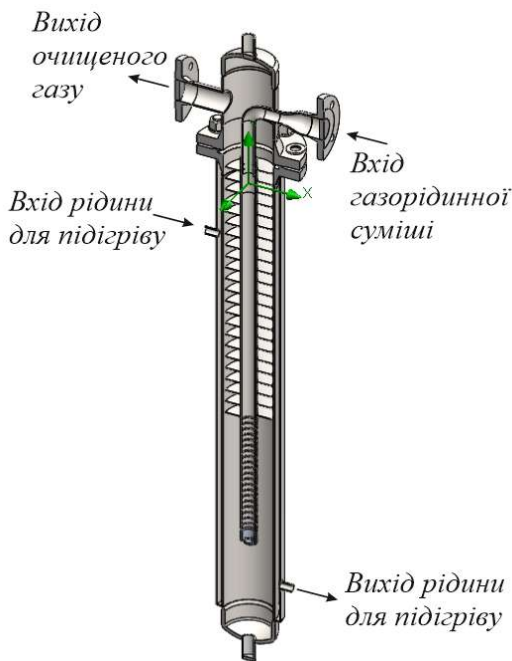


Рис. 3. Модель сепаратора для імітаційного моделювання

Під час імітаційного моделювання використовувалися граничні умови: об'ємна витрата газової суміші 0,046 м³/с; тиск на вхідному патрубку сепаратора 6 МПа.

У роботі враховано багатокомпонентність газового потоку, що складається із суміші різних газів, під час проведення імітаційного моделювання. Об'ємна концентрація компонентів газової суміші становить: метан –

93 %, водень – 0,1 %, етан – 2,5 %, пропан – 0,31 %, бутан – 0,11 %, метанол – 0,08 %. Температура газової суміші на вході до сепаратора становить 40 °С. Отримані дані моделювання дозволяють оцінити вплив складу та температури газового потоку на роботу сепаратора.

Отримані результати імітаційного моделювання наведено на рисунку 4.

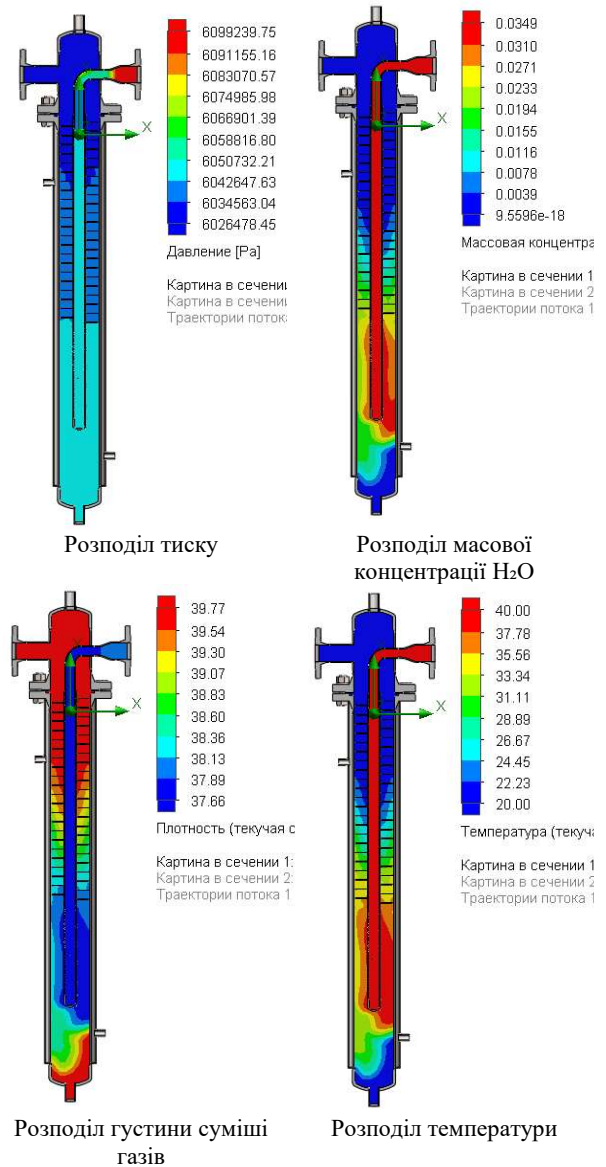


Рис. 4. Результати імітаційного моделювання сепаратора

Оскільки температура газу на вході та витрата можуть змінюватись, то було проведено серію імітаційних моделювань. Діапазон температури від мінус 10 до плюс 40 0С, а діапазон витрати від 0,013 до 0,046 м³/с.

У таблиці показано сценарій проектування, який було використано для імітаційного моделювання. На рисунку 5 показано залежність масової концентрації води (H_2O) від параметрів розрахункових точок.

Таблиця

Сценарій імітаційних моделювань			
№ з/п	Розрахункова точка	Об'ємна витрата газорідинної суміші на виході, m^3/s	Температура газорідинної суміші на вході, $^{\circ}C$
1	1	0,013	-10
2	2	0,013	15
3	3	0,013	40
4	4	0,0295	-10
5	5	0,0295	15
6	6	0,0295	40
7	7	0,046	-10
8	8	0,046	15
9	9	0,046	40

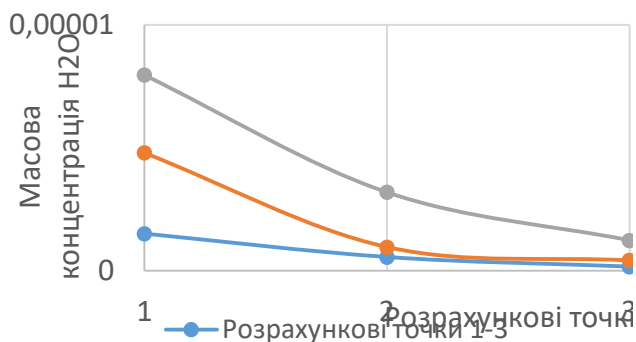


Рис. 5. Залежність масової концентрації води від параметрів розрахункової точки

Виходячи з графічних залежностей отриманих за результат імітаційного моделювання масова концентрація H_2O на виході із сепаратора значно залежить від температури газової суміші. Для підігріву газової суміші на поверхні сепаратора встановлено «кожух», у яку подається гаряча пара або вода.

Дослідження впливу підігріву на характеристики сепаратора виконано із використанням таких граничних умов:

- тиск на вході сепаратора, 6 МПа;
- об'ємна витрата газу на виході сепаратора, 0,046 m^3/s ;
- тиск на вході у кожух, 0,2 МПа;
- витрата рідини на підігрів сепаратора, 0,0005 m^3/s ;
- температура газового потоку, мінус 10 $^{\circ}C$;

– температура рідини для підігріву газового потоку, плюс 40 $^{\circ}C$.

Граничні умови дослідження наведено на рисунку 6.

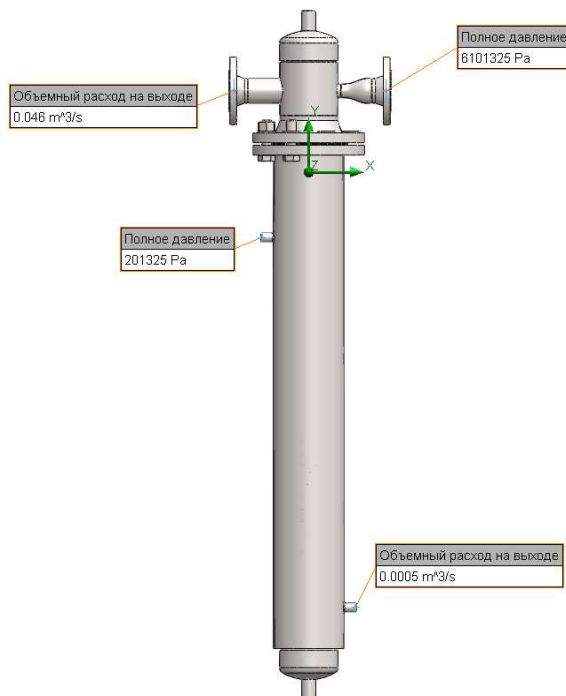


Рис. 6. Граничні умови



Рис. 7. Масова концентрація води (після нагрівання газової суміші)

На рисунку 7 показано розподіл масової концентрації води у сепараторі під час підігріву газової суміші.

Отже, згідно результатів імітаційного моделювання, якщо підігрівати газову суміш, то можна досягнути значного зменшення масової концентрації води у вихідному (після сепаратора) потоці.

Зрозуміло, що для забезпечення оптимальних витрат на відокремлення з газового потоку води доцільно було б виконати оптимізаційне параметричне моделювання. Проте, це планується провести у подальших дослідженнях.

Висновки

З проведеного огляду літературних джерел, які стосуються відділення краплинної рідини з газового потоку та особливостей роботи газорідних сепараторів встановлено, що процеси, які відбуваються під час їх роботи є складними та їх важко описати аналітично. На даний час для дослідження конструкцій сепараторів застосовують програми CFD, які дозволяють пришвидшити процес розрахунку та дають змогу отримати необхідні результати.

В результаті проведених досліджень газорідного сепаратора встановлено, що на його експлуатаційні характеристики, а саме ефективність роботи суттєво впливає температура газорідної суміші, яка рухається в порожнині сепаратора.

Одним із орієнтовних напрямів для отримання покращених експлуатаційних характеристик газорідного сепаратора може бути підігрів зовнішньої поверхні корпусу самого сепаратора потоком гарячої води (рідини) або повітря (газу) між корпусом і кожухом.

Література

1. Михайлюк В. В., Фафлей О. Я., Мельник В. О., Захара І. Я., Малишев А. Р., & Процюк Г. Я. Моделювання газового вертикального сіткового сепаратора. Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2022. №1(52), 91–100. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-91-100](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-91-100)
2. L. M. Mil'shtein, *Modernization of Oil and Gas Field Separation. Development of New-Generation Separation Units and Apparatuses*, LAP Press, Saarbrücken, Germany (2012).
3. Liu C S Development and field test of separator in prying loading type gas collecting device. *Natural Gas and Petroleum*. 1994. 12 36-40
4. Vijayan, V., Vivekanandan, M., Venkatesh, R. et al. CFD modeling and analysis of a two-phase vapor separator. *J Therm Anal Calorim* 145, 2719–2726 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09825-2>
5. Kou J, Li Z. Numerical Simulation of New Axial Flow Gas-Liquid Separator. *Processes*. 2022; 10(1):64. <https://doi.org/10.3390/pr10010064>
6. Liakh M.M., Yuriev E.V., Vakaliuk V.M., Solonychnyi Ya.V. Matematychna model separatsii hazoridynnoi sumishi v separatori inertiinoho typu. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2008. № 1. P. 67-73.
7. Ye, Junxiang & Xu, Yanxia & Song, Xingfu & Yu, Jianguo. Novel conical section design for ultra-fine particles classification by a hydrocyclone. *Chemical Engineering Research and Design*. 2019. 144. 10.1016/j.cherd.2019.02.006.
8. Zhang, Caie & Wei, Dezhou & Cui, Baoyu & Li, Tianshu & Luo, Na. Effects of curvature radius on separation behaviors of the hydrocyclone with a tangent-circle inlet. *Powder Technology*. 2017. 305. 10.1016/j.powtec.2016.10.002.
9. Emam, Mahmoud & Zhou, Ling & Shi, Weidong & Chen, Han. Performance evaluation of standard cyclone separators by using CFD–DEM simulation with realistic bio-particulate matter. *Powder Technology*. 2021. 385. 10.1016/j.powtec.2021.03.006.
10. Wiencke B 2011. Fundamental principles for sizing and design of gravity separators for industrial refrigeration. *International Journal of Refrigeration*. 34 2092-2108.
11. Chu, Kaiwei & Wang, B. & Xu, D.L. & Chen, Y.X. & Yu, Aibing. CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*. 2011. 66. 834-847. 10.1016/j.ces.2010.11.026.
12. Katare, Pravin & Krupan, Abhineel & Dewasthale, A. & Datar, A. & Dalkilic, A.S.. CFD analysis of cyclone separator used for fine filtration in separation industry. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. 28. 101384. 10.1016/j.csite.2021.101384.
13. Chu, Kaiwei & Wang, B. & Xu, D.L. & Chen, Y.X. & Yu, Aibing. CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*. 2011. 66. 834-847. 10.1016/j.ces.2010.11.026.
14. Vytyaz, Oleg & Chudyk, I. & Mykhailiuk, V.. Study of the effects of drilling string eccentricity in the borehole on the quality of its cleaning. 2015.
15. N. D. Katopodes, *Free-Surface Flow: Computational Methods*, Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2019
16. V. Dragan, I. Malael, and B. Gherman, "A Comparative Analysis Between Optimized and Baseline High Pressure Compressor Stages Using Tridimensional Computational Fluid Dynamics," *Engineering, Technology & Applied Science*

- Research, vol. 6, no. 4, pp. 1103–1108, Aug. 2016, <https://doi.org/10.48084/etasr.696>.
17. Mastruk V.V. Otsinka enerhozatratt pry roboti priamotechiinoho tsyklonu za dopomohoiu prohramnoho paketu FLOW SIMULATION / V.V. Mastruk, R.I. Havryliv, A.S. Popil, A.M. Basisty // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy. Kharkiv. 2012. Vyp. 6/8(60). P. 28–30.
 18. F. P. Lucas and R. Huebner, "Numerical Simulation of Single-Phase and Two-Phase Flows in Separator Vessels with Inclined Half-Pipe Inlet Device Applied in Reciprocating Compressors," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 8, no. 3, pp. 2897–2900, Jun. 2018, <https://doi.org/10.48084/etasr.1993>.
 19. S. C. K. De Schepper, G. J. Heynderickx, and G. B. Marin, "CFD modeling of all gas–liquid and vapor–liquid flow regimes predicted by the Baker chart," *Chemical Engineering Journal*, vol. 138, no. 1, pp. 349–357, May 2008, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.06.007>.
 20. A. P. Laleh, W. Y. Svrcek, and W. D. Monnery, "Design and CFD studies of multiphase separators - a review," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 90, no. 6, pp. 1547–1561, 2012, <https://doi.org/10.1002/cjce.20665>.
 21. G. Cheng, L. Y. Yan, and H. Zhou, "The Oil Vessel Structure Optimization by the use of CFD in the Oil Injection Twin-Screw Compressor," presented at the International Compressor Engineering Conference, West Lafayette, IN, USA, 2004, Art. no. 1714.
 22. Xu, Yanxia & Ye, Junxiang & Song, Xingfu & Yu, Jianguo. Classification of Ultrafine Particles Using a Novel 3D-Printed Hydrocyclone with an Arc Inlet: Experiment and CFD Modeling. *ACS Omega*. 2022. 8. 10.1021/acsomega.2c06383.
 23. Tian, J. Y.; Ni, L.; Song, T.; Zhao, J. N. CFD simulation of hydrocyclone–separation performance influenced by reflux device and different vortex–finder lengths. *Sep. Purif. Technol.* 2020, 233, No. 116013. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116013
 4. Vijayan, V., Vivekanandan, M., Venkatesh, R. et al. CFD modeling and analysis of a two-phase vapor separator. *J Therm Anal Calorim* 145, 2719–2726. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09825-2>
 5. Kou J, Li Z. Numerical Simulation of New Axial Flow Gas-Liquid Separator. *Processes*. 2022; 10(1):64. <https://doi.org/10.3390/pr10010064>
 6. Liakh M.M., Yuriev E.V., Vakaliuk V.M., Solonychnyi Ya.V. Matematychna model separatsii hazoridynnoi sumishi v separatori inertsiiinoho typu. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2008. № 1. P. 67-73.
 7. Ye, Junxiang & Xu, Yanxia & Song, Xingfu & Yu, Jianguo. Novel conical section design for ultra-fine particles classification by a hydrocyclone. *Chemical Engineering Research and Design*. 2019. 144. 10.1016/j.cherd.2019.02.006.
 8. Zhang, Caie & Wei, Dezhou & Cui, Baoyu & Li, Tianshu & Luo, Na. Effects of curvature radius on separation behaviors of the hydrocyclone with a tangent-circle inlet. *Powder Technology*. 2017. 305. 10.1016/j.powtec.2016.10.002.
 9. Emam, Mahmoud & Zhou, Ling & Shi, Weidong & Chen, Han. Performance evaluation of standard cyclone separators by using CFD–DEM simulation with realistic bio-particulate matter. *Powder Technology*. 2021. 385. 10.1016/j.powtec.2021.03.006.
 10. Wiencke B. Fundamental principles for sizing and design of gravity separators for industrial refrigeration. *International Journal of Refrigeration*. 2011.34 2092-2108.
 11. Chu, Kaiwei & Wang, B. & Xu, D.L. & Chen, Y.X. & Yu, Aibing. CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*. 2011. 66. 834-847. 10.1016/j.ces.2010.11.026.
 12. Katare, Pravin & Krupan, Abhineel & Dewasthale, A. & Datar, A. & Dalkilic, A.S.. CFD analysis of cyclone separator used for fine filtration in separation industry. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. 28. 101384. 10.1016/j.csite.2021.101384.
 13. Chu, Kaiwei & Wang, B. & Xu, D.L. & Chen, Y.X. & Yu, Aibing. CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*. 2011. 66. 834-847. 10.1016/j.ces.2010.11.026.
 14. Vytyaz, Oleg & Chudyk, I. & Mykhailiuk, V.. Study of the effects of drilling string eccentricity in the borehole on the quality of its cleaning. 2015.
 15. N. D. Katopodes, *Free-Surface Flow: Computational Methods*, Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2019.
 16. V. Dragan, I. Malael, and B. Gherman, "A Comparative Analysis Between Optimized and Baseline High Pressure Compressor Stages Using Tridimensional Computational Fluid Dynamics," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 6, no. 4, pp. 1103–1108, Aug. 2016, <https://doi.org/10.48084/etasr.696>.

References

1. Mykhailiuk, V. V., Faflei O. Y., Melnyk V. O., Zakhara, I. Y., Malyshev, A. R., & Protsiuk, H. Y. Modeling of a gas vertical grid separator. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, 2022. (1(52), 91–100. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-91-100](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-91-100)
2. L. M. Mil'shtein, *Modernization of Oil and Gas Field Separation. Development of New-Generation Separation Units and Apparatuses*, LAP Press, Saarbrücken, Germany, 2012.
3. Liu C S. Development and field test of separator in prying loading type gas collecting, device. *Natural Gas and Petroleum*. 1994.12 36-40

17. Maistruk V.V. Otsinka enerhozatratt pry roboti priamotechiinoho tsyklonu za dopomohoiu prohrannoho paketu FLOW SIMULATION / V.V. Maistruk, R.I. Havryliv, A.S. Popil, A.M. Basisty // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy. Kharkiv. 2012. Vyp. 6/8(60). P. 28-30.
18. F. P. Lucas and R. Huebner, "Numerical Simulation of Single-Phase and Two-Phase Flows in Separator Vessels with Inclined Half-Pipe Inlet Device Applied in Reciprocating Compressors," Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 8, no. 3, pp. 2897–2900, Jun. 2018, <https://doi.org/10.48084/etasr.1993>.
19. S. C. K. De Schepper, G. J. Heynderickx, and G. B. Marin, "CFD modeling of all gas-liquid and vapor-liquid flow regimes predicted by the Baker chart," Chemical Engineering Journal, vol. 138, no. 1, pp. 349–357, May 2008, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.06.007>.
20. A. P. Laleh, W. Y. Svreck, and W. D. Monnery, "Design and CFD studies of multiphase separators - a review," The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 90, no. 6, pp. 1547–1561, 2012, <https://doi.org/10.1002/cjce.20665>.
21. G. Cheng, L. Y. Yan, and H. Zhou, "The Oil Vessel Structure Optimization by the use of CFD in the Oil Injection Twin-Screw Compressor," presented at the International Compressor Engineering Conference, West Lafayette, IN, USA, 2004, Art. no. 1714.
22. Xu, Yanxia & Ye, Junxiang & Song, Xingfu & Yu, Jianguo. Classification of Ultrafine Particles Using a Novel 3D-Printed Hydrocyclone with an Arc Inlet: Experiment and CFD Modeling. ACS Omega. 2022. 8. 10.1021/acsomega.2c06383.
23. Tian, J. Y.; Ni, L.; Song, T.; Zhao, J. N. CFD simulation of hydrocyclone-separation performance influenced by reflux device and different vortex-finder lengths. Sep. Purif. Technol. 2020, 233, No. 116013. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116013

Liakh M.M., Fursa R.P., Vytvytskyi V.S., Mykhailiuk V.V., Protsiuk H.Y., Mykhailiuk V.T. Modeling of the operation of a gas-liquid separator

The article presents a comprehensive study of the structures and principles of operation of gas-liquid separators, which are widely used in industry to clean gas flows from liquid droplets and solid impurities. The relevance of the work is due to the need to increase the efficiency of phase separation, minimize energy losses, reduce the size and operating costs of equipment. The authors reviewed modern separation technologies, analyzed the design features of gas-liquid separators and methods for optimizing their operation. The main attention is focused on the use of CFD programs for simulation modeling of processes in a gas-liquid separator. A three-dimensional model of the separator was selected and built for the study, in which the

distributions of pressure, temperature and mass concentration of components in the gas flow were determined. During the modeling, various operating conditions were taken into account, such as changes in temperature, pressure and volumetric flow rate. The multicomponent nature of the gas flow was also taken into account. The volumetric concentration of the gas mixture components: methane – 93%, hydrogen – 0.1%, ethane – 2.5%, propane – 0.31%, butane – 0.11%, methanol – 0.08%. Particular attention is paid to the influence of the separator's structural elements on the efficiency of phase separation. It was established that with a decrease in the temperature of the gas-liquid stream, the efficiency of the separator decreases. A graphical dependence of the mass concentration of water in the output gas stream on the flow rate and temperature of the gas-liquid mixture was constructed. The influence of heating the separator body on its efficiency was studied. The use of heating the separator body allows to significantly reduce the mass concentration of droplet liquid in the output gas stream. The results obtained can be used to modernize existing gas-liquid separators, as well as in the development of new highly efficient designs. The practical significance of the work lies in reducing energy costs and increasing the reliability of equipment in various industries, such as oil and gas, chemical and energy. In order to ensure optimal costs for separating water from the gas stream, it is planned to perform an optimization parametric study in the future.

Keywords: gas-liquid separator, mixture separation, gas-liquid flow, droplet liquid, gas purification, simulation modeling, mass concentration

Лях Михайло Михайлович – к. т. н, професор кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Фурса Роман Петрович – аспірант кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Витвицький Василь Степанович – к. т. н, доцент кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Михайлюк Василь Володимирович – к. т. н, доцент кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Процюк Галина Ярославівна – асистент кафедри інженерії програмного забезпечення Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Михайлюк Владислав Тарасович – магістр кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-32-36>

UDC 623

TYPES AND PROSPECTS OF NON-TRADITIONAL AND RENEWABLE ENERGY SOURCES IN UKRAINE

Brozhko R.M.

ВИДИ І ПЕРСПЕКТИВИ НЕТРАДИЦІЙНИХ І ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ

Брожко Р.М.

The article analyzes the current issues of the development of the alternative energy sector of Ukraine and possible further prospects of this sector, because in the context of European integration processes, significant attention is paid to the issues of the country's energy independence, taking into account the ecological purity and inexhaustibility of renewable energy sources. It is proved that the development of renewable energy will be an important step capable of improving the trade balance, creating new jobs, solving social issues, reducing dependence on natural gas imports, ensuring the country's energy independence and increasing the competitiveness of products in both domestic and foreign markets. It is proven that dependence on mineral extraction and outdated infrastructure have become a guarantee of the use of renewable energy sources, because boiler houses, diesel engines and coal-fired power plants emit small particles into the air that settle in the lungs and can cause serious diseases. It is noted that in order to strengthen the country's energy security, it is important for the state to make a choice between continuing to finance imported energy sources or developing the use of its own renewable energy sources, which will make it possible to reduce the cost of "green" electricity compared to thermal and even nuclear power plants.

Global processes in the modern world, the growth of world industrial production, lead to a significant increase in energy consumption and, as a result, significant environmental damage to the world environment. In recent years, this problem has become increasingly of concern to the world community, since a person needs the cleanest possible environment for his life. Therefore, at the moment there are reasons to consider environmental problems as one of the most important for ensuring the future sustainable development of humanity, it is these problems that pose the greatest threat to the world community.

In this paper, we discuss relevant background information on some unusual, yet renewable energy sources. We examine their current and potential uses, operational limitations, advantages and disadvantages, and the potential capacity of each fuel source for energy generation and fuel savings. The quantitative section analyzes the amount of power that unusual renewable energy sources can provide, according to the generation methods. In a separate section, we analyze the potential fuel savings through direct application in some industries. We explore these values with the help of several examples and show a financial analysis of selected alternative fuel projects. Finally, an overall analysis presents unusual alternative renewable energy sources and concludes that there is a great potential for fuel and cost savings, as well as for environmental protection.

Keywords: *alternative energy, unconventional energy, renewable energy sources, green energy.*

Introduction. Today, with energy prices at record highs, the need for non-conventional and renewable energy sources has skyrocketed. The market for alternative energy sources is extremely large because the cost of energy has increased so much. It is extremely important to find alternatives to coal and oil as a means of providing electricity and transportation to the population. Some non-conventional energy sources, such as wind and geothermal energy, have case studies that prove their value as an alternative energy source to provide electricity to the grid. In addition, biofuels and fuel cells have some significant results that demonstrate their potential to replace oil as a means of fueling transportation. The requirements for a

good alternative to traditional energy sources are that the energy source leaves little or no footprint on the environment, is economically feasible (good dollar-per-kilowatt ratio), and has the ability to support a large number of users. One of our goals is to study and determine which non-conventional energy sources can be part of the solution to the energy problem.

Due to the decrease in natural resources of traditional energy carriers (in particular, oil and natural gas), the increase in their cost, and concern about environmental problems, the world economy is increasingly focusing on the search and development of non-traditional and renewable energy sources (NRES).

The definition of "renewable" is rather conditional. The main features of renewable energy sources are inexhaustibility and high reproduction rate. This fully applies to the energy of the Sun, wind, ocean, hot dry rocks, molten magma. At the same time, the current level of economic development of civilization can significantly affect the reproduction of such types of renewable energy sources as biomass (BM), hydrothermal energy, therefore they are classified as renewable with a certain degree of convention. Modern world agro-industrial complex is a large consumer of fuel and energy resources (FER). The total cost of renewable energy for the production, processing and preparation of food products in most industrialized countries of the world is from 10 to 20%, and in developing countries - more than 30% in the structure of national energy balances. For the most part, this is the energy of steam and hydrothermal sources, biomass (biogas, fuel alcohols, fuel briquettes), the energy of small rivers, radiation and optical radiation of the Sun, as well as its derivative activity - wind. The main areas of use of renewable energy are heating residential and industrial premises, drying agricultural products, lifting and distributing water, lighting, providing car engines with liquid fuel.

The objective. To study the current state of the renewable energy industry, identify prospects for its further development and the investment attractiveness of alternative energy sources in Ukraine.

Research results. Non-traditional and renewable sources of energy have recently become one of the important criteria for the sustainable development of the world community. New and improved technologies are being searched for, their bringing to a cost-effective level and expanding the areas of use. The main reasons for such attention are the expected depletion of reserves of organic fuels,

a sharp increase in their price, imperfection and low efficiency of technologies for their use, and harmful effects on the environment, the consequences of which are increasingly worrying the world community.

The use of traditional hydrocarbons by combustion is accompanied by total energy losses of up to 80-90%, and therefore, technologies for their electrochemical conversion have already been developed today, which reduce losses to 10% and are more environmentally friendly.

Alternative energy is becoming one of the basic directions of technological development in the world; together with information and nanotechnologies, it is becoming an important component of the new post-industrial technological order.

Solar energy. The direction of solar energy is promising, because owners installing solar batteries on their houses (on walls and roofs) with a capacity of up to 30 kW (this is the amount prescribed by legislation for private households), and selling surplus energy at the "green tariff", can expect a payback in 5-10 years. In addition, they can use the received electricity to heat their own homes, installing, for example, an electric boiler.

It is worth noting that the efficiency of a mini power plant depends on many factors:

- climatic zone (southern Ukraine or northern)
- season (in summer there is more sunlight, therefore the efficiency is higher, in winter – lower)
- angle of inclination of the panels (optimal 30° - 45°)
- weather (cloudiness and clarity)
- time of day
- quality of the manufacturer [2]

In addition to solar panels, owners of private households can also install solar collectors - devices for heating water with solar energy. However, their efficiency also depends very much on the above-mentioned factors for solar panels.

Advantages of using solar panels on the roof of a house:

- free and practically inexhaustible source of energy;
- work does not harm the environment;
- maintenance consists in periodic cleaning of the panels from dust;
- the possibility of obtaining electricity in places where there are no centralized electricity networks;
- the ability to combine different power sources, i.e. in clear weather you can turn on solar panels, and in bad weather use a conventional source of electricity;

Disadvantages:

- relatively high prices for equipment for generating energy;
- low efficiency;
- dependence on the activity of sunlight under different climatic conditions of use. Prospects:
 - manufacturing of roofing elements (tiles) with built-in photovoltaic cells, which significantly reduces the cost of solar installations on the roof.
 - constant global improvements in the field of solar energy [3].

Wind energy. Currently, about 70 countries around the world are operating in the wind energy sector. Among the countries with the largest wind energy capacities are Germany, the USA, Spain, India, China, Denmark. In the USA, it is planned to achieve 15% of electricity production from wind by 2020, turbines are being improved, and the range of wind speeds that can be used by wind turbines is being expanded. Ukraine has its own developments of wind energy installations (WEU) and its own industrial production, and there are also licensed WEUs. Eight wind power plants (WEPs) are operating in the Crimea, the Azov Sea, and the Carpathian region. Since 1997, when the Comprehensive Program for the Construction of WEPs was adopted, wind energy in Ukraine has received state support in the form of a surcharge to the electricity tariff and direct financing. Advantages:

- An environmentally friendly type of energy. Electricity generation using "windmills" is not accompanied by emissions of carbon dioxide or any other gas.
- Ergonomics. Wind power plants take up little space and easily fit into any landscape, and are also perfectly combined with other types of economic use of the territory.
- Renewable energy. Wind energy, unlike fossil fuels, is inexhaustible.
- The best solution for hard-to-reach places. For remote places, the installation of wind power generators can be the best and cheapest solution possible.

Disadvantages:

Instability. Instability lies in the lack of guarantees of obtaining the required amount of electricity. In some areas of land, wind power may not be enough to generate the required amount of electricity.

- Relatively low electricity output. Wind generators are significantly inferior in electricity generation to diesel generators, which leads to the need to install several turbines at once. In addition,

wind turbines are inefficient during peak load periods.

- High cost. The cost of a 1 MW installation is \$1 million. Although it is clear that smaller installations cost less.

- Danger to wildlife. The rotating elements of the turbine pose a potential danger to some species of living organisms. According to statistics, the blades of each installed turbine are the cause of the death of at least four birds per year.

- Noise pollution. The noise from "windmills" can cause concern for both wildlife and people living nearby.

Currently, the Ukrainian agro-industrial complex uses very limited amounts of solar, wind, and biomass energy. The development of renewable energy is mainly hindered by:

- 1) insufficient scientific research on this topic,
- 2) lack of material and technical base,
- 3) organizational and managerial reasons.

The Verkhovna Rada of Ukraine adopted the Laws of Ukraine "On Energy Saving" (1994) and "On Alternative Energy Sources" (2003). However, they do not actually function due to the lack of development and implementation of the necessary by-laws, standards, regulations, etc.

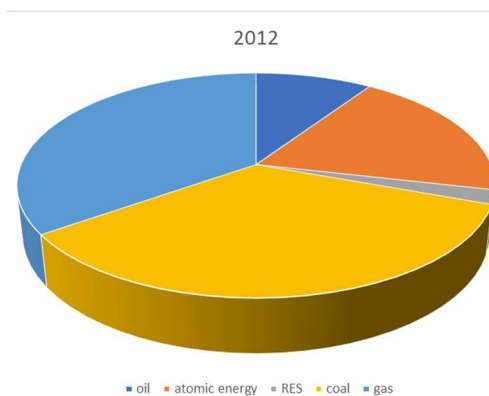


Fig. 1. Diagram of energy consumption in Ukraine in 2012

The share of non-traditional energy sources (RES) is less than 0.5% in the global energy balance, but a number of countries have achieved significant success in the use of non-traditional energy sources in the agro-industrial complex (AIC). Among the industrialized Western countries, it is necessary to note Germany (the leader in wind and solar energy), the USA (solar and wind energy), Japan, Belgium, France (solar energy), Denmark, Great Britain, the Netherlands (wind energy). Among the developing countries, it is necessary to mention China, Brazil, the Philippines, Cyprus and India. It is assumed that in 2025, RES will account

for 60% of all energy consumed on the planet. According to other sources, in the global energy balance in 2020, the share of RES may be from 5 to 10%.

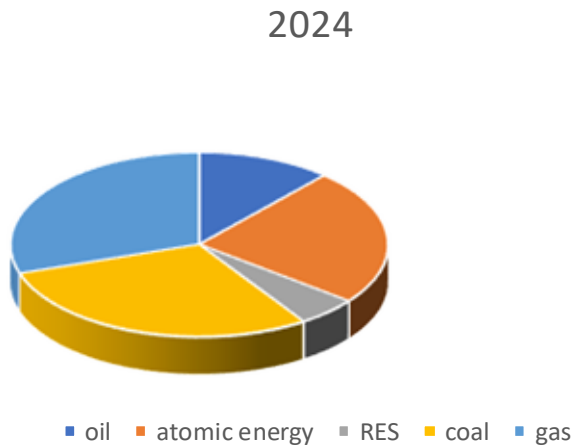


Fig. 2. Diagram of energy consumption in Ukraine in 2024

Conclusions. The purpose of the search for alternative energy sources is the need to obtain it from the energy of renewable or practically inexhaustible natural resources and phenomena, such as the sun and wind, which in turn will significantly improve the economic situation of the country, reduce the negative impact on the environment, and make private household owners more energy independent. Measures are being developed to support renewable energy sources: tax, credit and tariff benefits, legal support, and state development programs. Thus, in Germany, increased purchase prices have been established for electricity produced from non-traditional installations: 0.08 euros per 1 kWh for wind installations, 0.51 euros for solar installations. The state program “100,000 solar roofs” is being implemented, with a budget of 570 million euros, aimed at the use of solar energy. According to the forecast of the International Energy Congress, by 2020 the share of non-traditional energy sources in the total energy consumption of developed countries (USA, England, etc.) will reach 20%.

The main disadvantage of non-traditional energy sources is low energy density. Thus, for wind, solar, geothermal installations, the energy density is less than 1 kW/m², while in modern boilers and nuclear reactors a thousand times higher heat flux density is achieved. Accordingly, non-traditional energy installations have large dimensions, metal-intensive, and occupy much larger areas compared to operating thermal power plants, nuclear power plants, and boiler plants.

Література

1. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії: Підручник МОНМС України, Київ: НТУ України «КПІ, 2013. 492 с.
2. Дудюк Д. Л., Мазепа С. С., Гнатишин Я. М. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: навчальний посібник. Львів: Магнолія 2006, 2015. 188 с.
3. Закон України «Про енергозбереження» від 01 липня 1994 року (№74/94-ВР).
4. Закон України «Про альтернативні джерела енергії» від 20 лютого 2003 року (№ 555IV).
5. Енергетична стратегія України на період до 2030 року, затверджена Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 року №145-р.
6. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енерго-ефективність, конкурентоспроможність» : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. No 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text>.
7. Buckley C., Scott N., Snodin H., Gardner P. Review of Impacts of High Wind Penetration in Electricity Networks. Garrad Hassan Pacific Limited, 2005. 181 p.
8. Вороновський Г.К., Денисюк С.П., Кириленко О.В. Енергетика світу та України. Цифри та факти. Київ: Українські енциклопедичні знання, 2005. 404 с.
9. Dams and Development. A New Framework for Decision-Making. The report of the world commission on dams. London: Fartscan Publications Ltd, 2000.

References

1. Kudrja S. O. Netradycijni ta vidnovljuval'ni dzhherela energii': Pidruchnyk MONMS Ukraïny, Kyïv: NTU Ukraïny «KPI, 2013. 492 s.
2. Dudjuk D. L., Mazepa S. S., Gnatyshyn Ja. M. Netradycijna energetyka: osnovy teorii' ta zadachi: navchal'nyj posibnyk. L'viv: Magnolija 2006, 2015. 188 s.
3. Zakon Ukraïny «Pro energozberezhennja» vid 01 lypnja 1994 roku (№74/94-VR).
4. Zakon Ukraïny «Pro al'ternatyvni dzhherela energii'» vid 20 ljutogo 2003 roku (№ 555IV).
5. Energetychna strategija Ukraïny na period do 2030 roku, zatverdzhena Rozporjadzhennjam Kabinetu Ministriv Ukraïny vid 15 bereznja 2006 roku №145-r.
6. Pro shvalennja Energetychnoi' strategii' Ukraïny na period do 2035 roku «Bezpeka, energo-efektyvnist', konkurentospromozhnist'» : Rozporjadzhennja Kabinetu Ministriv Ukraïny vid 18 serpnja 2017 r.

No 605-r. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text>.

7. Buckley C., Scott N., Snodin H., Gardner P. Review of Impacts of High Wind Penetration in Electricity Networks. Garrad Hassan Pacific Limited, 2005. 181 p.
8. Voronovs'kyj G.K., Denysjuk S.P., Kyrylenko O.V. Energetyka svitu ta Ukrainy. Cyfry ta fakty. Kyi'v: Ukrain's'ki encyklopedychni znannja, 2005. 404 s.
9. Dams and Development. A New Framework for Decision-Making. The report of the world commission on dams. London: Fartscan Publications Ltd, 2000.

Брожко Р.М. Види і перспективи нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії в Україні

У цій роботі ми розглядаємо поточну світову енергетичну проблему, надаючи деяке уявлення про використання незвичайні, але відновлювані джерела енергії. Сучасна світова залежність від нафти ще породжує проблеми невідомі наслідки. Країни Латинської Америки та Карибського басейну не позбавлені цих проблем і однієї з них його основні наслідки: глобальне потепління. Досліджені тут джерела наразі можуть мати вплив на суспільства, і головним чином у промисловості, яка в середньому використовує приблизно 35% енергії країн в регіоні. З іншого боку, посухи є постійною загрозою для енергопостачання, починаючи з Латинської Америки країни Карибського басейну значною мірою залежать від дощів, які, у свою чергу, мають більший вплив на сільське господарство та водопостачання міст і для споживання людьми в цілому. У цій роботі ми обговорюємо доречний фон інформація про деякі незвичайні, але водночас відновлювані джерела енергії. Ми досліджуємо їх поточний і потенціал використання, експлуатаційні обмеження, переваги та недоліки, а також

потенційну потужність кожного джерела палива для отримання енергії генерація та економія палива. У кількісному розділі аналізується кількість потужності, яка є незвичайною відновлювані джерела енергії можуть забезпечити, відповідно до методів генерації. В окремому розділі розберемо потенційна економія палива завдяки прямому застосуванню в деяких галузях промисловості. Ми досліджуємо ці значення за допомогою кількох приклади та показати фінансовий аналіз вибраних проектів альтернативного палива. Нарешті, загальний аналіз представлено незвичайні альтернативні відновлювані джерела енергії та зроблено висновок про існування великого потенціалу для економії палива та витрат, а також для захисту навколишнього середовища. Альтернативна енергетика стає одним із базових напрямів розвитку нового постіндустріального технологічного укладу. Метою пошуку альтернативних джерел енергії є потреба отримувати її з енергії поновлюваних або практично невичерпних природних ресурсів і явищ, таких як сонце і вітер, що в свою чергу значно покращить економічний стан країни, зменшить негативний вплив на навколишнє середовище, зробить більш енергонезалежними власників приватних домогосподарств.

Ключові слова: альтернативна енергетика, нетрадиційна енергетика, відновлювані джерела енергії, зелена енергетика.

Брожко Ростислав Миколайович – к.т.н., доц., доцент кафедри електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ), brozhko@snu.edu.ua

Стаття подана 10.03.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-37-48>

УДК 621.3.082.62:629.1.04

АНАЛІЗ ПРИСТРОЮ ПЕЛЬТЬЄ З ЕПОКСИДНИМ КОМПАУНДОМ ДЛЯ СУДНОВИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ТА ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ

Кириченко О.С.

ANALYSIS OF THE PELTIER DEVICE WITH EPOXY COMPOUND FOR SHIP AUTOMATED COOLING AND THERMOSTABILIZATION SYSTEMS

Kyrychenko O.S.

У суднових автоматизованих системах охолодження та термостабілізації важливо забезпечити ефективний контроль теплових режимів в умовах підвищеної вологості та механічних навантажень. Через це в даних суднових системах використовуються пристрої Пельтьє на основі термоелектричних модулів, які є перспективними завдяки компактності, надійності та відсутності рухомих частин. Ефективність роботи зазначених пристроїв значною мірою залежить від їх конструктивних особливостей, вибору матеріалів і теплових характеристик. Дослідження спрямоване на аналіз впливу модифікованого епоксидного компаунду на експлуатаційні властивості пристроїв Пельтьє, що може забезпечити їхню довговічність і стабільність роботи в морських умовах.

Проведено аналіз електричних, теплових і механічних процесів у пристроях Пельтьє через систему диференціальних рівнянь у матричній формі. Для моделювання й оптимізації конструкції чисельно виконано розрахунок, що дозволив встановити розподіл температурних і механічних параметрів у матеріалах пристрою. Проаналізовано вплив епоксидного компаунду на ефективність відведення тепла, а також робочі характеристики розглянутого пристрою, включно з теплопередачею, структурною цілісністю і механічною стабільністю. Встановлено ефективність і доцільність використання пристроїв Пельтьє у суднових системах охолодження електронного обладнання, такого як радари, навігаційні прилади, блоки зв'язку та сервери управління судном, холодильних установках для медичних вантажів, термостабілізації оптичних систем і автономних енергетичних комплексах.

Розроблено мініатюрний пристрій Пельтьє ($8 \times 8 \times 3$ мм) з 21-ю термоелектричною парою. Використано структуру П-подібного ланцюга для рівномірного розподілу теплових навантажень. Розміри кожного напівпровідника було ретельно підбрано для забезпечення оптимального теплового режиму: при висоті 1,5 мм об'єм кожного напівпровідника складає 1 мм^3 . Тепловідведення з гарячої поверхні корпусу пристрою Пельтьє здійснено за рахунок вимушеної (примусової) конвекції з коефіцієнтом тепловіддачі $h = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ і теплового випромінювання $\epsilon_{\text{тв}} = 0,9$ для зменшення механічних напружень і збільшення терміну служби пристроїв у складних експлуатаційних умовах. Встановлено, що модифікований епоксидний компаунд з наповнювачем покращує робочі характеристики термоелектричних модулів у морських умовах. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення конструкцій термоелектричних модулів та розробки нових систем термостабілізації для водного транспорту.

Ключові слова: пристрій Пельтьє, термоелектричний ефект, епоксидний компаунд, напівпровідники, суднові системи охолодження, термостабілізація.

Вступ. Сучасні суднові автоматизовані системи охолодження та термостабілізації потребують високої ефективності, надійності та стійкості обладнання та його компонентів з урахуванням ймовірної роботи в жорстких і несприятливих експлуатаційних умовах. Тому в подібних системах використовують пристрої Пельтьє, що забезпечують достатню точність

контролю температури без рухомих частин та складних механічних контурів охолодження [1-3]. Однак ефективність і довговічність цих термоелектричних пристроїв значною мірою залежать від їхнього захисту від агресивних факторів морського середовища, таких як волога, соляний туман, перепади температур та механічні навантаження.

У цьому контексті застосування епоксидного компаунду як захисного покриття або заливного матеріалу для модулів Пельтьє стає пріоритетним рішенням. Епоксидний матеріал забезпечує високу герметичність і захист від корозії, запобігаючи деградації електричних з'єднань та втраті термоелектричних властивостей пристрою. Крім того, даний тип компаунду забезпечує ефективний розподіл механічних навантажень, а тому зменшує ризики утворення мікротріщин і пошкоджень через вплив вібрацій, які є неминучими в умовах експлуатації на судні [4]. Не зважаючи на ці переваги, використання епоксидного компаунду має і певні конкретні обмеження. Теплопровідність даного компаунду нижча у порівнянні з теплопереносом у металевими з'єднаннями, що відобразиться на загальній ефективності тепловідведення. Сучасні модифіковані компаунди, в які додають спеціальні термопровідні наповнювачі компенсують вказаний недолік та забезпечують оптимальний баланс між термостабільністю, механічною міцністю та довговічністю.

Пристрої Пельтьє з епоксидним компаундом знаходять широке застосування в суднових автоматизованих системах охолодження та термостабілізації, особливо у критично важливих компонентах електричного та електронного обладнання. Вони використовуються для підтримки стабільної температури в бортових комп'ютерних системах, навігаційних пристроях, серверних модулях та блоках зв'язку, запобігаючи їх перегріву під час тривалих рейсів. Також, такі модулі ефективні у системах охолодження датчиків і приладів, що працюють в умовах високої вологості та соляного туману, де традиційні охолоджувальні системи можуть виявитися ненадійними. Крім того, пристрої Пельтьє з епоксидним покриттям застосовуються у термоконтрольованих відсіках, зокрема в холодильних камерах для зберігання медикаментів або чутливих до температури матеріалів, забезпечуючи точний контроль і герметичний захист від впливу

підвищеної вологості та корозійних процесів на водному транспорті. Ще одним важливим напрямком їх використання є охолодження акумуляторних батарей, які піддаються значним температурним навантаженням під час роботи суднових енергосистем. Використання пристроїв Пельтьє дозволяє уникнути процесу перегрівання акумуляторів, продовжуючи їх термін служби та підвищуючи безпеку експлуатації, що є особливо важливим для суден з гібридними або електричними силовими установками.

Таким чином, дане дослідження щодо застосування пристроїв Пельтьє з модифікованим епоксидним компаундом для суднових систем охолодження є актуальним, оскільки воно направлене на підвищення ефективності та надійності автоматизованих систем температурного контролю на водному транспорті.

Метою роботи є дослідження ефективності використання пристрою Пельтьє з модифікованим епоксидним компаундом у суднових автоматизованих системах охолодження та термостабілізації, аналіз його характеристик.

Основний матеріал. Пристрої Пельтьє широко застосовуються у транспортній галузі на різних видах транспорту [5-8], зокрема як рекуператори [9-11] та термоелектричні джерела тепла й електроенергії для високопотужних транспортних засобів [12, 13]. Для комплексного аналізу складних фізичних процесів у пристроях Пельтьє з епоксидним компаундом, що використовуються в суднових автоматизованих системах охолодження та термостабілізації, необхідно врахувати їх електричні, теплові та механічні аспекти [1, 2]. Основне рівняння для електричного струму базується на законі Ома та законі збереження заряду:

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}; \nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (1)$$

де \mathbf{J} – вектор густини електричного струму, А/м²; γ – питома електропровідність, См/м; \mathbf{E} – вектор напруженості електричного поля, В/м.

Рівняння для теплопровідності з термоелектричними ефектами, що враховує ефект Джоуля, теплопровідності та зворотний ефект Пельтьє:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (I \mathbf{J}) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{J} \cdot \mathbf{E}, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); T – температура, К; P – коефіцієнт Пельтьє, В; ρ – густина матеріалу, кг/м³; c_p – питома теплоємність, Дж/(кг·К); $\frac{\partial T}{\partial t}$ – зміна температури з часом; $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ – джоулеве тепловиділення.

При зміні температури виникають термомеханічні напруження, що описуються рівнянням механічної рівноваги, де зв'язок напружень із деформаціями та температурою виражається законом Гука як скалярний добуток тензорів з урахуванням термічних деформацій:

$$\nabla \cdot \sigma + \mathbf{F} = 0; \sigma = C : (\varepsilon - \alpha_T \Delta T), \quad (3)$$

де σ – тензор механічних напружень, Па; $\nabla \cdot \sigma$ – дивергенція тензора напружень, Н/м³; C – тензор пружних констант, Па; ε – тензор деформацій; α_T – коефіцієнт теплового розширення, 1/К; ΔT – зміна температури, К; $\alpha \Delta T = \varepsilon_T$ – тензор термічних деформацій; \mathbf{F} – вектор масових сил, Н/м³.

Загальна система рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{J} = 0; \\ \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (P \mathbf{J}) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{J} \cdot \mathbf{E}; \\ \nabla \cdot \sigma + \mathbf{F} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Загальну системи рівнянь для електрики, тепла та механіки модуля можна представити у вигляді матричних рівнянь, які можна використати для чисельного розрахунку як пристроїв Пельтьє, так і іншого електрообладнання [14].

З виразів (1) після підстановки співвідношення для закону Ома у формулу закону збереження заряду

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla V) = 0 \quad (5)$$

отримується рівняння у матричній формі:

$$[K_v] \{V\} = \{0\}, \quad (6)$$

де $[K_v]$ – матриця електричної провідності; $\{V\}$ – вектор вузлових значень потенціалу; $\{0\}$ – граничні умови.

З рівняння для температури (2), що враховує теплопередачу з ефектом Пельтьє, Джоуля-Ленца та теплопровідністю знаходимо матричне рівняння:

$$[C_T] \frac{d\{T\}}{dt} + [K_T] \{T\} = \{Q_{\text{Джоуля}} + Q_{\text{Пельтьє}}\}, \quad (7)$$

де $[C_T]$ – матриця теплоємності; $[K_T]$ – матриця теплопровідності; $\{T\}$ – вектор вузлових температур; $\{Q_{\text{Джоуля}}\}$, $\{Q_{\text{Пельтьє}}\}$ – вектори відповідно джоулевого нагріву та нагріву на основі ефекту Пельтьє.

З рівняння для рівноваги з урахуванням закону Гука та термомеханічними ефектами (3) формується рівняння в матричній формі:

$$[K_M] \{u\} = \{F_T\}, \quad (8)$$

де $[K_M]$ – матриця жорсткості; $\{u\}$ – вектор вузлових переміщень; $\{F_T\}$ – вектор термічних навантажень.

Загальна система рівнянь у вигляді блочної матриці, що є об'єднанням трьох фізичних процесів у єдину матричну систему має вигляд:

$$\begin{bmatrix} K_v & 0 & 0 \\ 0 & C_T \frac{d}{dt} + K_T & 0 \\ 0 & 0 & K_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ T \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Q_{\text{Джоуля}} + Q_{\text{Пельтьє}} \\ F_T \end{bmatrix}.$$

Дана матрична система рівнянь включає ефект Пельтьє та записана в класичному вигляді. При роботі термоелектричних модулів у режимі активного охолодження потрібно врахувати, що тепловий потік $\nabla \cdot (P \mathbf{J})$ у рівнянні теплопередачі (2) може змінювати напрямом залежно від знаку « \pm » струму. Змінене теплове рівняння (7) з урахуванням напряму « \pm » струму

$$[C_T] \frac{d\{T\}}{dt} + [K_T] \{T\} = \{\pm Q_{\text{Пельтьє}}\} + \{Q_{\text{Джоуля}}\}, \quad (10)$$

формує наступну повну систему рівнянь:

$$\begin{bmatrix} K_v & 0 & 0 \\ 0 & C_T \frac{d}{dt} + K_T & 0 \\ 0 & 0 & K_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ T \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm Q_{\text{Пельтьє}} + Q_{\text{Джоуля}} \\ F_T \end{bmatrix}.$$

Дану матричну систему рівнянь можна розв'язувати чисельно, наприклад, методом скінченних елементів. При розрахунку пристроїв Пельтьє необхідно враховувати геометрію напівпровідників [15, 16], особливості 3D-моделювання [17] і специфіку деяких систем [18].

На плані розміщення 22 напівпровідникових елементів розміром

0,82×0,82 мм пристрою Пельтьє (рис. 1, а) відображена їх вертикальна симетрія у структурі з 4 рядків і 6 стовпців. Всі елементи інтегровані в ізоляційний корпус термоелектричного модуля, який має габарити 8×8 мм, що дозволяє віднести його до класу мініатюрних модулів. Завдяки компактним розмірам і малій масі, цей модуль придатний для використання в пристроях із обмеженим простором. Габарити напівпровідників були ретельно підібрані: при висоті 1,5 мм їх об'єм становить 1 мм³. Відстань від краю корпусу до найближчих напівпровідникових елементів дорівнює 0,44 мм по горизонталі та 0,94 мм по вертикалі. Аналогічні проміжки збережені між самими елементами: 0,44 мм у горизонтальному напрямку та 0,94 мм у вертикальному.

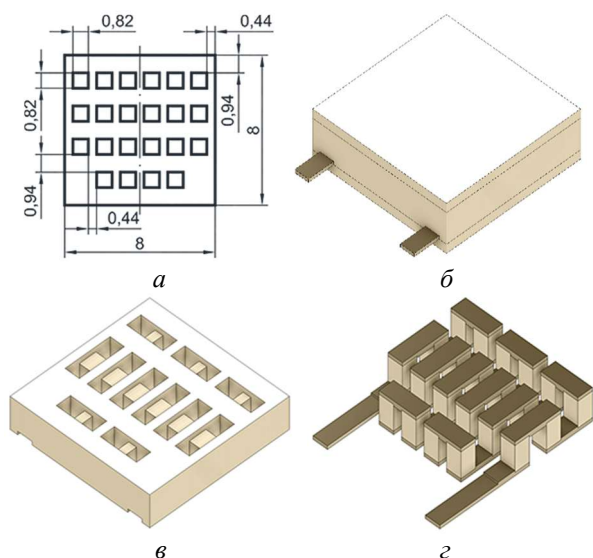


Рис. 1. Геометрія пристрою Пельтьє з епоксидним компаундом:

- а – габаритно-встановлювальне креслення пристрою; б – пристрій у зібраному вигляді; в – епоксидний компаунд; г – *P*-подібний термоелектричний ланцюг

Сконструйований термоелектричний модуль з габаритами 8×8×3 мм (категорії малих, мініатюрних модулів) включає 11 напівпровідників *P*-типу та 11 *N*-типу, а також 23 металеві контактні пластини. Це забезпечує формування ланцюга з 21-ї напівпровідникової термоелектричної пари. Габаритні параметри *P*-подібного ланцюга в складі модуля дорівнюють 6,11×7,12×1,9 мм. Вибір структури з'єднання у вигляді класичного *P*-подібного ланцюга був зумовлений низкою переваг: рівномірний розподіл тепла й електропровідність між елементами, ефективне відведення тепла завдяки оптимальному теплообміну між

контактними пластинами, а також мінімізація енергетичних втрат завдяки правильному напрямку електричного струму. При проектуванні конструкції, визначенні габаритних параметрів і кількості напівпровідникових елементів було взято за основу термоелектричний модуль TEC1-01102.

Кожен термоелектричний елемент складається з напівпровідникової *P-N*-термопари, що має геометрично однакові паралелепіпедні форми напівпровідників розмірами 0,82×0,82×1,5 мм. Поздовжні та поперечні контактні пластини, що використовуються для комутації, мають однакову товщину 0,2 мм і ширину 0,82 мм, але різняться за довжиною: 2,58 мм для поздовжніх та 2,08 мм для поперечних. У центрі кожної пластини знаходиться спеціальний виступ висотою 0,1 мм, з площею 0,94×0,82 мм для поздовжніх пластин та 0,44×0,82 мм для поперечних. Ці виступи сприяють поліпшеному з'єднанню напівпровідників модуля з металевими пластинами, забезпечуючи надійний контакт та рівномірний розподіл електричного струму. В якості матеріалу [19, 20] напівпровідників використано телурид вісмуту (Bi_2Te_3) [21-24], металеві контактні пластини виконано з міді (*Cu*). Корпус пристрою Пельтьє складається з двох керамічних пластин, виготовлених з оксиду алюмінію (Al_2O_3). Між пластинами корпусу розташовано заповнювач – епоксидний компаунд.

Епоксидні компаунди відіграють ключову роль у пристроях Пельтьє:

1. Ізоляція елементів. Створюють надійний електроізоляційний шар, запобігаючи коротким замиканням.
2. Механічна фіксація. Міцно з'єднують елементи модуля, забезпечуючи його стабільність.
3. Теплопередача. Підвищують ефективність охолодження, підтримуючи оптимальні умови по температурі.
4. Захист. Оберігають модуль від вологи, пилу та зовнішніх впливів, подовжуючи його ресурс.

Таким чином, епоксидні компаунди є важливими для забезпечення необхідних експлуатаційних режимів роботи пристроїв Пельтьє, покращуючи їх електричні, механічні та теплові характеристики, що впливає на підвищення надійності та довговічності [25]. Фізичні властивості епоксидних компаундів можна змінювати, додаючи до них наповнювачі,

наприклад, оксид алюмінію (Al_2O_3), нітрид бору (BN), діоксиду кремнію (SiO_2) тощо.

Розрахунок спроектованого пристрою Пельтьє з епоксидним компаундом для суднових автоматизованих систем охолодження та термостабілізації було проведено за допомогою чисельного методу скінченних елементів [26, 27]. Моделювання здійснювалось із урахуванням таких початкових параметрів і обраних граничних умов: для крайньої торцевої поверхні останньої контактної комутаційної пластини в термоелектричному ланцюзі було встановлено електрорпотенціал $\varphi_0=0$ В, температура холодних пластин складала $t_0=0$ °С; крайні торцеві поверхні першої та останньої контактної пластини вважалися нерухомо закріпленими; усі матеріали компонентів пристрою були ізотропними. Теплообмін з навколишнім середовищем здійснено за рахунок примусової (вимушеної) конвекції [28] і теплового випромінювання з гарячої керамічної пластини корпусу пристрою Пельтьє при коефіцієнті конвективної тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·К), температурі оточуючого середовища $t_{oc}=20$ °С, коефіцієнті випромінювання (емісії) $\varepsilon_{тв}=0,9$. Коефіцієнти Зеебека напівпровідників на основі телуриду вісмуту (Bi_2Te_3): $\alpha_p=2,0 \cdot 10^{-4}$ В/К, $\alpha_n=-2,0 \cdot 10^{-4}$ В/К. Питомі електричні опори для напівпровідників (Bi_2Te_3), контактних мідних Cu пластин, модифікованого епоксидного компаунду $(C_nH_mO_p)_x$ зі спеціальним наповнювачем для підвищення електричної ізоляції, керамічного корпусу (Al_2O_3-Cer) на основі оксиду алюмінію, відповідно: $\rho_p=\rho_n=1,0 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, $\rho_{Cu}=1,68 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $\rho_{comp}=1,0 \cdot 10^{15}$ Ом·м, $\rho_{Al_2O_3-Cer}=1,0 \cdot 10^{13}$ Ом·м; теплопровідності зазначених матеріалів відповідно: $k_p=k_n=1,5$ Вт/(м·К), $k_{Cu}=401$ Вт/(м·К), $k_{comp}=0,2$ Вт/(м·К), $k_{Al_2O_3-Cer}=30$ Вт/(м·К); модулі пружності відповідно: $E_p=E_n=4,5 \cdot 10^{10}$ Па, $E_{Cu}=1,1 \cdot 10^{11}$ Па, $E_{comp}=3,0 \cdot 10^9$ Па, $E_{Al_2O_3-Cer}=3,5 \cdot 10^{11}$ Па; коефіцієнти Пуассона відповідно: $\nu_p=\nu_n=0,3$, $\nu_{Cu}=0,34$, $\nu_{comp}=0,3$, $\nu_{Al_2O_3-Cer}=0,22$; коефіцієнти теплового розширення відповідно: $\alpha_{pT}=\alpha_{nT}=1,4 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹, $\alpha_{CuT}=1,65 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹, $\alpha_{comp}=4,0 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹, $\alpha_{Al_2O_3-Cer}=7,0 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹. При типовому підключенні (червоний «+», чорний «-») струм спершу проходить через напівпровідниковий матеріал P -типу в термоелектричному модулі.

Розрахунковим шляхом отримано функціональні залежності робочих характеристик пристрою Пельтьє для різних

значень сили струму. Для забезпечення повноти аналізу, також, представлено багатопараметричні поверхні відгуку, що просторово описують залежність параметрів від струму, що протікає через модуль.

Результати досліджень. Результати розрахунків представлено у вигляді графічних зображень розподілу температури (рис. 2), функціональних залежностей робочих величин (рис. 3) та поверхонь відгуку (рис. 4-5).

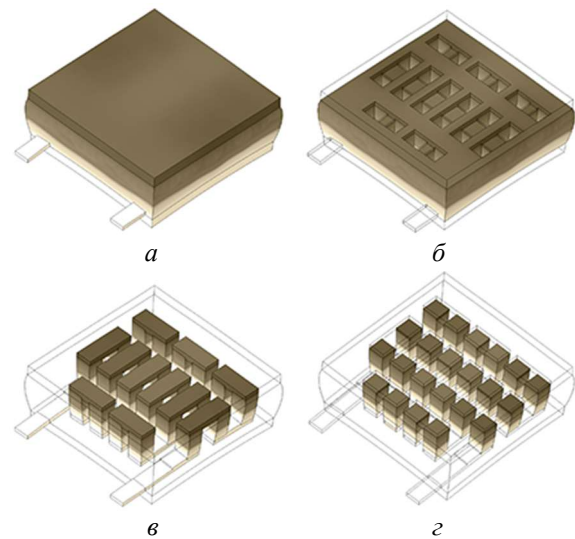


Рис. 2. Картини розподілу $t=f(I)$ стаціонарного теплового поля від 0 до 64,2 °С для пристрою Пельтьє при силі струму 1 А: а – пристрій у зборі; б – епоксидний компаунд; в – P -подібний термоелектричний ланцюг; з – $P-N$ -напівпровідники

Картини розподілу $t=f(I)$ стаціонарного теплового поля сконструйованого пристрою Пельтьє з різницею температур 64,2 °С між його гарячою і холодною сторонами при струмі $I=1$ А продемонстровано на рис. 2. Темні зони відповідають найбільшим значенням температури, тоді як сірі та світлі області відображають відповідно середні та мінімальні значення. Аналіз розподілу стаціонарного теплового поля вказує на те, що пристрій Пельтьє суднових автоматизованих систем охолодження та термостабілізації функціонує в умовах значних теплових навантажень.

Фактори, що впливають на теплове поле наступні:

– теплопровідність матеріалів (вища теплопровідність підкладки допомагає рівномірному розподілу тепла);

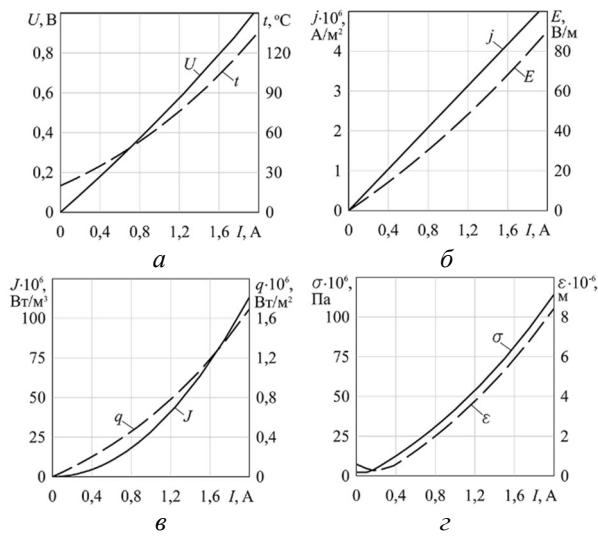


Рис. 3. Багатопараметричні графіки для напруги U термоелектричного ланцюга і температури t гарячої сторони пристрою Пельтьє (а), джоулевого нагріву J в напівпровідниках і густини теплового потоку q ланцюга (б), густини струму j в напівпровідниках і напруженості електричного поля ланцюга E (в), еквівалентного стресу σ і величини деформацій ε в напівпровідниках пристрою (г) в залежності від струму I

– сила струму (при її збільшенні зростає як ефект Пельтьє, так і джоулевий нагрів, що змінює температурний профіль);

– тепловий опір контактів (при поганому термічному контакті виникають локальні перегриви);

– конвекція та тепловідведення (ефективність радіатора чи водяного охолодження визначає стабільність температурного поля).

Стационарне теплове поле пристрою Пельтьє є важливим фактором його продуктивності. Правильна конструкція модуля, вибір матеріалів і системи охолодження забезпечують мінімізацію внутрішніх теплових втрат і підвищення ефективності охолодження або нагріву. Також, необхідно зменшувати термічні напруження до прийнятного рівня способами, розглянутими в [29, 30], а також за допомогою демпфування [31-34].

Залежності напруги U та температури t від сили струму I є нелінійними та поступово збільшуються через зміну внутрішнього опору, ефекти Пельтьє та Джоуля-Ленца, а також зворотню теплопередачу в пристрої Пельтьє. Для аналізованого інтервалу струму від 0 до 2 А напруга U (суцільна крива на рис. 3, а) є наближено лінійною. Температура t (пунктирна крива на рис. 3, б) між гарячою і холодною сторонами пристрою Пельтьє визначається

тепловим балансом між корисним ефектом охолодження (Пельтьє), ефектом Джоуля-Ленца (паразитним нагріванням), теплопровідністю матеріалів.

У напівпровідникових елементах пристрою Пельтьє густина струму визначається напруженістю електричного поля та електропровідністю матеріалу, яка залежить від концентрації й рухливості носіїв зарядів. Зміни температури значним чином впливають на електропровідність, оскільки при підвищенні температури зростає концентрація носіїв, що збільшує густина струму. Проте при надмірному нагріванні може зменшуватися їх рухливість і характер залежності при цьому зміниться. У реальних умовах, при великих струмах, проявляються нелінійні ефекти – перегрів через тепло Джоуля-Ленца та обмеження швидкості носіїв, що може впливати на стабільність роботи пристрою. Для досягнення максимальної ефективності пристрою Пельтьє необхідно контролювати напруженість електричного поля та густина струму, щоб уникати небажаного перегріву й підтримувати оптимальні електричні параметри. Залежності густини струму j та напруженості електричного поля E при малих струмах I є лінійними (суцільна та пунктирна криві рис. 2). При збільшених струмах ці залежності як для густини струму j , так і для напруженості E є нелінійними, але мають вигляд наближений до лінійних.

Ефект Джоуля-Ленца в термоелектричних модулях можна вважати небажаним побічним ефектом, оскільки він спричиняє зайві теплові втрати. Це тепло не бере участі в корисних процесах модуля – охолодженні чи генерації електроенергії – а лише зменшує його ефективність, підвищуючи температуру та обмежуючи продуктивність. Тепло Джоуля-Ленца ($J \sim I^2$) зростає квадратично зі струмом (суцільна крива на рис. 3, в), густина теплового потоку ($q \sim I^2$) теж залежить квадратично (пунктирна крива на рис. 3, в). Густина теплового потоку q в пристрої Пельтьє представляє собою кількість теплової енергії, що проходить через одиницю поверхні в одиницю часу. В пристрої Пельтьє вона відіграє важливу роль у процесах теплоперенесення та визначає ефективність охолодження або нагрівання. Густина теплового потоку q визначається взаємодією трьох ключових факторів: ефекту Пельтьє, втрат Джоуля-Ленца і теплопровідності матеріалу. Для досягнення максимальної ефективності роботи пристрою

Пельтьє необхідно досягти оптимального балансу між цими процесами. Висока густина теплового потоку не завжди є показником ефективної роботи – при надмірному струмі тепло Джоуля-Ленца починає переважати, що призводить до перегріву модуля та зниження його продуктивності. Оскільки ефект Пельтьє змінюється лінійно ($Q \sim I$) та при великих струмах є менш вагомим, то для мінімізації втрат потрібно підбирати оптимальний струм, при якому ефект Пельтьє переважає тепло Джоуля-Ленца. Також, оптимізація роботи пристрою Пельтьє передбачає використання матеріалів із низьким електричним опором, обмеженою теплопровідністю та ефективну організацію відведення тепла.

Збільшення сили струму I неминує викликає зростання як еквівалентного стресу σ (суцільна крива на рис. 3, з), так і механічних деформацій ε (пунктирна крива на рис. 3, з) у структурі матеріалів пристрою Пельтьє. При надмірно великих струмах утворюється додаткове температурне навантаження, яке з часом може стати причиною мікротріщин, роз'єднання структур та деградації контактів пристрою. Як наслідок, ефективність пристрою Пельтьє поступово може знижуватися, що може призвести до його передчасного виходу з ладу. Аналіз характеристик еквівалентного стресу σ і деформацій ε сприяє вибору оптимального струму для уникнення подібних експлуатаційних режимів.

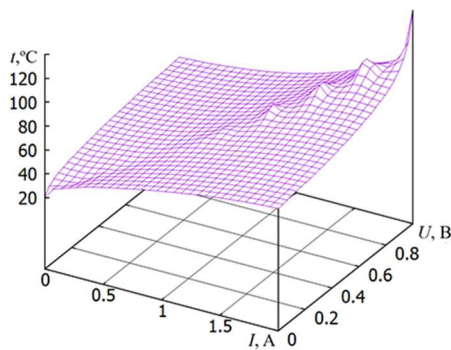


Рис. 4. Поверхня відгуку для напруги U та температури t пристрою Пельтьє з епоксидним компаундом в залежності від сили струму I в діапазоні від 0 до 2 А

Для більш точного аналізу пристрою Пельтьє з епоксидним компаундом для суднових автоматизованих систем охолодження та термостабілізації рекомендується використовувати як плоскі графіки, так і тривимірні поверхні відгуку (рис. 4-5).

На поверхнях відгуку можуть бути сплески, яких не видно на плоских графіках. Це може бути пов'язано з тим, що поверхні відгуку є тривимірними зображеннями, що можуть продемонструвати взаємозв'язки одразу між кількома змінними. Визначення конкретних причин сплесків на поверхнях відгуку потребує додаткового аналізу, що включає врахування додаткових параметрів системи, перевірку фізичних налаштувань і граничних умов, нелінійних ефектів.

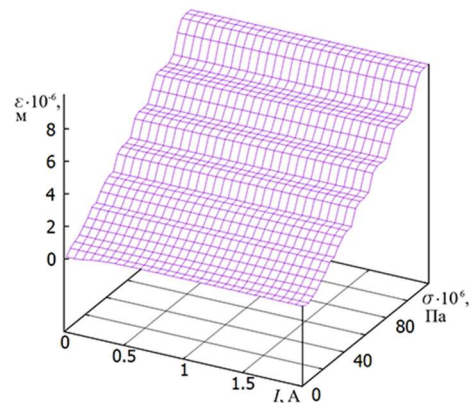


Рис. 5. Поверхня відгуку для еквівалентного стресу σ та деформацій ε пристрою Пельтьє з епоксидним компаундом в залежності від сили струму I в діапазоні від 0 до 2 А

Для отримання більш гладких поверхонь відгуку можна використати методи апроксимації. Дані методи дозволяють визначити наближену функцію, яка згладжує дані, мінімізує відхилення між реальною та наближеною функцією. Це допомагає згладити незначні коливання, роблячи поверхню більш рівною. Інтерполяція може бути, також, доречною, коли потрібно зберегти точність на заданих точках, але при цьому забезпечити плавний перехід між ними. Крім того, інколи необхідно використати комбіновані способи, при яких спочатку застосовується інтерполяція для отримання початкової поверхні, а вже потім апроксимація для її згладжування. Конкретний метод обробки поверхонь відгуку обирається в залежності від умов задачі, якості даних та бажаного результату.

Висновки. Проведений аналіз пристрою Пельтьє з модифікованим епоксидним компаундом для суднових автоматизованих систем охолодження та термостабілізації дозволив зробити наступні висновки:

1. Застосування модифікованого епоксидного компаунду з наповнювачем створює ефективний бар'єр від вологи, корозії

та механічних пошкоджень, що значно продовжує термін експлуатації пристрою Пельтьє.

2. Компаунд сприяє рівномірному розподілу температури по пристрою Пельтьє, запобігаючи локальному перегріву та підвищуючи стабільність роботи системи в умовах змінного навантаження при флуктуації тепловиділення.

3. Завдяки врахуванню розсіювання тепла з гарячої поверхні пристрою Пельтьє в режимі вимушеної (примусової) конвекції (за допомогою радіатора та вентилятора) і теплового випромінювання вдалося досягти кращої ефективності теплообміну, що сприяє економії електроенергії та підвищенню ККД системи.

4. Враховуючи специфіку роботи обладнання водного транспорту при високій вологості, вібраціях та обмеженому просторі, досліджений пристрій демонструє високу надійність і стійкість до екстремальних впливів.

Отримані результати підтверджують доцільність подальших досліджень та впровадження пристроїв Пельтьє з компаундами у системах автоматизованого керування температурним режимом суднового електричного та електронного обладнання.

Література

- Анатичук Л. І. Термоелектричні перетворювачі енергії. Термоелементи. Елементна база термоелектрики: монографія. Т. 2 / Л. І. Анатичук; ред. Л. М. Вихор, О. Я. Лусте. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2003. 376 с.
- Goldsmid H. Julian. Introduction to Thermoelectricity. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
- Анатичук Л. І., Вихор Л. М. Вплив електричних та теплових опорів контактів і комутацій на холодильний коефіцієнт термоелектричного модуля. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. №3. С. 19-33.
- Тимощук О. М., Шапран Ю. А. Аналіз методів та засобів нейтралізації вібрації суднового дизель-генератора. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ: ДУІТ, 2025. Вип. 1(42). С. 61-72. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.09>
- Дмитриченко М. Ф., Гутаревич Ю. Ф., Тріфонов Д. М., Сирота О. В. Застосування термоелектричних перетворювачів енергії для зменшення впливу природно-кліматичних факторів на технічну готовність транспортного засобу. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2020. №3. С. 58-69.
- Лобунець Ю. М. Оцінка характеристик ОТЕС з термоелектричними перетворювачами енергії. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2013. №1. С. 62-67.
- Анатичук Л. І., Прибила А. В., Кібак А. М. Термоелектричні кондиціонери для сидінь автотранспорту. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2020. №4. С. 90-104.
- Анатичук Л. І., Прибила А. В. Про ефективність термоелектричних кондиціонерів для транспортних засобів. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2019. №1. С. 86-96.
- Анатичук Л. І., Лисько В. В., Прибила А. В. Раціональні області використання термоелектричних рекуператорів тепла. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2022. №3-4. С. 44-69.
- Анатичук Л. І., Кузь Р. В. Про особливості розвитку робіт по створенню термоелектричних рекуператорів для транспортних засобів. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2019. №5. С. 45-67.
- Кузь Р. В. Теорія та проектування термоелектричних генераторів, що використовують відходи тепла на транспортних засобах. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2020. №2. С. 5-12.
- Анатичук Л. І., Гаврилюк М. В., Лисько В. В., Руснак О. С., Тінко Е. В. Стендові експериментальні дослідження термоелектричного джерела тепла та електрики для транспортних засобів великої потужності. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. №4. С. 41-49.
- Анатичук Л. І., Лисько В. В. Про можливості використання термоелектричних генераторів для транспортних передпускових нагрівачів великих потужностей. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2019. №3. С. 80-92.
- Тараненко С. В., Кириченко О. С., Колесник В. В., Костюченко В. І., Пріступа С. В., Пастух О. В., Голубєва С. М. Моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин суднових ГРЩ. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. – Київ: ДУІТ, 2021. Вип. 3 (34). С. 13-21.

15. **Кириченко О. С.** Порівняльний аналіз характеристик термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників для електрообладнання транспорту. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Київ: ТНУ ім. В. І. Вернадського, 2023. Т. 34(73), № 1. С. 256-263. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>
16. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph. / Hladyshch D., Hnat H. – etc. (International Science Group). Boston, USA: Primedia eLaunch, 2023. 464 p. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1>
17. Кириченко О. С. Критерії формування готовності до професійної діяльності інженерів на основі 3D-моделювання. *Освітлогічний дискурс: наукове електронне видання*. Київ: Київ. ун-т ім. Б. Грінченка, 2017. №3-4(18-19). С. 296-308. DOI: <https://doi.org/10.28925/2312-5829.2017.3-4.2938>
18. Кириченко О. С., Білюк І. С., Шарейко Д. Ю., Фоменко А. М., Гаврилов С. О., Бугрім Л. І. Чисельне тривимірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Київ: ТНУ ім. В. І. Вернадського, 2018. Т.29(68), Ч.1, №6. С.58-63.
19. Анагичук Л. І., Лисько В. В. Методика визначення термоелектричних параметрів матеріалів у складі термоелектричних модулів охолодження. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. №3. С. 73-85.
20. Анагичук Л. І., Гаврилук М. В., Лисько В. В. Обладнання для визначення параметрів термоелектричних модулів охолодження. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. №4. С. 58-68.
21. Лисько В. В., Тудорой П. Ф. Комп'ютерне моделювання процесу екструзії стрічкових термоелектричних матеріалів на основі Bi_2-Te_3 . *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України. 2019. №2. С. 61-69.
22. Рибчаков Д.Є. Комп'ютерне моделювання процесу екструзії термоелектричного матеріалу на основі Bi_2-Te_3 , прямокутної форми. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2020. №4. С. 14-22.
23. Рибчаков Д. Є., Сербин М. В. Комп'ютерний метод опису технологій та властивостей термоелектричних матеріалів на основі Bi_2-Te_3 , отриманих методом пресування. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. №4. С. 5-12.
24. Рибчаков Д. Є., Сербин М. В. Комп'ютерний метод опису технологій та властивостей термоелектричних матеріалів на основі Bi_2-Te_3 , отриманих методом Бріджмена. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. №3. С. 45-52.
25. Gubarevych O., Wierzbicki S., Melnyk O., Kyrychenko O., Riashchenko O. Increasing the accuracy of calculated indicators of operational reliability of industrial electric motors. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. Lublin, Poland: Polish Maintenance Society. 2025. Vol. 27, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein/203006>
26. Дубинець В. Г., Хільчевський В. В., Савченко О. В. Основи методу скінченних елементів. Чернівці: ЧДТУ, 2007. 288 с.
27. Oyman Serteller N. F. A basic introduction to Finite Element Methods for solving electrical problems. *Energy Education Science and Technology Part B: Social and Educational Studies*. Trabzon, Turkey: Sila Science, 2011. Vol. 3, No. 4. P. 487-496.
28. Кириченко О. С. Вплив режиму та способу конвекції на робочі характеристики сконструйованого термоелектричного модуля суднового електрообладнання. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ: ДУІТ, 2025. Вип. 2 (43). С. 5-19. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.01>
29. Тараненко С. В., Кириченко О. С., Пріступа С. В., Голубева С. М., Пастух О. В. Термоелектричні модулі з компенсованими комутаційними пластинами для пристроїв суднової енергетики. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ: ДУІТ, 2023. Вип. 1(37). С. 201-213. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.23>
30. Кириченко О. С. Термоелектричні модулі з різними способами контактного з'єднання напівпровідникових термоелементів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Київ: СНУ ім. В. Даля, 2023. № 1(277). С. 31–37. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-277-1-31-37>
31. Горський П. В. Демпфування термомеханічних напружень як засіб підвищення циклічної стійкості термоелектричних перетворювачів енергії. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2023. № 4. С. 17-26.

32. Анатичук Л. І., Балазюк В. М., Лусте О. Я., Малишко В. В. Про підвищення циклічної стійкості термоелектричних модулів охолодження. *Термоелектрика*. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2003. № 4. С. 71-75.
33. Тараненко С. В., Кириченко О. С., Пріступа С. В., Голубєва С. М. Демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання. *Водний транспорт: збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ: ДУІТ, 2024. Вип. 1(39). С. 69-82. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.07>
34. Kyrychenko O., Golubieva S., Morneva M. Modeling of thermoelectric modules with thermal stress damping for transport electrical equipment. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES, IEEE Scopus) (Kremenchuk, Ukraine)*. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2023. P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432>

References

1. Anatychuk L. I. Termoelektrychni peretvorjuvachi energiji. *Termoelementy*. Elementna baza termoelektryky: monografija. T. 2 / L. I. Anatychuk; red. L. M. Vykhor, O. Ja. Luste. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2003. 376 s.
2. Goldsmid H. Julian. *Introduction to Thermoelectricity*. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
3. Anatychuk L. I., Vykhor L. M. Vplyv elektrychnykh ta teplovykh oporiv kontaktiv i komutacij na kholodylnyj koeficijent termoelektrychnogho modulja. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2021. #3. S. 19-33.
4. Tymoshchuk O.M., Shapran Ju. A. Analiz metodiv ta zasobiv neitralizaciji vibraciji sudnovogho dyzelj-gheneratora. *Vodnyj transport: zbirnyk naukovykh pracj Derzhavnogho universytetu infrastruktury ta tekhnologij*. Kyjiv: DUIT, 2025. Vyp. 1(42). S. 61-72. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.09>
5. Dmytrychenko M. F., Ghutarevych Ju. F., Trifonov D. M., Syrota O. V. Zastosuvannja termoelektrychnykh peretvorjuvachiv energiji dlja zmeshennja vplyvu pryrodno-klimatychnykh faktoriv na tekhnichnu ghotovnistj transportnogho zasobu. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2020. #3. S. 58-69.
6. Lobunecj Ju. M. Ocinka kharakterystyk OTES z termoelektrychnymy peretvorjuvachamy energiji. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2013. #1. S. 62-67.
7. Anatychuk L. I., Prybyla A. V., Kibak A. M. Termoelektrychni kondycionery dlja sydinj avtotransportu. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2020. #4. S. 90-104.
8. Anatychuk L. I., Prybyla A. V. Pro efektyvnistj termoelektrychnykh kondycioneriv dlja transportnykh zasobiv. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2019. #1. S. 86-96.
9. Anatychuk L. I., Lysjko V. V., Prybyla A. V. Racionaljni oblasti vykorystannja termoelektrychnykh rekuperatoriv tepla. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2022. #3-4. S. 44-69.
10. Anatychuk L. I., Kuzj R. V. Pro osoblyvosti rozvytku robit po stvorennyu termoelektrychnykh rekuperatoriv dlja transportnykh zasobiv. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2019. #5. S. 45-67.
11. Kuzj R. V. Teorija ta proektuvannja termoelektrychnykh gheneratoriv, shho vykorystovujutj vidkhody tepla na transportnykh zasobakh. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2020. #2. S. 5-12.
12. Anatychuk L. I., Ghavryljuk M. V., Lysjko V. V., Rusnak O. S., Tinko E. V. Stendovi eksperymentaljni doslidzhennja termoelektrychnogho dzherela tepla ta elektryky dlja transportnykh zasobiv velykoji potuzhnosti. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2021. #4. S. 41-49.
13. Anatychuk L. I., Lysjko V. V. Pro mozhlyvosti vykorystannja termoelektrychnykh gheneratoriv dlja transportnykh peredpuskovykh naghriwachiv velykykh potuzhnostej. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2019. #3. S. 80-92.
14. Taranenko S. V., Kyrychenko O. S., Kolesnyk V. V., Kostjuchenko V. I., Pristupa S. V., Pastukh O. V., Golubieva S. M. Modeljuvannja stacionarnogho teplovogho polja strumoprovodnykh shyn sudnovykh GhRShh. *Vodnyj transport: zbirnyk naukovykh pracj Derzhavnogho universytetu infrastruktury ta tekhnologij*. – Kyjiv: DUIT, 2021. Vyp. 3 (34). S. 13-21.
15. Kyrychenko O. S. Porivnjalnij analiz kharakterystyk termoelektrychnykh moduliv z riznymy gheometrychnymy formamy napivprovodnykiv dlja elektroobladnannja transportu. *Vcheni zapysky Tavrijskoghho nacionaljnogho universytetu imeni V. I. Vernadsjkoghho*. Serija: *Tekhnichni nauky*. Kyjiv: TNU im. V. I. Vernadsjkoghho, 2023. T. 34(73), # 1.

- S. 256-263. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>
16. Prospective directions of scientific research in engineering and agriculture: collective monograph. / Hladyshev D., Hnat H. – etc. (International Science Group). Boston, USA: Primedia eLaunch, 2023. 464 p. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.1>
 17. Kyrychenko O. S. Kryteriji formuvannja ghotovnosti do profesijnoji dijalnosti inzheneriv na osnovi 3D-modeljuvannja. *Osvitologhichnyj dyskurs: naukove elektronne vydannja*. Kyjiv: Kyjiv. un-t im. B. Ghrinchenka, 2017. #3-4(18-19). S. 296-308. DOI: <https://doi.org/10.28925/2312-5829.2017.3-4.2938>
 18. Kyrychenko O. S., Biliuk I. S., Sharejko D. Ju., Fomenko A. M., Ghavrylov S. O., Bughrim L. I. Chyseljne tryvymirne modeljuvannja termoelektrychnogho okholodzhuvacha vymirjuvaljnogho elektroustatkuvannja avtomatychnykh system. *Vcheni zapysky Tavrijskoghho nacionaljnogho universytetu imeni V. I. Vernadsjkoghho. Serija: Tekhnichni nauky*. Kyjiv: TNU im. V. I. Vernadsjkoghho, 2018. T.29(68), Ch.1, #6. S.58-63.
 19. Anatyshuk L. I., Lysjko V. V. Metodyka vyznachennja termoelektrychnykh parametriv materialiv u skladi termoelektrychnykh moduliv okholodzhennja. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2021. #3. S. 73-85.
 20. Anatyshuk L. I., Ghavryljuk M. V., Lysjko V. V. Obladnannja dlja vyznachennja parametriv termoelektrychnykh moduliv okholodzhennja. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2021. #4. S. 58-68.
 21. Lysjko V. V., Tudoroj P. F. Komp'juterne modeljuvannja procesu ekstruziji strichkovykh termoelektrychnykh materialiv na osnovi Bi_2-Te_3 . *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2019. #2. S. 61-69.
 22. Rybchakov D. Je. Komp'juterne modeljuvannja procesu ekstruziji termoelektrychnogho materialu na osnovi Bi_2-Te_3 , prjamokutnoji formy. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2020. #4. S. 14-22.
 23. Rybchakov D. Je., Serbyn M. V. Komp'juternyj metod opysu tekhnologhij ta vlastyvostej termoelektrychnykh materialiv na osnovi Bi_2-Te_3 , otrymanykh metodom presuvannja. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2021. #4. S. 5-12.
 24. Rybchakov D. Je., Serbyn M. V. Komp'juternyj metod opysu tekhnologhij ta vlastyvostej termoelektrychnykh materialiv na osnovi Bi_2-Te_3 , otrymanykh metodom Bridzhmena. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2021. #3. S. 45-52.
 25. Gubarevych O., Wierzbicki S., Melnyk O., Kyrychenko O., Riashchenko O. Increasing the accuracy of calculated indicators of operational reliability of industrial electric motors. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. Lublin, Poland: Polish Maintenance Society, 2025. Vol. 27, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein/203006>
 26. Dubynecj V. Gh., Khiljevsjkyj V. V., Savchenko O. V. Osnovy metodu skinchennykh elementiv. Chernighiv: ChDTU, 2007. 288 s.
 27. Oyman Serteller N. F. A basic introduction to Finite Element Methods for solving electrical problems. *Energy Education Science and Technology Part B: Social and Educational Studies*. Trabzon, Turkey: Sila Science, 2011. Vol. 3, No. 4. P. 487-496.
 28. Kyrychenko O. S. Vplyv rezhymu ta sposobu konvekcyj na robochi kharakterystyky skonstrujovanogho termoelektrychnogho modulja sudnovogho elektroobladnannja. *Vodnyj transport: zbirnyk naukovykh pracj Derzhavnogho universytetu infrastruktury ta tekhnologhij*. Kyjiv: DUIT, 2025. Vyp. 2 (43). S. 5-19. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.01>
 29. Taranenکو S. V., Kyrychenko O. S., Pristupa S. V., Golubieva S. M., Pastukh O. V. Termoelektrychni moduli z kompensovanymy komutacijnymy plastynamy dlja prystrojiv sudnovoji energhetiky. *Vodnyj transport: zbirnyk naukovykh pracj Derzhavnogho universytetu infrastruktury ta tekhnologhij*. Kyjiv: DUIT, 2023. Vyp. 1(37). S. 201-213. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.23>
 30. Kyrychenko O. S. Termoelektrychni moduli z riznymy sposobamy kontaktynogho z'jednannja napivprovodnykovykh termoelementiv. *Visnyk Skhidnoukrajinsjkoghho nacionaljnogho universytetu imeni Volodymyra Dalja*. Kyjiv: SNU im. V. Dalja, 2023. # 1(277). S. 31-37. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-277-1-31-37>
 31. Ghorsjkyj P. V. Dempfuvannja termomekhanichnykh napruzhenj jak zasib pidvyshhennja cyklichnoji stijkosti termoelektrychnykh peretvorjuvachiv energhiji. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2023. # 4. S. 17-26.
 32. Anatyshuk L. I., Balazjuk V. M., Luste O. Ja., Malysko V. V. Pro pidvyshhennja cyklichnoji stijkosti termoelektrychnykh moduliv okholodzhennja. *Termoelektryka*. Chernivci: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy, 2003. # 4. S. 71-75.
 33. Taranenکو S. V., Kyrychenko O. S., Pristupa S. V., Golubieva S. M. Dempfuvannja termichnykh napruzhenj v termoelektrychnykh moduljakh

sudnovogho elektroobladnannja. *Vodnyj transport: zbirnyk naukovykh pracj Derzhavnogho universytetu infrastruktury ta tekhnologhij*. Kyjiv: DUIT, 2024. Vyp. 1(39). S. 69-82. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.07>

34. Kyrychenko O., Golubieva S., Morneva M. Modeling of thermoelectric modules with thermal stress damping for transport electrical equipment. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES, IEEE Scopus) (Kremenchuk, Ukraine)*. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE, 2023. P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432>

Kyrychenko O.S. Analysis of the Peltier Device with Epoxy Compound for Ship Automated Cooling and Thermostabilization Systems

In ship automated cooling and thermal stabilization systems, it is important to ensure effective control of thermal regimes in conditions of high humidity and mechanical loads. Because of this, Peltier devices based on thermoelectric modules are used in these ship systems, which are promising due to their compactness, reliability and the absence of moving parts. The efficiency of the said devices depends to a large extent on their design features, choice of materials and thermal characteristics. The study is aimed at analyzing the influence of the modified epoxy compound on the operational properties of Peltier devices, which can ensure their durability and stability of operation in marine conditions.

The analysis of electrical, thermal and mechanical processes in Peltier devices was carried out through a system of differential equations in matrix form. To model and optimize the design, a numerical calculation was performed to determine the distribution of temperature and mechanical parameters in the materials of the device. The effect of epoxy compound on the heat dissipation efficiency and the performance of the device

under consideration, including heat transfer, structural integrity, and mechanical stability, is analysed. The effectiveness and feasibility of using Peltier devices in ship cooling systems for electronic equipment, such as radars, navigation devices, communication units and ship control servers, refrigeration units for medical cargo, thermal stabilization of optical systems and autonomous energy complexes were established.

The miniature Peltier device (8×8×3 mm) with 21 thermoelectric pairs was developed. The U-shaped circuit structure was used to evenly distribute thermal loads. The dimensions of each semiconductor were carefully selected to ensure optimal thermal conditions: at a height of 1.5 mm, the volume of each semiconductor is 1 mm³. Heat removal from the hot surface of the Peltier device case was carried out by forced (forced) convection with a heat transfer coefficient $h=50 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ and thermal radiation $\varepsilon_r=0.9$ to reduce mechanical stresses and increase the service life of the devices in difficult operating conditions. It was found that a modified epoxy compound with a filler improves the operating characteristics of thermoelectric modules in marine conditions. The results obtained can be used to improve the designs of thermoelectric modules and develop new thermal stabilization systems for water transport.

Keywords: *Peltier device, thermoelectric effect, epoxy compound, semiconductors, ship cooling systems, thermal stabilization.*

Кириченко О.С. – к.т.н., доцент, доцент кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, Національний транспортний університет, м. Київ, oskyrychenko@gmail.com

Стаття подана 07.03.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-49-55>

УДК 621.311.24+621.313.332

ОЦІНЮВАННЯ МАСИ ОСНОВНОГО ОБЛАДНАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ НА БАЗІ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ФАЗНИМ РОТОРОМ

Стрункін Г.М.

EVALUATION OF THE MASS OF THE MAIN EQUIPMENT OF A WIND POWER PLANT WITH AERODYNAMIC MULTIPLICATION BASED ON AN ASYNCHRONOUS GENERATOR WITH A PHASE ROTOR

Strunkin H.M.

У статті вказано відомості про національні плани України щодо розвитку енергетики та вітроенергетики до 2030 року. Наводяться історичні відомості про дослідження вітроенергетичних установок з аеродинамічним мультиплікуванням. Подано аналітичний огляд новітніх досліджень вітроенергетичних установок з аеродинамічним мультиплікуванням, започаткованих українськими вченими. Вказано про перспективність використання електрообладнання таких установок на базі асинхронного генератора з фазним ротором та перетворювачем частоти на потужність ковзання, що мають кращі масогабаритні показники. Наведено відомості про роботу вітроенергетичних установок з аеродинамічним мультиплікуванням. Описано структурну схему електрообладнання для керування потужністю асинхронного генератора з фазним ротором та наведено короткі відомості про її функціонування. З використанням перетворювача частоти можливо відмовитися від регулювання кута встановлення лопатей первинної вітротурбіни. Існуючий ринок асинхронних машин з фазним ротором обмежено крановими двигунами, які мають великий струм намагнічування та працюють у повторно-короткочасному режимі. Знизити струм намагнічування можливо зменшенням напруги статора двигуна, що, з іншого боку, приводить до підвищення струму ротора. В попередніх публікаціях проведена оптимізація напруги статора, при якій струм ротора не перевищує номінальне значення у тривалому режимі. Для узгодження оптимального значення напруги статора генератора з номінальною напругою навантаження необхідне встановлення вольтододавального автотрансформатора. Проведено розрахунки

сумарної маси трьох асинхронних генераторів з фазним ротором та вольтододавального автотрансформатора для всієї серії кранових двигунів при використанні їх в вітроенергетичних установках з аеродинамічним мультиплікуванням. Порівняння загальної маси електрообладнання на базі асинхронного генератора з фазним ротором з масою синхронних генераторів, які використовувалися до сьогодні, показали їх перевагу. При використанні серійних асинхронних машин вдається покращити масу обладнання, що розташовано на лопатях первинної вітротурбіни, майже в 2 рази.

Ключові слова: асинхронний генератор з фазним ротором, вітроенергетична установка, аеродинамічне мультиплікування, крановий двигун у генераторному режимі, тривала робота, вольтододавальний автотрансформатор, маса обладнання.

Вступ. Вітроенергетика України займає в ухваленому 13.08.2024р. Кабінетом міністрів України розпорядженні про затвердження «Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року» [1] найвищій пріоритет. Додатково, згідно із ухваленим 25.06.2024р. Кабінетом міністрів України «Національним планом з енергетики та клімату на період до 2030р.» частка енергії відновлювальних джерел к 2030р. повинна становити 27% [2]. Означені національні плани підкреслюють важливість досліджень та

впровадження нових типів вітроенергетичних установок (ВЕУ).

Історично на теренах України вперше було запропоновано та побудовано новий тип ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням (АДМ), які дозволяють відмовитися від використання механічного редуктора. Користуючись теоретичними напрацюваннями Уфимцева А.Г. [3], Красовський Н.В. побудував першу в світі установку, в якій для узгодження обертового руху вітротурбіни та генератора використовувалося розміщення маленьких вітротурбін на лопатях великої [4]. На той час рівень техніки не дозволяв виготовляти лопаті великої міцності, тому ідея на довгий час була забута. Крім поодиноких патентів у Німеччині та США, ідея не знаходила використання. Але 2002р. командою Голубенка М.С. (фірма «Конкорд», Дніпро) було запатентовано [5], спроектовано та побудовано дослідний зразок ВЕУ з АДМ ТГ-750 потужністю 750 кВт [6].

Відтоді почалися теоретичні дослідження вітроенергетичних установок цього типу. В сьогоденні основна частина досліджень досі виконується в Україні: Голубенком М.С. було розроблено більш потужні установки [7]; Миргородом В.Ф. та Алексієвським Д.Г. [8, 9] – започатковано та розвинуто створення математичних моделей ВЕУ з АДМ; Андрієнком П.Д. започатковано новий напрямок керування потужністю таких установок за допомогою перетворювачей частоти [10, 11]; автором у попередніх публікаціях [12, 13] започатковано вивчення поведінки ВЕУ з АДМ у автономних режимах. З інших країн треба зазначити роботи команди Morgan L. (Глазго, Велика Британія) по застосуванню аеродинамічного мультиплікування в офшорній енергетиці [14, 15].

Перспективним є використання в ВЕУ з АДМ асинхронного генератора з фазним ротором (АГФР) через добрі масогабаритні показники та меншу потужність необхідного перетворювача частоти для його керування [16, 17]. Зважаючи на те, що в ВЕУ з АДМ використовуються 3 або більше машини одночасно, залишається неосвітленим питання маси основного обладнання таких систем.

Метою роботи є аналіз основного обладнання вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням за масою, враховуючи оптимальне значення напруги статора асинхронного генератора з фазним ротором.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вітротурбіна з АДМ являє собою великий вітровий ротор 1 (первинна вітротурбіна), на лопатях якого розміщено гондולי 2 з розташованими в них генераторами (рис. 1). На вісях генераторів закріплено маленькі швидкохідні вторинні вітротурбіни 3.

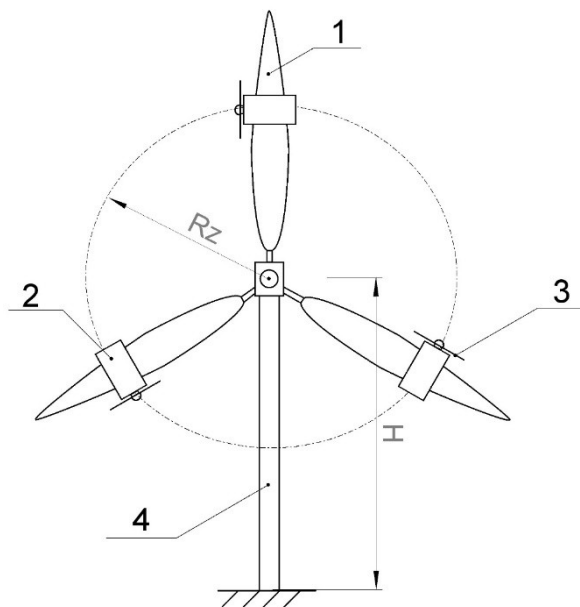


Рис. 1. Схема вітротурбіни з АДМ

Первинна вітротурбіна не має свого генератора, а закріплена своєю віссю на опорі 4. Під дією вітру (первинного вітрового потоку) первинна вітротурбіна обертається та створює для гондоль з вторинною вітротурбіною вторинний вітровий потік, який пропорційний радіусу її закріплення Rz . Таким чином, при швидкості обертання первинної вітротурбіни 16 об/хв ($1,68 \text{ рад}^{-1}$), та $Rz=13 \text{ м}$, вторинний вітровий потік становитиме $1,68 \times 13 = 21 \text{ м/с}$. Завдяки цьому вторинна вітротурбіна може бути маленькою та обертатися зі швидкістю 400-600 об/хв і вище, що задовольнятиме вимогам для відмови від механічного мультиплікатора. Таким чином, використання більш складної вітротурбіни дозволяє підвищити обороти на валу генераторів без наявності механічного мультиплікатора. Такий метод називають аеродинамічним мультиплікуванням [18].

Більшість вищеперерахованих дослідників концентрували свої зусилля по вивченню поведінки ВЕУ з АДМ у сполученні з синхронним генератором. Це й не дивно, враховуючи, що такий тип електричної машини дозволяє обійтися без перетворювача частоти, а керування потужністю здійснювати зміною кута

встановлення лопаті первинної вітротурбіни. В дослідженнях Андрієнка П.Д. використано перетворювач на повну потужність для збільшення діапазону робочих швидкостей вітру. Але відомо [16, 17], що асинхронні машини мають найкращі показники за масогабаритними показниками. У зв'язку з цим автором у якості автономних ВЕУ з АДМ запропоновано побудову вітроенергетичної установки на базі асинхронного генератора з фазним ротором (АГФР), структурна схема якої зображена на рис. 2 [19].

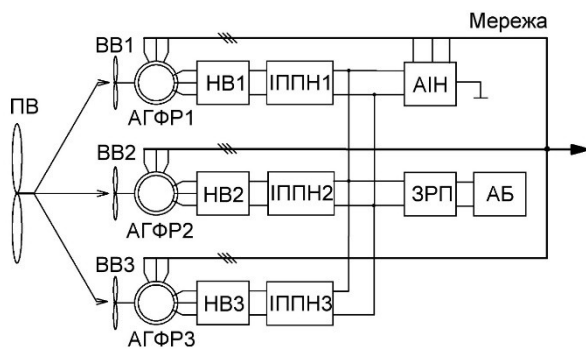


Рис. 2. Схема автономної ВЕУ з АДМ на базі АГФР

На рис. 2 прийнято наступні позначення: ПВ – первинна вітротурбіна; ВВ1...ВВ3 – вторинні вітротурбіни; АГФР1...АГФР3 – асинхронні генератори з фазним ротором, на вісі яких знаходяться вторинні вітротурбіни; НВ1...НВ3 – некервані випрямлячі в роторних ланцюгах генераторів; ІППН1...ІППН3 – імпульсні перетворювачі постійної напруги; АІН – автономний інвертор напруги з нульовим проводом; ЗРП – зарядно-розрядний пристрій; АБ – акумуляторна батарея.

Регулювання потужності ВЕУ здійснюється шляхом зміни проти-ЕРС ІППН. Напруга в ланцюгу постійного струму стабілізується зарядно-розрядним пристроєм. Інвертор напруги формує напругу та компенсує реактивну потужність генератора. Через те, що в автономній системі навантаження по фазам може бути суттєво несиметричним, інвертор виконано по чотирьохпроводній схемі. Через це зручно при аналізі та розрахунку системи використовувати фазні значення напруги інвертора та генератора. Акумуляторна батарея необхідна для підтримання балансу потужності при недостатній генерації, або при малому навантаженні. Використання первинної вітротурбіни з незмінним кутом встановлення

лопатею та перетворювача частоти на потужність ковзання призводить до покращення масогабаритних показників та надійності всієї системи.

Асортимент асинхронних машин з фазним ротором в діапазоні потужностей 1-160 кВт вичерпується крановими двигунами [20]. Роботу кранового двигуна в генераторному режимі досліджено в роботах [21, 22], де проведено оптимізацію статорної напруги. Особливістю кранових асинхронних двигунів з фазним ротором є великий струм намагнічування та їх робота у повторно-короткочасному режимі з ПВ=40%. Як показано в [22], для їх роботи у тривалому генераторному режимі потрібно знизити напругу статора, що призведе до перерозподілу активної складової струму статора. З іншого боку, при зниженні напруги статора підвищується значення струму ротора. В [22] було оптимізовано значення статорної напруги, при якій струм ротора не перевищував номінального. Для кранових асинхронних двигунів серій МТН і МТФ фазне значення напруги склало 192 В. При цьому потужність, що генерується, для цих двигунів за значенням була вищою, ніж у режимі двигуна.

Для узгодження напруги на статорі U_1 з номінальною напругою навантаження $U_{1ном}$ 220 В можна використовувати вольтододавальний автотрансформатор, встановлена потужність якого пропорційна відхиленню напруги на статорі від його номінального значення та струму навантаження I_H :

$$S_T = 3 \cdot (U_{1ном} - U_1) I_H \cdot$$

Вважаючи, що в ВЕУ з АДМ 3 генератори, режим яких приблизно однаковий, а збудження здійснюється від одного інвертора, зручно використовувати один вольтододавальний автотрансформатор.

Зважаючи на потребу встановлення додаткового пристрою, цікавим є оцінювання загальної маси основного обладнання ВЕУ – трьох генераторів та автотрансформатора на потрібну відносно (1) потужність.

Маси генераторів взято з довідника [23], а для оцінювання маси автотрансформатора можна скористуватися довідковими даними заводу-виготівителя [24] для трансформаторів типового ряду. Результати розрахунків зведено до Таблиці.

Таблиця

Результати розрахунку маси електрообладнання ВЕУ з АДМ

Рдв, кВт	Рген, кВт	Ртр, кВА	Ртр сум, кВА	Рсерійн.тр, кВА	Мтр, кг	Мдв, кг	Мдв сум., кг	Мсумм, кг
1,4	2,24	0,285	0,855	1	11,5	51	153	164,5
2,2	3,52	0,448	1,344	1,6	28,3	58	174	202,3
3,5	5,6	0,712	2,138	2,5	41	76	228	269
5	8	1,018	3,054	4	47	88	264	311
7,5	12	1,527	4,581	6,3	75	120	360	435
11	17,6	2,24	6,72	7,5	80	170	510	590
16	25,6	3,258	9,774	10	95	210	630	725
22	35,2	4,48	13,44	14	120	280	840	960
30	48	6,109	18,327	25	165	345	1035	1200
30	48	6,109	18,327	25	165	460	1380	1545
40	64	8,145	24,436	25	165	560	1680	1845
45	72	9,163	27,49	32	182	860	2580	2762
60	96	12,218	36,654	40	215	10120	30360	30575
80	128	16,29	48,872	63	310	1180	3540	3850
100	160	20,363	61,09	63	310	1550	4650	4960
125	200	25,454	76,363	80	410	1700	5100	5510
160	256	32,581	97,745	100	500	1900	5700	6200

В таблиці прийнято позначення: Рдв – потужність серійного двигуна, Рген – потужність серійного двигуна у генераторному режимі; Ртр – необхідна потужність вольтододавального автотрансформатора при оптимальній напрузі статора двигуна; Ртр сум – сумарна потужність автотрансформатора для трьох двигунів; Рсерійн.тр. – потужність серійного трансформатора зі стандартного ряду; Мтр – маса серійного трансформатора; Мдв – маса двигуна; Мдв. сум. – маса трьох двигунів; Мсум. – сумарна маса електрообладнання.

Таким чином, отримано значення маси обладнання при використанні існуючої серії кранових двигунів у якості генераторів для ВЕУ з АДМ.

Порівнюючи АГФР МТН-713-10, який здатен віддати 256 кВт та має масу 1900 кг з встановленим на ТГ-750 індукторним синхронним генератором СГІ-250-16 УХЛ1 потужністю 250 кВт та масою 3550 кг [25], можна зазначити суттєвий виграв за масою трьох двигунів МТН-713-10 навіть з встановленням вольтододавального автотрансформатору 100 кВА з масою 500 кг. Повна маса електрообладнання при використанні АГФР становитиме 6200 кг, в той

час, як маса трьох синхронних генераторів складає 10650 кг. Безпосередньо на лопатях первинної вітротурбіни необхідно встановити лише асинхронні генератори масою 5700 кг, а автотрансформатор може бути винесено в контейнер ВЕУ. Тобто маса генераторів при використанні АГФР зменшується майже вдвічі.

Висновки. Розрахунки маси основного обладнання ВЕУ з АДМ підтвердили перспективність застосування асинхронного генератора з фазним ротором. Зважаючи на відсутність спеціалізованих асинхронних генераторів середньої потужності, використання кранових електродвигунів виявляється цілком доречним при умові зменшення їх статорної напруги. Для узгодження напруги статора АГФР з номінальним значенням напруги навантаження можливе використання вольтододавального автотрансформатора. Розраховано масу обладнання для існуючої серії кранових двигунів при використанні їх у якості генератора для ВЕУ з АДМ. Порівняння за масою асинхронного генератора з фазним ротором і автотрансформатором з існуючим типом синхронного генератора підтверджує кращі показники ВЕУ на базі АГФР.

Література

1. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#n12>. (Дата звернення 18.03.2025).
2. Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року. URL: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=17f558a7-b4b4-42ca-b662-2811f42d4a33&title=NatsionalniiPlanZEnergetikiTaKlimatuNaPeriodDo2030-Roku> (дата звернення 17.03.2025).
3. Патент СССР №1457, Класс 88-с. Ветроэлектрический генератор / А.Г. Уфимцев. заявл. 14.01.1924; опубл. 31.07.1926.
4. Красовский Н.В. Схема ветряного двигателя с аэродинамической передачей для мощностей 100-3.000 кв / Н.В. Красовский // Известия ОГИН. Москва. Ан СССР. 1939. №5: 15.
5. Патент на винахід UA49970, МПК F03D 1/00. Вітродвигун / М.С. Голубенко, О.Л. Кацацький, В.С. Легеза, В.О. Циганов, С.І. Лось, Г.В. Гальмаков; заявник і патентовласник Державне конструкторське бюро 255 «Південне» ім. М.К. Янгеля. № 2000031794, заявл. 30.03.2002; опубл. 15.10.2002, Бюл. № 10.
6. Голубенко Н.С. Ветровая электрическая турбогенера-торная установка ТГ-750 / Н.С. Голубенко, В.Е. Олишевская, С.Д. Курдюков, Г.С. Олишевский, С.С. Курдюков // Наука та інновації. 2008. 4, №6: 71-77. 10.15407/scin.4.06.071.
7. Голубенко Н.С. Тенденции развития ветроэнергетики и безмультипликаторные ветровые установки / Голубенко Н.С., Довгалюк С.М., Фельдман А.М., Цыганов В.А. // Нетрадиционная энергетика XXI века: Материалы IV международной конференции (Крым, Гурзуф, 2003). 2003: 68-74.
8. Миргород В.Ф., Ранченко Г.С., Голубенко Н.С. Моделирование динамических режимов ветроэнергетической установки большой мощности. Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2006. № 4(30). С. 96–99.
9. Alekseevskiy, Dmitriy, *et al.* "Procedure for the Synthesis of Models of Electrotechnical Complexes." *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 9, 2018: 48-54, 10.15587/1729-4061.2018.150483.
10. Андриенко П.Д. Повышение единичной мощности и эффективности ВЭУ с аэродинамической мультипликацией / П. Д. Андриенко, В. П. Метельская, И. Ю. Немудрый // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: проблемы автоматизированного электропривода. Харьков: НТУ "ХПИ". 2013. № 36 (1009): С. 394-395.
11. Andrienko P. & Alekseevskiy, D.G. & Blyzniakov, O.V. & Nemykina, O. & Nemudriy, I.Yu. Efficiency analysis of electromechanical conversion systems of wind turbines with aerodynamic multiplication. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023: 44-53. 10.15407/teched.2023.06.044.
12. Strunkin, H. Simulation of the operation of a voltage inverter as part of an autonomous wind power plant with aerodynamic multiplication based on an asynchronous generator with a phase rotor. *Technologies and Engineering*, 2024. 25(6): 69-79. 10.30857/2786-5371.2024.6.7.
13. Strunkin H., "Simulation of the operation of an autonomous wind power plant with aerodynamic multiplication based on asynchronous generator with a phase rotor with excitation from a voltage-source inverter," *Turk J Electr Power Energy Syst.*, Published online January 27, 2025. 10.5152/tepes.2025.24034.
14. Morgan, L. and Leithead, W.: Aerodynamic modelling of a novel vertical axis wind turbine concept, *Journal of Physics: Conference Series*, 2257. 10.1088/1742-6596/2257/1/012001, 2022.
15. Morgan, L., Leithead, W., & Carroll, J. On the use of secondary rotors for vertical axis wind turbine power take off. *Wind Energy*, 2024. 27(6): 569-582. 10.1002/we.2901.
16. Abadi, G.; Lopez, J.; Rodriguez, M.; Marroyo, L.; Iwanski, G. *Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation*, 1st ed.; John Wiley and Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2011.
17. Стрункін Г.М. Застосування пристроїв силової електроніки. Дніпро. Середняк Т. К., 2024: 408. ISBN 978-617-8139-59-9.
18. Алексієвський Д.Г. Синтез електромеханічних систем вітроенергетичних установок з аеродинамічним мультиплікуванням. – Дис. ... доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» Запорізький національний університет, Запоріжжя, 2020: 331.
19. Стрункін, Г. Автономна вітроенергетична установка з аеродинамічним мультиплікуванням на базі асинхронного генератора з фазним ротором зі збудженням від інвертора напруги. *Технічні науки та технології*, 2024. 4 (38): 245–253. 10.25140/2411-5363-2024-4(38)-245-253.
20. Отраслевой портал, посвященный рынку электродвигателей. – URL: <http://dvigatel.info>, (дата звернення 12.06.2023).
21. Лесник В.А., Мазуренко Л.И., Шуруб Ю.В., Джура А.В. Габаритная мощность асинхронной машины в генераторном режиме работы. / *Техническая электродинамика*. 2004. №2: 32-35.
22. Переверзев А.В., Алексеевский Д.Г., Семенов В.В., Буров А.Н., Стрункин Г.Н., Таранец А.В. Об использовании крановых асинхронных

двигателей в качестве генераторов для автономных ВЭУ. / Электротехника та електроенергетика. 2008. №1: 20-23.

23. Краново-металлургические электродвигатели / Баталов Н. М., Белый В. А., Иоффе А. Б. и др. М.: Энергия, 1967: 238.
24. Трансформатори ТСП та ТСП 1. Каталог ЗВП «НЕОН» УТОГ. URL: <https://www.neonzpp.com.ua/ua/docs/tsp.pdf> (дата звернення 10.05.2024).
25. Индукторные машины. Технический каталог НП ЗАО «Электромаш». URL: https://zem.com.ua/img/UserFiles/inductor_machines.pdf (дата звернення 10.05.2024).

References

1. Pro zatverdzhennya Nacionalnogo planu dij z vidnovlyuvanoi energetiki na period do 2030 roku ta planu zahodiv z jogo vikonannya. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#n12>. (accessed 03/18/2025).
2. Nacionalnij plan z energetiki ta klimatu na period do 2030 roku. URL: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=17f558a7-b4b4-42ca-b662-2811f42d4a33&title=NatsionalniiPlanZEnergetikiTaKlimatuNaPeriodDo2030-Roku>. (accessed 17.03.2025).
3. Patent SSSR №1457, Klass 88-s. Vetroelektricheskij generator / A.G. Ufimcev. zayavl. 14.01.1924; opubl. 31.07.1926.
4. Krasovskij N.V. Shema vetryanogo dvigatelya s aerodinamicheskoy peredachej dlya moshnostej 100-3.000 kv / N.V. Krasovskij // Izvestiya OGIN. Moskva. An SSSR. 1939. №5: 15.
5. Patent na vinahid UA49970, MPK F03D 1/00. Vitrodvigun / M.S. Golubenko, O.L. Kadac-kij, V.S. Legeza, V.O. Ciganov, S.I. Los, G.V. Galmakov; zayavnik i patentovlasnik Derzhavne konstruktorske byuro 255 «Pivdenne» im. M.K. Yangelya. № 2000031794, zayavl. 30.03.2002; opubl. 15.10.2002, Byul. № 10.
6. Golubenko N.S. Vetrovaya elektricheskaya turbogenera-tornaya ustanovka TG-750 / N.S. Golubenko, V.E. Olishevskaya, S.D. Kurdyukov, G.S. Olishevskij, S.S. Kurdyukov // Nauka ta innovaciyi. 2008. 4, №6: 71-77. 10.15407/scin4.06.071.
7. Golubenko N.S. Tendencii razvitiya vetroenergetiki i bezmultiplikatornye vetrovye ustanovki / Golubenko N.S., Dovgalyuk S.M., Feldman A.M., Cyganov V.A. // Netradicijno-onnaya energetika HHI veka: Materialy IV me-zhdunarodnoj konferencii (Krym, Gurzuf, 2003). 2003: 68-74.
8. Mirgorod V.F., Ranchenko G.S., Golubenko N.S. Modelirovanie dinamicheskikh rezhimov vetroenergeticheskoy ustanovki bolshoj mo-shnosti. Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnolo-giya. 2006. № 4(30). S. 96-99..
9. Alekseevskiy, Dmitriy, *et al.* "Procedure for the Synthesis of Models of Electrotechnical Complexes." Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, vol. 6, no. 9, 2018: 48-54, 10.15587/1729-4061.2018.150483.
10. Andrienko P.D. Povyshenie edinichnoj mo-shnosti i effektivnosti VEU s aerodinami-cheskoj multiplikacij/P. D. Andrienko, V. P. Metelskaya, I. Yu. Nemudryj // Vestnik Nac. tehn. un-ta "HPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: problemy avtomatizirovannogo elekt-roprivoda. Harkov: NTU "HPI". 2013. № 36 (1009): S. 394-395.
11. Andrienko P. & Alekseevskiy, D.G. & Blyzniakov, O.V. & Nemykina, O. & Nemudriy, I.Yu. Efficiency analysis of electromechanical conversion systems of wind turbines with aerodynamic multiplication. Tekhnichna Elektrodynamika. 2023: 44-53. 10.15407/techned2023.06.044.
12. Strunkin, H. Simulation of the operation of a voltage inverter as part of an autonomous wind power plant with aerodynamic multiplication based on an asynchronous generator with a phase rotor. Technologies and Engineering, 2024. 25(6): 69-79. 10.30857/2786-5371.2024.6.7.
13. Strunkin H., "Simulation of the operation of an autonomous wind power plant with aerodynamic multiplication based on asynchronous generator with a phase rotor with excitation from a voltage-source inverter," Turk J Electr Power Energy Syst., Published online January 27, 2025. 10.5152/tepes.2025.24034.
14. Morgan, L. and Leithead, W.: Aerodynamic modelling of a novel vertical axis wind turbine concept, Journal of Physics: Conference Series, 2257. 10.1088/1742-6596/2257/1/012001, 2022.
15. Morgan, L., Leithead, W., & Carroll, J. On the use of secondary rotors for vertical axis wind turbine power take off. Wind Energy, 2024. 27(6): 569-582. 10.1002/we.2901.
16. Abadi, G.; Lopez, J.; Rodriguez, M.; Marroyo, L.; Iwanski, G. Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation, 1st ed.; John Wiley and Sons, Inc.: Hobokes, NJ, USA, 2011..
17. Strunkin G.M. Zastosuvannya pristroyiv silovoyi elektroniki. Dnipro. Serednyak T. K., 2024: 408. ISBN 978-617-8139-59-9.
18. Alekseyevskij D.G. Sintez elektromechanichnih sistem vitroenergetichnih ustanovok z aerodinamichnim multiplikuvannyam. – Dis. ... doktora tehnicnih nauk za specialnistyu 05.09.03 «Elektrotehnicni kompleksi ta sis-temi» Zaporizkij nacionalnij universitet, Zaporizhzhya, 2020: 331.
19. Strunkin, G. Avtonomna vitroenergetichna ustanovka z aerodinamichnim multipli-kuvannyam na bazi asinhronnogo generatora z faznim rotorom zi zbudzhennyam vid invertora napруги. Tehnicni nauki ta tehnologiyi, 2024. 4 (38): 245-253. 10.25140/2411-5363-2024-4(38)-245-253.

20. Otrasleyoj portal, posvyashennyj rynku elektrodvigatelej. – URL: <http://dvigatel.info>, (data zvernennya 12.06.2023).
21. Lesnik V.A., Mazurenko L.I., Shurub Yu.V., Dzhura A.V. Gabaritnaya moshnost asinhronnoj mashiny v generatorenom rezhime raboty. / *Tekhnicheskaya elektrodinamika*. 2004. №2: 32-35.
22. Pereverzev A.V., Alekseevskij D.G., Semenov V.V., Burov A.N., Strunkin G.N., Taranec A.V. Ob ispolzovanii kranovyh asinhronnyh dvigatelej v kachestve generatorov dlya avtonomnyh VEU. / *Elektrotehnika ta elektroenergetika*. 2008. №1: 20-23.
23. Kranovo-metallurgicheskie elektrodvigateli / Batalov N. M., Belyj V. A., Ioffe A. B. i dr. M.: Energiya, 1967: 238.
24. Transformatori TSP ta TSP 1. Katalog ZVP «NEON» UTOG. URL: <https://www.neonzpp.com.ua/ua/docs/tsp.pdf> (accessed 05/10/2024).
25. Induktornye mashiny. Tekhnicheskij katalog NP ZAO «Elektromash». URL: https://zem.com.ua/img/UserFiles/inductor_machines.pdf (accessed 05/10/2024).

Strunkin H.M. Evaluation of the mass of the main equipment of a wind power plant with aerodynamic multiplication based on an asynchronous generator with a phase rotor

The article provides information on the national plans of Ukraine for the development of energy and wind power until 2030. Historical information on the research of wind power plants with aerodynamic multiplication is presented. An analytical review of the latest research on wind power plants with aerodynamic multiplication, initiated by Ukrainian scientists, is provided. The prospects for using electrical equipment of such plants based on an asynchronous generator with a phase rotor and a frequency converter for sliding power, which have better weight-dimensional indicators, are indicated. Information on the operation of wind power plants with aerodynamic multiplication is provided. The structural diagram of electrical equipment for controlling the

power of an asynchronous generator with a phase rotor is described and brief information on its functioning is presented. Using a frequency converter, it is possible to abandon the adjustment of the angle of installation of the blades of the primary wind turbine. The existing market of asynchronous machines with a phase rotor is limited to crane motors, which have a large magnetizing current and operate in a repeated short-term mode. It is possible to reduce the magnetizing current by reducing the motor stator voltage, which, on the other hand, leads to an increase in the rotor current. In previous publications, the stator voltage was optimized, at which the rotor current does not exceed the nominal value in a continuous mode. To match the optimal value of the generator stator voltage with the nominal load voltage, it is necessary to install a step-down autotransformer. Calculations of the total mass of three asynchronous generators with a phase rotor and a step-down autotransformer for the entire series of crane motors were made when using them in wind power plants with aerodynamic multiplication. A comparison of the total mass of electrical equipment based on an asynchronous generator with a phase rotor with the mass of synchronous generators used to date showed their superiority. When using serial asynchronous machines, it is possible to improve the mass of the equipment located on the blades of the primary wind turbine by almost 2 times.

Key words: asynchronous generator with phase rotor, wind power plant, aerodynamic multiplication, crane motor in generator mode, long-term operation, step-up autotransformer, mass of equipment.

Стрункін Гліб Миколайович – магістр, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії «Промислова електроніка», Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету. 69006, Запоріжжя, проспект Соборний, 226, e-mail: strunkingleb@gmail.com.

Стаття подана 22.02.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-56-60>

УДК 662.7 (075.8)

ЗАСТОСУВАННЯ ФІЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ГАЗОВОЇ ФАЗИ ТА УПРАВЛІННЯ КАТАЛІТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ У ВИРОБНИЦТВІ АМІАКУ

Водяник Б.Р., Лорія М.Г., Дуришев О.А.

APPLICATION OF THE KALMAN FILTER FOR GAS PHASE MONITORING AND CONTROL OF CATALYTIC PROCESSES IN AMMONIA PRODUCTION

Vodianyuk B.R., Loria M.G., Duryshch O.A.

У статті висвітлено теоретичні та практичні аспекти застосування фільтра Калмана, включно з його нелінійними модифікаціями, для підвищення ефективності та точності контролю в процесі синтезу аміаку. Розглянуто математичні основи фільтрації стану, описано можливості моніторингу концентрації газів у режимі реального часу та оптимізації каталітичних реакцій. Продемонстровано, що впровадження фільтра Калмана дозволяє зменшити вплив вимірювального шуму та затримок, забезпечуючи стабільнішу роботу реактора, вищий вихід аміаку та оптимальні умови роботи каталізатора. Аналіз новітніх досліджень і прикладів практичних реалізацій засвідчує, що інтеграція фільтра Калмана з цифровими двійниками та методами машинного навчання дає змогу автоматизувати й адаптувати процеси виробництва аміаку, зберігаючи високу продуктивність і гнучкість в умовах змінного навантаження та збурень.

Проаналізовано, що застосування фільтра Калмана та споріднених алгоритмів у виробництві аміаку відкриває широкі можливості для підвищення точності та стабільності контролю. За допомогою цих методів стає можливим відстежувати нелінійні процеси синтезу в режимі реального часу, коригувати покази шумних або датчиків із затримкою і оперативно реагувати на будь-які відхилення в складі синтез-газу чи роботі каталізатора. З'ясоване, що впровадження фільтрів стану дає змогу мінімізувати енергетичні та сировинні витрати, виявляти потенційні збої на ранніх стадіях, а також виводити установки на оптимальні режими з урахуванням динаміки навантаження та різноманітних збурень. У перспективі зростатиме значення методів самоадаптації фільтра, що ще більше спростить конфігурування і підтримку систем керування.

Таким чином, фільтр Калмана стає одним із ключових інструментів сучасної індустрії аміаку, яка переходить до цифрової парадигми та прагне відповідати вимогам енергоефективності, екологічної безпеки й безперервного покращення якості продукції. Таким чином, застосування фільтра Калмана та споріднених алгоритмів у виробництві аміаку відкриває широкі можливості для підвищення точності та стабільності контролю.

Ключові слова: синтез аміаку, фільтр Калмана, моніторинг концентрації, каталітичні процеси, оптимізація процесу, цифрові двійники, машинне навчання, нелінійна фільтрація.

Вступ. Виробництво аміаку є одним із найважливіших і водночас найскладніших процесів у хімічній промисловості. Його комерційне освоєння втілено в класичному процесі Габера-Боша, який передбачає високотемпературну і високотискову реакцію азоту з воднем на твердому каталізаторі [1]. Структура цього процесу передбачає низку апаратних елементів, зокрема реактор, теплообмінники, компресори та систему очищення і регенерації газових потоків. Ефективна робота такої складної системи вимагає не лише надійного обладнання, а й передових методів керування та оптимізації, які здатні підтримувати критичні параметри (температуру, тиск, співвідношення реагентів) на оптимальному рівні.

Відомо, що відхилення в складі синтез-газу чи коливання температури можуть знижувати вихід аміаку й пришвидшувати деградацію

каталізатора. Тому актуальним є застосування сучасних алгоритмів контролю, здатних оперативно компенсувати вплив шумів вимірювань, збурень і неточностей моделей [2]. Одним із таких інструментів є фільтр Калмана – математичний апарат, що дозволяє об'єднати інформацію від фізичних датчиків із прогнозами моделі, поступово уточнюючи оцінки стану процесу й підвищуючи точність управлінських рішень [3]. У цій статті розглянуто наукові підходи та практичні результати застосування фільтра Калмана й пов'язаних методів для моніторингу газової фази та управління каталітичними процесами в синтезі аміаку, а також окреслено перспективи подальшого розвитку цих технологій, зокрема у контексті цифрових двійників і методів машинного навчання.

Мета та завдання. Мета даного дослідження полягає в узагальненні сучасних теоретичних і практичних напрацювань щодо застосування фільтра Калмана в процесі виробництва аміаку для точного моніторингу реагентів та управління каталітичною реакцією. Для досягнення цієї мети у статті розглянуто ключові аспекти фільтрації стану, приділено увагу особливостям нелінійних модифікацій методу Калмана, проаналізовано можливості інтеграції з іншими сучасними підходами (цифрові двійники, машинне навчання) та узагальнено перспективи впровадження у масштабі промислової експлуатації. Завданням є показати, яким чином фільтр Калмана здатний підвищити стабільність, безпеку й ефективність синтезу аміаку, а також розкрити потенціал цього алгоритму в умовах складної та динамічно змінюваної технологічної обстановки.

Аналіз досліджень і публікацій. Наукові дослідження останніх десятиліть підтверджують високу ефективність спостерігачів стану, побудованих на основі фільтра Калмана, для оцінювання важливих технологічних параметрів. У процесі виробництва аміаку такі параметри включають концентрації азоту, водню та аміаку, а також локальні значення температури й ступінь активності каталізатора. Частина публікацій зосереджується на розширеному фільтрі Калмана (EKF) [4], що дає змогу лінеаризувати нелінійну кінетику у невеликих околах поточних оцінок стану, підвищуючи точність моделювання. Деякі автори демонструють потенціал використання unscented фільтра Калмана (UKF) [5] та ансамблевого фільтра Калмана (EnKF) [6], які краще відображають

складні ймовірнісні розподіли за рахунок статистичного підходу до ідентифікації нелінійностей.

Публікації вказують також на важливість цілодобового онлайн-моніторингу концентрації газової фази та диференційованої оцінки внутрішнього стану каталітичного шару, яка неможлива звичайними методами через технічні обмеження вимірювальної апаратури. В низці праць наголошується на перспективності поєднання фільтра Калмана з цифровими двійниками: це дає змогу синхронізувати інформацію з реального процесу та високоточних комп'ютерних моделей, одержуючи в режимі реального часу прогнози та оптимізаційні рішення [7-9]. Додатково зазначено, що розробка самоадаптивних схем фільтрації з методами машинного навчання дозволяє компенсувати неузгодженості й динамічні збурення, що є надзвичайно важливим у технологіях «зеленої» хімії та при роботі від відновлюваних джерел енергії [10].

Виклад основного матеріалу. Фільтр Калмана є рекурсивним алгоритмом, що базується на байєсовому підході. На кожному кроці він спочатку виконує прогноз стану на основі математичної моделі технологічного процесу (крок передбачення), а потім оновлює цей прогноз з урахуванням поточних вимірювань (крок корекції). Це дозволяє поступово зменшувати невизначеність за рахунок поєднання інформації з моделі та даних від наявних датчиків. Для лінійних систем розв'язок вважається оптимальним у середньоквадратичному сенсі, але у більшості випадків виробництва аміаку моделі є виражено нелінійними, зокрема через кінетику реакції та складні теплові явища у каталізаторі. Тому доцільним є використання розширеного або інших нелінійних варіантів фільтра Калмана, які виконують лінеаризацію моделі чи статистичну апроксимацію.

У практичних установках синтезу аміаку фільтр Калмана забезпечує можливість онлайн-моніторингу газового складу з підвищеною точністю. Зокрема, виконується оцінка концентрації NH_3 , рівномірності розподілу H_2 і N_2 , виявлення присутності побічних газів. Це дозволяє тримати стехіометричне співвідношення реагентів у вузьких діапазонах, максимально наближених до теоретично обчисленого оптимуму [8]. Важливим завданням є компенсація затримок і шумів, притаманних хроматографам чи мас-спектрометрам. Завдяки фільтру Калмана

програмний датчик може виправляти ці похибки та більш оперативно керувати подачею сировини, швидкістю обертання компресорів і режимами охолодження, аби запобігти утворенню надмірних побічних продуктів і деградації каталізатора.

Управління каталітичним процесом, що є другим ключовим напрямком застосування фільтра Калмана, охоплює підтримання заданої температури та вчасне реагування на зміну кінетичних параметрів каталізатора. Відомо, що каталізатор може поступово «старіти» або тимчасово втрачати активність при відхиленнях у режимах роботи. Фільтр Калмана дозволяє «відстежувати» стан каталізатора, включно з моніторингом внутрішніх температурних і концентраційних профілів, які неможливо виміряти безпосередньо [7, 8]. На основі цих оцінок сучасні системи керування (наприклад, модельно-прогнозні регулятори) можуть своєчасно коригувати витрати реагентів і температуру, уникаючи перегріву та збільшуючи термін служби каталізатора. Відповідно, вихід аміаку залишається стабільним навіть у складних режимах експлуатації, а динамічне керування процесом стає суттєво гнучкішим.

Практичні реалізації підтверджують, що фільтр Калмана може слугувати базовим інструментом як для стабілізації параметрів, так і для інтеграції з інтелектуальними технологіями: цифровими двійниками та методами машинного навчання [9]. Цифрові двійники створюють детальні моделі

виробництва, до яких надходять дані від установки, кориговані фільтром Калмана. Зі свого боку, методи машинного навчання (нейронні мережі, методи екстремального пошуку) допомагають оновлювати статистичні параметри моделі в реальному часі, роблячи систему керування ще більш адаптивною [11]. Така взаємодія дає змогу точніше прогнозувати технологічні ризики, проводити превентивне обслуговування і досягати більшої енергоефективності та екологічної безпеки.

Для аналізу можливостей застосування фільтра Калмана в контролі процесу синтезу аміаку була проведена симуляція реакторної системи з урахуванням основних кінетичних залежностей. Динамічна модель описує зміну концентрацій азоту (N_2), водню (H_2) та аміаку (NH_3) відповідно до спрощених кінетичних рівнянь реакції Габера-Боша. Оскільки реальні вимірювання зазнають впливу шумів і затримок, у моделюванні враховані випадкові похибки у вигляді процесного та вимірювального шуму.

В алгоритмі симуляції спочатку задаються початкові концентрації компонентів газової суміші, після чого для кожного кроку моделюється їхня еволюція згідно з рівняннями реакційної кінетики. До істинних значень додається випадковий шум, що імітує обмеження реальної вимірювальної апаратури. З отриманих шумних даних фільтр Калмана виконує рекурсивну оцінку стану системи, комбінуючи модельні передбачення з виміряними величинами.

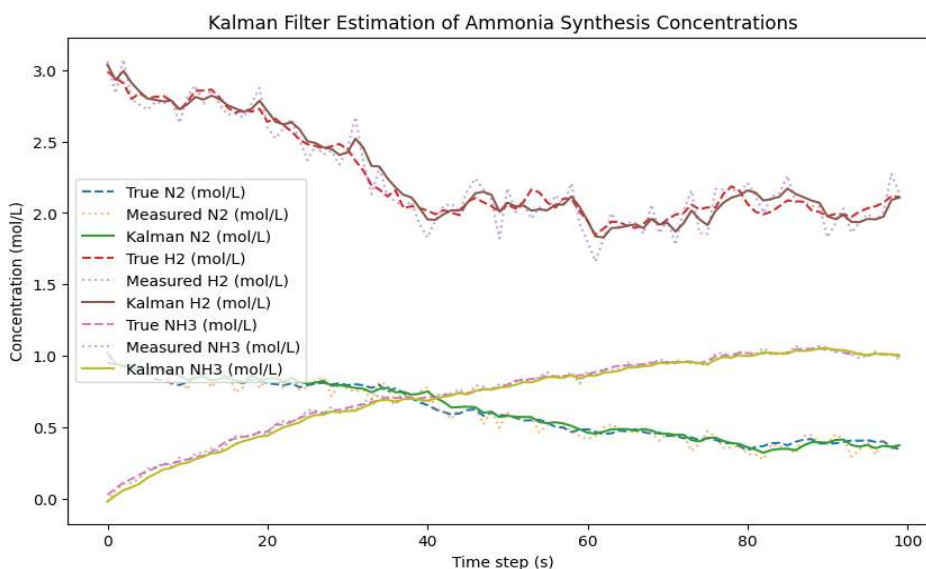


Рис. Комп'ютерна симуляція концентрацій газів у реакторі синтезу аміаку за допомогою фільтра Калмана

На графіку (Рис.) відображені три групи кривих:

- Пунктирні лінії представляють істинні значення концентрацій газів у реакторі, що змінюються внаслідок хімічної реакції.

- Точкові лінії відповідають вимірним значенням, що містять випадкові флуктуації.

- Суцільні лінії позначають оцінені фільтром Калмана концентрації, які є згладженими та скоригованими з урахуванням попередніх станів.

Результати демонструють, що фільтр Калмана ефективно знижує вплив шумів і дає змогу більш точно оцінювати реальний склад газової фази. Це дозволяє стабілізувати контроль параметрів реакції та оперативно компенсувати збурення, які виникають у процесі роботи установки. Отримані дані підтверджують доцільність використання методів фільтрації для підвищення точності онлайн-моніторингу та адаптивного керування технологічним процесом.

Висновки. Застосування фільтра Калмана та споріднених алгоритмів у виробництві аміаку відкриває широкі можливості для підвищення точності та стабільності контролю. За допомогою цих методів стає можливим відстежувати нелінійні процеси синтезу в режимі реального часу, коригувати покази шумних або датчиків із затримкою і оперативно реагувати на будь-які відхилення в складі синтез-газу чи роботі каталізатора. Фільтр Калмана перетворюється на центральну ланку інтелектуальних систем керування, у яких поєднуються дані від фізичних датчиків, математичні моделі (в тому числі цифрові двійники) та технології машинного навчання.

Проведений аналіз свідчить, що впровадження фільтрів стану дає змогу мінімізувати енергетичні та сировинні витрати, виявляти потенційні збої на ранніх стадіях, а також виводити установки на оптимальні режими з урахуванням динаміки навантаження та різноманітних збурень. У перспективі зростатиме значення методів самоадаптації фільтра, що ще більше спростить конфігурування і підтримку систем керування. Таким чином, фільтр Калмана стає одним із ключових інструментів сучасної індустрії аміаку, яка переходить до цифрової парадигми та прагне відповідати вимогам енергоефективності, екологічної безпеки й безперервного покращення якості продукції.

Л і т е р а т у р а

1. Humphreys, John, Rong Lan, and Shanwen Tao. "Development and recent progress on ammonia synthesis catalysts for Haber–Bosch process." *Advanced Energy and Sustainability Research* 2.1, 2021: 2000043.
2. Smith, Collin, Alfred K. Hill, and Laura Torrente-Murciano. "Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape." *Energy & Environmental Science* 13.2, 2020: 331-344.
3. Welch, Greg, and Gary Bishop. "An introduction to the Kalman filter.", 1995: 2.
4. Fujii, Keisuke. "Extended kalman filter." *Reference Manual* 14, 2013: 41.
5. Wan, Eric A., and Rudolph Van Der Merwe. "The unscented Kalman filter for nonlinear estimation." *Proceedings of the IEEE 2000 adaptive systems for signal processing, communications, and control symposium* (Cat. No. 00EX373). Ieee, 2000.
6. Houtekamer, Peter L., and Herschel L. Mitchell. "Ensemble kalman filtering." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography* 131.613, 2005: 3269-3289.
7. Jiang, Kai, Erming Cao, and Lijiang Wei. "NOx sensor ammonia cross-sensitivity estimation with adaptive unscented Kalman filter for Diesel-engine selective catalytic reduction systems." *Fuel* 165 (2016): 185-192.
8. Surenahalli, Harsha Shankar, Gordon Parker, and John H. Johnson. "Extended Kalman filter estimator for NH₃ storage, NO, NO₂ and NH₃ estimation in a SCR." No. 2013-01-1581. *SAE Technical Paper*, 2013.
9. Jamal, Alaa, Ahmed Nasser, and Jaap van Rijn. "Real-time ammonia estimation in recirculating aquaculture systems: A data assimilation approach." *Aquacultural Engineering* 106, 2024: 102432.
10. Lauro, Ezio, Amélie Têtu, and Hélyette Geman. "Green Ammonia Production in Stochastic Power Markets." *Commodities* 3.1, 2024.
11. Baldassarre, A., et al. "Digital twin with augmented state extended Kalman filters for forecasting electric power consumption of industrial production systems." *Heliyon* 10.6, 2024.

Vodianyuk B.R., Loria M.G., Duryshch O.A.
Application of the Kalman filter for gas phase monitoring and control of catalytic processes in ammonia production

The article highlights the theoretical and practical aspects of using the Kalman filter, including its nonlinear modifications, to improve the efficiency and accuracy of control in the ammonia synthesis process. The mathematical foundations of state filtration are considered, the possibilities of real-time monitoring of gas concentrations and optimisation of catalytic reactions are described. It is demonstrated that the

introduction of a Kalman filter reduces the influence of measurement noise and delays, ensuring more stable reactor operation, higher ammonia yield and optimal catalyst conditions. An analysis of the latest research and examples of practical implementations shows that the integration of the Kalman filter with digital twins and machine learning methods makes it possible to automate and adapt ammonia production processes, while maintaining high performance and flexibility under conditions of variable load and disturbances.

It is analysed that the use of the Kalman filter and related algorithms in ammonia production opens up wide opportunities for improving the accuracy and stability of control. With the help of these methods, it becomes possible to monitor nonlinear synthesis processes in real time, correct readings of noisy or delayed sensors, and promptly respond to any deviations in the composition of the synthesis gas or catalyst operation. It has been found that the introduction of state filters makes it possible to minimise energy and raw material costs, detect potential failures at early stages, and bring plants to optimal operating conditions, taking into account load dynamics and various disturbances. In the future, self-adaptive filter methods will become increasingly important, which will further simplify the configuration and maintenance of control systems. Thus, the Kalman filter is becoming one of the key tools for the modern ammonia industry, which is moving to a digital paradigm and striving to meet the requirements of energy efficiency,

environmental safety and continuous improvement of product quality. Thus, the application of the Kalman filter and related algorithms in ammonia production opens up great opportunities for improving the accuracy and stability of control.

Keywords: *ammonia synthesis, Kalman filter, concentration monitoring, catalytic processes, process optimisation, digital twins, machine learning, nonlinear filtration.*

Водяник Богдан Романович – аспірант, асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, vodianykh@snu.edu.ua

Лорія Марина Геннадіївна – д.т.н., професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, m_loria@snu.edu.ua

Дуришев Олександр Андрійович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, duryshev@snu.edu.ua

Стаття подана 15.03.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-61-67>

УДК 004.92[621:744]

ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ AUTOCAD ПРИ ВИВЧЕННІ ТЕХНІЧНИХ ДИСЦИПЛІН

Карпюк Л.В., Давіденко Н.О., Кобзарев Є.О.

PARAMETRIC MODELING IN THE AUTOCAD ENVIRONMENT IN THE STUDY OF TECHNICAL DISCIPLINES

Karpiuk L.V., Davidenko N.O., Kobzarev E.O.

Важливий інтерес представляє використання графічної системи AutoCAD у пошуках нових підходів до вивчення різних дисциплін, де візуалізація процесу знаходження рішення пропорційна сприйняттю інформації слухачем курсу (особливо важливо для викладання графічних дисциплін). Параметричне креслення – це технологія, що застосовується в проєктах із залежностями, які являють собою зв'язки й обмеження стосовно 2D-геометрії. А стадії проєктування залежності дають можливість посилити вимоги під час роботи з різними проєктними рішеннями або під час внесення змін. Зміни, що вносяться в об'єкти, можуть призвести до автоматичного підстроювання інших об'єктів і обмежити можливості зміни відстаней або куткових величин. В наданій статті розглянуто питання розробки модуля параметричної побудови твердотільних моделей для графічного редактора AutoCAD 2022. В основі розробки лежить універсальний алгоритм перетворення геометричних моделей у параметричні, що базується на аналізі DXF-файлів. Запропонований підхід дає змогу виконати декомпозицію складної твердотільної моделі та сформулювати параметричні описи окремих графічних примітивів, що входять до складу моделі. Модуль призначений для розширення базових можливостей параметричного твердотільного моделювання, реалізованих у графічному редакторі AutoCAD у вигляді динамічних блоків. Одним із основних принципів сучасного інформаційного проєктування є застосування різних блоків, у тому числі параметричних. Це значною мірою прискорює й автоматизує процес створення проєктної документації в системах автоматизованого проєктування, наприклад, в AutoCAD. Усе ж основним недоліком цього інструменту є підтримка лише поверхневих моделей. Створення

твердотільних параметричних моделей за допомогою динамічних блоків в AutoCAD не передбачено. Програма виконана з використанням інтерфейсу прикладного програмування графічного редактора AutoCAD і реалізована у вигляді модуля універсальної автоматизованої інформаційної системи. Модуль дає змогу виконувати параметризацію готових твердотільних моделей для підвищення зручності їх повторного використання. Застосування сформованих за допомогою модуля параметричних моделей дає можливість за короткий час виконати аналіз різних конструктивних схем і уникнути принципових конструкторських помилок. Під час проєктування системи максимально реалізовано принцип модульності, що дає змогу в міру необхідності розширювати її функціонал без істотного коригування раніше створених модулів.

Ключові слова: твердотільні моделі, параметризація, алгоритм, AutoCAD, параметричне моделювання, динамічний блок.

Вступ. Параметричне представлення тривимірних моделей є найбільш ефективним інструментом моделювання на сьогоднішній день. Практично всі сучасні САПР мають ті чи інші засоби параметричного моделювання, як двовимірною, так і тривимірною. В AutoCAD інструментарій параметричного моделювання реалізовано у вигляді динамічних блоків, що дають змогу створювати параметричні поверхневі моделі.

Якщо якийсь елемент зображення повторюється на кресленнику багаторазово, його доцільно виконати як блок. Блок – це набір об'єктів, які згруповані в єдиний іменований

об'єкт, що зберігається у файлі кресленика і доступний для редагування. До складу блоку можуть входити графічні примітиви (відрізки, полілінії, кола тощо) і текст, який називається атрибутом [1–3]. Блоки для AutoCAD – це посилання в область даних файлу, де лежить сам опис блоку. Саме тому їхнє використання суттєво скорочує розмір файлу, а отже, ресурси та час.

При цьому актуальним залишається завдання параметризації вже наявних твердотільних моделей.

Викладення основного матеріалу. За експертними оцінками, до вісімдесяти відсотків вузлів і деталей виробів, що знову розробляються, не зазнають істотних змін у конфігурації, відбувається лише зміна їхніх геометричних параметрів. Безліч конструкторських САПР дають змогу модифікувати виріб, який проектується, і повторно використовувати його вже з новими параметрами, але є також низка систем (AutoCAD, ProgeCAD тощо), які не мають повноцінних засобів параметричної побудови моделей. Розробка автоматизованої системи параметричного моделювання з використанням твердотільних моделей на базі AutoCAD дає змогу розв'язати проблему параметризації моделей для цієї системи.

Одним із найефективніших типів 3D-моделей, які використовують у конструкторських САПР, є твердотільна модель об'єкта, що дає змогу створювати просторову модель об'єкта і генерувати за нею повний набір графічної конструкторської документації. Такі моделі можуть бути передані в будь-яку розрахункову програму для аналізу міцності або інших властивостей деталі.

У графічному редакторі AutoCAD, починаючи з версії 2006, засоби параметричного моделювання представлені динамічними блоками. Динамічні блоки – це параметричні графічні примітиви, що дають змогу динамічно змінювати певні параметри за допомогою операцій зі спеціальними трикутними «ручками». Користувач може не тільки створювати компактні бібліотеки з параметричними графічними блоками, а й налаштовувати їх «за місцем». Наразі перетворення в динамічні блоки можливе тільки на основі двовимірних блоків, що істотно звужує перелік завдань, що виконуються, і обмежує можливості використання тривимірного моделювання.

Модуль формування параметричних моделей на базі AutoCad. На практиці проєктувальнику дуже часто доводиться мати справу з моделями, що мають однакові конфігурації, але відрізняються геометричними пропорціями і розмірами. Для підвищення ефективності розв'язання цього завдання призначено автоматизований модуль генерації параметричних твердотільних моделей, реалізований у складі універсальної автоматизованої інформаційної системи, представленої на рис. 1.

Модуль побудови параметричних тривимірних моделей найтісніше взаємодіє з блоком, що забезпечує роботу з графічними базами даних (ГБД), оскільки майже вся необхідна інформація для побудови моделей розташовується в базі даних. [4–6].

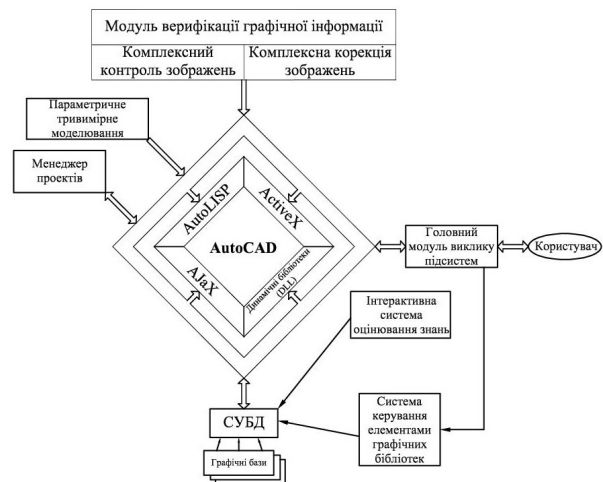


Рис. 1. Функціональна взаємодія модулів універсальної автоматизованої інформаційної системи

Нижче перераховані основні функціональні можливості модуля:

- витяг із ГБД якісної (розміри, матеріал) і кількісної (перелік деталей) інформації про тривимірну модель;
- витяг із ГБД графічної інформації, представленої у вигляді растрового зображення тривимірної моделі;
- побудова параметричної моделі на основі отриманої інформації (таблична параметризація);
- зміна геометричних пропорцій зі збереженням конфігурації по 3-х осях (функція масштабування);
- коригування отриманої інформації та побудова на основі нових даних параметричної моделі (геометрична параметризація);

- візуалізація параметричних моделей у режимі попереднього перегляду;
- експорт параметричних моделей у систему графічного проектування AutoCAD;
- аналіз кресленика, в який здійснюється експорт моделі (типи шарів, типи ліній, товщина ліній тощо);
- можливість завдання у параметричній моделі таких властивостей як: шар, тип і товщина ліній тощо;
- можливість розміщення параметричної моделі на новому шарі з автоматичним створенням цього шару.

Після вилучення геометричної моделі з ГБД, робота з нею може вестися в одному з режимів, перерахованих на рис. 2.

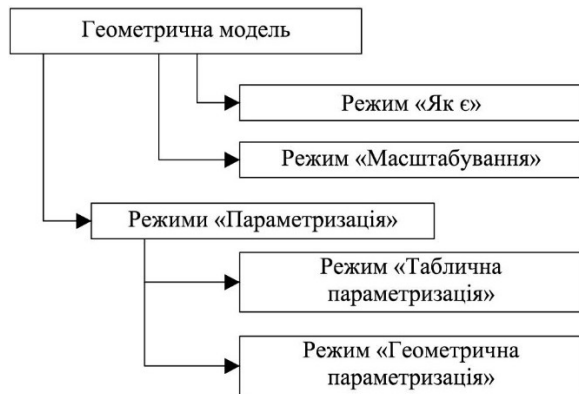


Рис. 2. Варіанти використання геометричної моделі

Моделю можна використовувати без будь-яких змін у режимі «Як є», тобто, після вибору моделі з бази даних вона безпосередньо експортується у відкритий в графічному редакторі AutoCAD кресленик для подальшої роботи з нею.

Режим «Масштабування» передбачає, що модель може бути пропорційно збільшена або зменшена за однією, кількома або всіма координатними осями (X, Y, Z). Цей режим дає змогу змінити тільки геометричні розміри моделі загалом, геометричні пропорції зберігаються.

Режим «Параметризація» є основним режимом модуля. Саме під час його використання відбувається перехід від геометричної моделі до параметричної. Цей режим надає можливості як табличної, так і геометричної параметризації.

Важливою відмінністю режиму «Параметризація» від режиму «Масштабування» є те, що під час масштабування змінюються геометричні пропорції всієї деталі цілком, і вона або

зменшується/збільшується (однаковий коефіцієнт за трьома осями), або розтягується (різні коефіцієнти).

Під час параметризації також зберігається загальна геометрична конфігурація, але з'являється можливість часткової її трансформації завдяки зміні розмірів або кількості окремих деталей у кінцевому виробі, аж до повного їхнього виродження або заміни на інші аналогічні.

Режими параметризації, представлені в модулі, є найпоширенішими нині [3]. Табличний тип параметризації – це базовий тип, який є невід'ємною частиною будь-якої системи, пов'язаної з параметричним моделюванням. Модель створюється на основі таблиці параметрів. У розробленій програмі ці параметри витягуються з бази даних. Потім ці дані піддаються перевірці на коректність і повноту. Якщо дані не відповідають висунутим вимогам, то здійснюється повторний запит до бази даних. Якщо перевірка пройшла успішно, то користувачеві надають вибір: або згенерувати остаточну модель і експортувати її в графічний редактор AutoCAD, або в режимі попереднього перегляду побачити модель, що вийшла, оцінити її, а потім вирішити, чи варто експортувати, чи ні.

Другий тип параметризації є гнучкішим і потужнішим механізмом реалізації необхідних завдань, що робить його складнішим як з погляду математичних розрахунків, так і з боку програмної реалізації. Але, зрештою, геометричний тип параметризації зводиться до табличного (як і будь-який інший тип параметризації), оскільки будь-яка модель перебудовується за низкою певних значень, а ця низка і є таблиця параметрів, що характеризують модель. До перевірки на коректність і повноту додається перевірка геометричних розмірів і пропорцій, щоб уникнути отримання принципово некоректних моделей.

Після проходження всіх перевірок користувач може, як і у випадку з табличною параметризацією, або експортувати отриману модель в AutoCAD і вже засобами цього редактора продовжити роботу, або скористатися функцією попереднього перегляду моделі. Схему описаного алгоритму наведено на рис. 3.

Отже, створення параметричної тривимірної моделі під час використання стандартних засобів AutoCAD передбачає виконання такого набору дій:

– створення динамічного двовимірного блоку, що визначає контур деталі; при цьому можливе використання як геометричної, так і табличної параметризації;

– виконати витягування або видавлювання асоціативної поверхні, заданої динамічним блоком, із подальшим замиканням нижньої та верхньої поверхонь контурів.

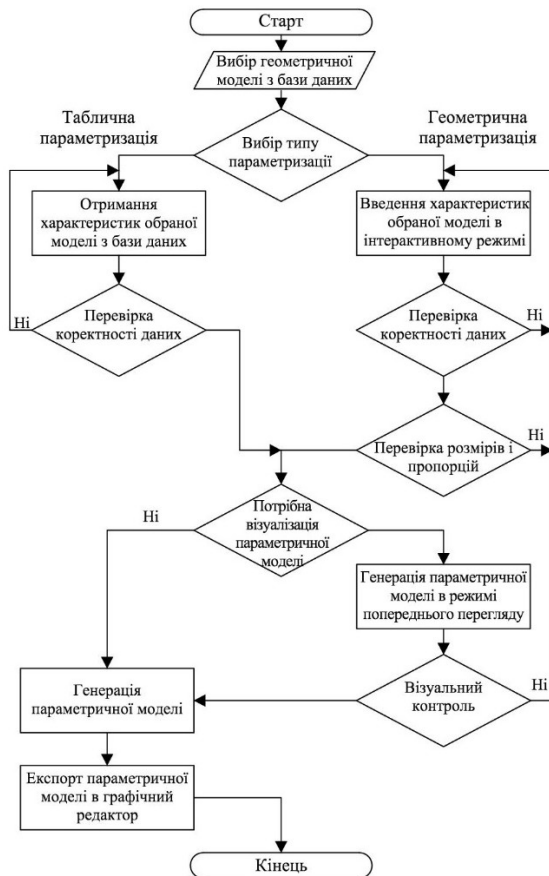


Рис. 3. Формування моделей з різними типами параметризації

При цьому перетворення блоку в твердотільний об'єкт призводить до втрати параметрично заданих характеристик. Процедуру створення поверхневої моделі на базі динамічного блоку наведено на рис. 4.

Формування параметричної твердотільної моделі з використанням розробленого модуля починається з пошуку кресленника в графічній базі даних, у якій зберігається інформація про всі кресленники, що знаходяться на комп'ютері користувача. У базі даних реалізовано функцію пошуку кресленника за конфігурованим набором критеріїв, що дає змогу істотно підвищити ефективність цієї процедури.

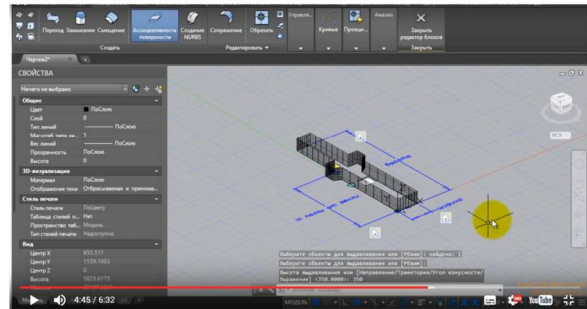


Рис. 4. Створення поверхневої моделі на базі динамічного блоку

Після пошуку і вибору потрібної моделі проводиться її відкриття в AutoCAD. Потім можливе використання одного з режимів обробки, наведених на рис. 2. Залежно від обраного режиму проводиться налаштування різних властивостей моделі, починаючи від зміни масштабу і закінчуючи зміною геометрії окремих деталей моделі.

Для виконання параметризації моделі використовується вікно «Побудова параметричних моделей», що дає змогу створити нову параметричну модель або коригувати параметри вже наявних параметричних моделей із подальшою їх генерацією (рис. 5).

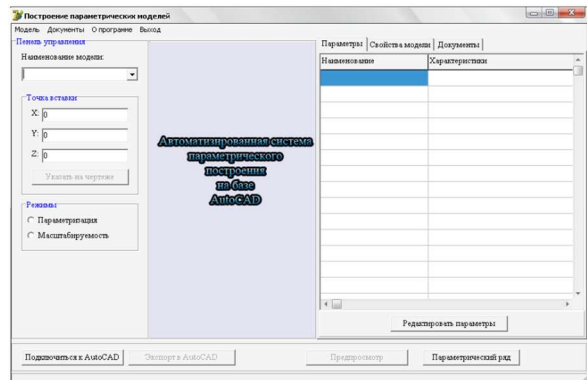


Рис. 5. Вікно «Побудова параметричних моделей»

Поле «Найменування моделі» призначене для відображення назви поточної моделі, а також вибору моделі з бази даних.

Координати моделі відображаються в блоці «Точка вставки» і задаються вручну, за допомогою введення значень у поля X, Y і Z, або вказуються в інтерактивному режимі на кресленнику. Блокування з кнопки «Вказати на кресленнику» знімається після підключення модуля до редактора AutoCAD.

Слід зазначити, що доки користувач не здійснив вибір моделі, більшість елементів керування на формі будуть недоступні.

У блоці «Режими» вибирається тип використання геометричної моделі. Активація режиму «Параметризація» призведе до появи блоку з режимами «Таблична параметризація» і «Геометрична параметризація», а вибір режиму «Масштабованість» призводить до появи блоку «Масштаб по осях» (рис. 6).

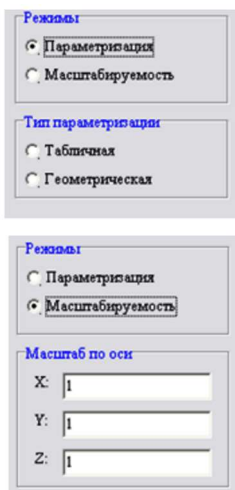


Рис. 6. Вибір режиму параметризації

Початкове заповнення параметрів моделі, що створюється, здійснюється на основі аналізу DXF-файлу моделі, що містить пари кодів і асоційованих значень [4]. Коди визначають типи значень, що йдуть за ними. Пари кодів і значень утворюють секції, що складаються з окремих записів. Серед цих записів містяться відомості і про геометричну модель зі складовими її примітивами. Ці дані містяться в секції ENTITIES, що містить усі графічні об'єкти в кресленнику.

Інформація про примітиви, яка використовується для подальшого аналізу кресленника і містить координати точки вставки примітивів та їхні геометричні розміри (довжина, ширина, висота тощо), заноситься в таблицю «Аналіз геометричної моделі» (рис. 7). На підставі цих даних формується параметричний опис моделі.

Після отримання всіх даних про примітиви геометричної моделі та зведення їх у таблицю, необхідно порівняти їх з реальними деталями. Найменування деталі заноситься в праву колонку навпроти відповідного примітиву. Щоб зафіксувати ці зв'язки, слід натиснути кнопку «Ініціалізація примітивів». Отриману параметричну модель у вигляді набору

параметрів можна зберегти для подальшого використання.

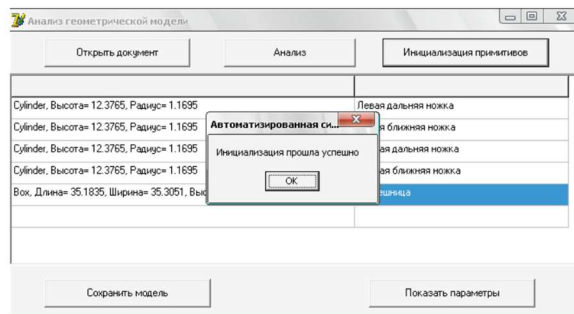


Рис. 7. Результати аналізу геометричної моделі

Редагування параметрів елементів моделі здійснюється у вікні «Параметри», наведеному на рис. 8.

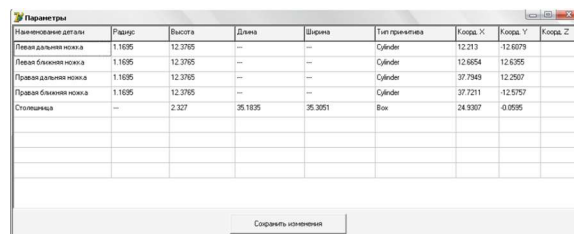


Рис. 8. Вікно редагування параметрів моделі

Висновки. Аналіз функціональних можливостей розробленого модуля дає змогу стверджувати, що його використання дасть змогу значно підвищити ефективність системи AutoCAD у частині параметричного моделювання. Гнучкі та потужні засоби параметричного моделювання твердотільних об'єктів, представлені в розробленому модулі, здатні ефективно доповнити функціонал динамічних блоків AutoCAD.

Можливості нових версій AutoCAD називають справжнім технологічним проривом, який гідно оцінять мільйони користувачів цього програмного продукту. AutoCAD став параметричним, і тепер за будь-яких змін між об'єктами підтримуються задані користувачами взаємозв'язки. Це дає змогу значно скоротити час на внесення змін до проектів. Поява інструментів роботи з довільними формами забезпечує можливість створювати й аналізувати найскладніші тривимірні об'єкти. Усі перелічені вище переваги та функції графічного редактора можуть бути використані в процесі вивчення графічних дисциплін як для слухачів на стаціонарі, так і бути вельми ефективними під час дистанційного навчання, а також можуть бути застосовані для самоосвіти.

Таким чином, викладене вище вказує на важливість вивчення параметризації при підготовці студентів технічних спеціальностей.

Параметричне моделювання може ефективно застосовуватися у процесі підготовки курсових та дипломних проєктів. Так, при створенні 3D-моделі різних конструкцій на основі динамічних блоків з'являється можливість не тільки автоматичного отримання всіх необхідних видів, розрізів і перерізів, але і формування специфікацій за допомогою вилучення атрибутів блоків, що є складовими елементами конструкції. При цьому необхідно розуміти, що ефективне використання інструментів параметризації можливе лише за умови глибокого розуміння геометричної суті цих процесів і великої логічної роботи, до яких має бути підготовлений студент у процесі початкової геометро-графічної підготовки.

Література

- 1 Михайленко В. Є., Ванін В. В., Ковальов С. М. Інженерна та комп'ютерна графіка. Підручник. Київ: Каравела, 2012. 368 с.
- 2 Параметризація в AutoCAD 2015. видео-урок <https://compteacher.net/engineering/autocad>
- 3 Гнітецька Т. В., Гнітецька Г. О., Пустовіт Є. О. Використання динамічних блоків для створення електронних бібліотек зображень типових кріпильних елементів ресурсами AutoCAD / Прикладна геометрія та інженерна графіка, № 100, 2021. С.100-109.
- 4 Гнітецька Т. В., Гнітецька Г. О. Метод «скелетних конструкцій» для спрощення процесу параметризації в AutoCAD. Прикладна геометрія та інженерна графіка, 2021. С.45-54.
- 5 Карпюк Л. В., Гуліда М. І., Ревенко С. А. Комп'ютерна графіка в машинобудівних кресленнях: навч. посібник. Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2007. 132 с.
- 6 Антонович Є. А., Василюшин Я. В., Шпільчак В. А. Креслення : Навч. посібник. Львів : Світ, 2006. 512 с.

References

- 1 Mykhailenko V. Ye., Vanin V. V., Kovalov S. M. Inzhenerna ta kompiuterna hrafika. Pidruchnyk. Kyiv: Karavela, 2012. 368 p.
- 2 Parametryzatsiya v AutoCAD 2015. vydeo-urok <https://compteacher.net/engineering/autocad/2057-parametryzatsiya-v-autocad-2015-video-urok.html>
- 3 Hnitytska T. V., Hnitytska H. O., Pustovit Ye. O. Vykorystannia dynamichnykh bloktiv dlia stvorennia elektronnykh bibliotek zobrazhen typovykh kripilnykh elementiv resursamy AutoCAD. Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika, No 100, 2021. Pp.100-109.

- 4 Hnitytska T. V., Hnitytska H. O. Metod «skeletnykh konstrukttsii» dlia sproshchennia protsesu parametryzatsii v AutoCAD. Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika, 2021. Pp.45-54.
- 5 Karpiuk L. V., Hulida M. I., Revenko S. A. Kompiuterna hrafika v mashynobudivnykh kreslenniakh: navch. posibnyk. Luhansk : Vyd-vo SNU im. V. Dalia, 2007. 132 p.
- 6 Antonovych Ye. A., Vasylyshyn Ya. V., Shpilchak V. A. Kreslennia : Navch. posibnyk. Lviv : Svit, 2006. 512 p.

Karpiuk L. V., Davidenko N. O., Kobzarev E. O. Parametric modeling in the AutoCAD environment in the study of technical disciplines

Of great interest is the use of the AutoCAD graphic system in the search for new approaches to the study of various disciplines, where the visualization of the process of finding a solution is proportional to the perception of information by the course student (especially important for teaching graphic disciplines). Parametric drawing is a technology used in projects with dependencies, which are relationships and constraints on 2D geometry. And the dependency design stages make it possible to tighten the requirements when working with different design solutions or when making changes. Changes made to objects can lead to automatic adjustment of other objects and limit the ability to change distances or angular values. This article discusses the development of a module for the parametric construction of solid models for the AutoCAD 2022 graphic editor. The development is based on a universal algorithm for converting geometric models into parametric models based on the analysis of DXF files. The proposed approach makes it possible to decompose a complex solid-state model and generate parametric descriptions of individual graphical primitives that make up the model. The module is designed to extend the basic capabilities of parametric solid modeling implemented in the AutoCAD graphic editor in the form of dynamic blocks. One of the basic principles of modern information design is the use of various blocks, including parametric ones. This greatly speeds up and automates the process of creating project documentation in computer-aided design systems, such as AutoCAD. However, the main drawback of this tool is that it only supports surface models. The creation of solid parametric models using dynamic blocks is not provided in AutoCAD. The program was developed using the application programming interface of the AutoCAD graphic editor and implemented as a module of a universal automated information system. The module allows you to parameterize ready-made solid models to increase their reusability. The use of parametric models generated by the module makes it possible to analyze various design schemes in a short time and avoid fundamental design errors. The system was designed to maximize the modularity principle, which allows expanding its functionality as needed without significantly adjusting previously created modules.

Keywords: *solid-state models, parameterization, algorithm, AutoCAD, parametric modeling, dynamic block.*

Карпюк Людмила Вікторівна – старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, karp224@gmail.com

Давіденко Наталія Олександрівна – старший викладач кафедри іноземних мов та професійної комунікації, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, nat.davidenko11@gmail.com

Кобзарев Є.О. Валерій Васильович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, asp-174-23-21@snu.edu.ua

Стаття подана 11.03.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-68-78>

УДК 622.7: 534

МОДЕЛЮВАННЯ ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СИГНАЛУ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗНОЇ РУДИ

Моркун В.С., Моркун Н. В., Олійник Т.А., Грищенко Я.О.

MODELING OF EDDY CURRENT TRANSFORMATION OF AN ELECTROMAGNETIC SIGNAL TO SOLVE THE PROBLEM OF DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF IRON ORE

Morkun V.S., Morkun N.V., Oliynyk T.A., Hryshchenko Y.O.

Запропоновано метод комбінованого електромагнітного перетворення для визначення характеристик феромагнітних матеріалів. Метод заснований на формуванні електромагнітним способом пружних ультразвукових хвиль у гірському масиві, визначенні параметрів імпульсного вихрострумного перетворення, а також амплітуди, фази і частоти сформованого супутнього акустичного сигналу, що пройшов певну відстань у досліджуваному середовищі. Доведено зв'язок певних характеристичних властивостей мінералого-технологічних властивостей гірських порід із параметрами електромагнітного акустичного перетворення зондуючих сигналів. Розглянуто основні елементи моделі процесу вихрострумного перетворення, як складової частини запропонованого методу.

У пристроях вихрострумного контролю котушка збудження, керована змінним струмом, індукує вихровий струм у зразку через електромагнітний зв'язок. У свою чергу, циркуляція вихрового струму індукує вторинне магнітне поле. Це поле змінюватиметься, якщо зміниться електропровідність та магнітна проникність зразка. Зміну в полі вловлює чутливий пристрій, яким є або котушка, або магнітний датчик.

Обчислення магнітного векторного потенціалу та щільності магнітного потоку виконано із застосуванням методу розподіленого джерела струму (DCS). DCS враховує вихрові струми та намагніченість за допомогою об'ємних і поверхневих джерел струму, що дає закриті рішення для вихрових струмів, щільності магнітного потоку та електрорушійної сили.

Імпеданс є важливим параметром, що характеризує частотну характеристику датчиків

вихрострумного контролю. Досліджена технологія, що дозволяє методом оптимізаційної процедури щодо обмеженої кількості сегментів мережі Foster обчислити імпеданс котушки вихрострумного датчика, його резистивну та індуктивну складові та визначити частоту, відповідно до якої ці складові дорівнюють одна одній. Ці параметри є характеристичними ознаками властивостей феромагнітних корисних копалин, зокрема мінералого-технологічних різновидів залізної руди. Для практичної реалізації такого підходу запропоновано застосовувати метод інтелектуального розпізнавання із застосуванням адаптивної нейро-нечіткої системи.

Ключові слова: електромагнітний перетворювач, фізичні параметри, моделювання, вихрові струми.

Вступ. Випробування із застосуванням вихрових струмів дає можливість вимірювати фізичні параметри досліджуваного середовища та наявність в ньому структурних порушень. Електромагнітні перетворення в процесі вихрострумного контролю, засновані на рівняннях Максвелла. Їх можна вирішити як у часовій, так і в частотній областях [1]. Для рішень у частотній області часові сигнали перетворюються спочатку в частотний спектр за допомогою перетворення Фур'є, а потім, пройшовши певну обробку, отримують зворотне перетворення у часову область для отримання кінцевих результатів. Як і в багатьох інших інженерних задачах, у вихрострумних

дослідженнях використовуються як аналітичні, так і числові моделі.

Останні аналітичні рішення, які якісно описують перехідні сигнали вихрових струмів у керованих напруженою ланцюгах збудження, застосовуються для випадку коаксіального зонда, що оточує довгу феромагнітну провідну трубку [2]. Використовуючи прямі рішення, розроблений новий зворотний метод, який дозволяє одночасно і точно характеризувати магнітну проникність і електропровідність. Зокрема, метод розглядає обчислені площі під масштабованими перехідними кривими сигналу вихрових струмів. У узагальненому випадку кілька характеристичних параметрів виділяються з одного перехідного сигналу, скориставшись властивістю диференціювання в частотній області перетворення Лапласа. Проведені експерименти показують, що значення проникності та провідності, розраховані для різноманітних феромагнітних і неферомагнітних трубок, добре узгоджуються із вимірюваними значеннями [2].

Відомі два основних метода вихрострумовеого контролю, які пов'язані з режимом збудження датчика: імпульсний та синусоїдальний. При використанні імпульсного режиму електромагнітне поле створюється джерелом імпульсного струму змінної амплітуди та тривалості. Цей метод відомий як метод імпульсних вихрових струмів (ПЕС) [3]. Техніка ПЕС допускає велику сферу застосування, проте вимагає складного аналізу [4,5]. З іншого боку, при синусоїдальному режимі збудження на датчик подається синусоїдальний струм заданої частоти.

Відомий також багаточастотний синусоїдальний метод за яким різні синусоїдальні складові об'єднуються в одному сигналі. Це дозволяє регулювати амплітуду певної частотної складової. Багаточастотний синусоїдальний сигнал визначається наступним виразом [6]

$$S_M(t) = \sum_{k=1}^{N_s} S_k \sin(2\pi f_k t + \Phi_k) \quad (1)$$

де Φ_k та f_k фаза і частота k -й синусоїди, N_s - кількість складових.

Обмеження пікової потужності є важливим у практичних додатках. Знижуючи пікову потужність та максимізуючи загальну енергію, що подається у фіксований час t , можна також максимізувати відношення амплітуди корисного сигналу до шуму (SNR) [7, 8].

Порівняно з традиційним вихрострумівим обстеженням, імпульсний вихровий струм (ПЕС) може забезпечити реакцію в широкому частотному діапазоні та використовувати більше інформації як у часовій, так і в частотній областях. Однак спостерігається ефект відриву, шум вимірювання та окислення поверхні зразка, які негативно впливають на характеристику часової області під час класифікації ПЕС досліджуваних зразків [9]. У цій роботі запропоновано спектральний аналіз (SA) і SA після вейвлет-розкладу (SA-WD) для виділення ознак. Аналіз головних компонентів (PCA) і лінійний дискримінантний аналіз (PCA-LDA) спрямовано на протидію розмірним методам, які використовуються для надання нижчих розмірних ознак. Класифікатор Байеса також застосовується для класифікації дефектів. Експериментальні результати демонструють, що тріщини та порожнини на поверхні та під поверхнею зразка можна задовільно класифікувати за допомогою запропонованих методів [9].

У роботі [10] на основі аналітичних рішень у часовій області для моделі ПЕС феромагнітних пластин провідність і проникність визначаються за допомогою оберненої задачі, встановленої за допомогою розрахованих і вимірюваних значень індукованої напруги. Метод ПЕС для вимірювання провідності перевіряється за допомогою методу чотирьох точок зонда на трьох пластинах з вуглецевої сталі. Крім того, досліджено вплив амплітуди імпульсного струму збудження та відриву котушок зонда на результати вимірювань.

Прикладом практичного застосування вихрострумовеого перетворення є виділення кольорових металів з твердих відходів [11]. Електромагнітна індукція може спричинити взаємодію між частинками кольорових металів, змінювати силові стани частинок і посилювати неупорядкованість траєкторій під час руху та поділу частинок. Під змінним магнітним полем, створюваним обертовим магнітним роликом, кольорові метали піддаються впливу вихрових струмів і спрямовуються в різні приймальні резервуари, завдяки чому досягається поділ між кольоровими металами та неметалами, а також між різними кольоровими металами. У роботі [11] наведено результати досліджень щодо аналізу змін у магнітному полі, вихровому струмі, силі вихрового струму, траєкторії руху та точці приземлення частинки. Розкрито механізм взаємодії між частинками за рахунок електромагнітної індукції та запропоновано спосіб реалізації, що використовує силу взаємодії між частинками.

Таблиця

**Усереднені значення фізичних параметрів,
що характеризують властивості основних різновидів гірських порід**

Гірські породи	Щільність, г/см ³	Швидкість хвиль		Магнітна сприйнятливість, 10 ⁻⁵ од. SI	Питомий електричний опір, Ом · м
		<i>V_p</i> , км/с	<i>V_s</i> , км/с		
<i>Магматичні</i>					
Ультрасновні (піроксеніт, перидотит)	3,2–3,3	7,5	4,5	1000–25 000	10 ⁵ –10 ⁸
Основні (габро, діорит)	2,9–3,0	6,0	3,8	300–15 000	10 ⁴ –10 ⁷
Кислі (грандіорит, граніт)	2,7	4,6	3,3	100–45 000	10 ³ –10 ⁶
Ефузивні (діабаз, базальт)	2,9	3,5	3,0	500–150 000	10 ⁵ –10 ⁶
<i>Метаморфічні</i>					
Гнейси, сланці	2,7	3,8	3,2	100–20 000	10 ³ –10 ⁵
<i>Осадкові</i>					
Скельні (вапняк, доломіт)	2,6	2	1,8	50–2500	100–10 ⁵
Уламкові (піски, гравійно-галькові)	2,3	0,8	0,5	50–5000	100–10 ³
Пластичні (глина, аргіліт)	1,2–2,4	1,5	0,4	10–3000	100–10 ³

У роботі [12] запропоновано використовувати метод комбінованого електромагнітного перетворення для визначення характеристик феромагнітних матеріалів, Метод заснований на формуванні електромагнітним способом пружних ультразвукових хвиль у гірському масиві, визначенні параметрів імпульсного вихрострумowego перетворення, а також амплітуди, фази і частоти сформованого супутнього акустичного сигналу, що пройшов певну відстань у досліджуваному середовищі. Метод заснований на наявності певних характеристичних властивостей мінералого-технологічних різновидів гірських порід, які можуть бути визначені із використанням електромагнітного акустичного перетворення зондуючих сигналів. В таблиці наведено усереднені значення деяких параметрів, що характеризують фізичні властивості основних різновидів гірських порід (*V_p* та *V_s* – швидкості поширення поздовжніх та поперечних пружних хвиль у гірських породах).

Практичне застосування запропонованого методу свідчить про пряму залежність надійності отриманих результатів від якості моделювання залежностей, що використані для його реалізації.

Метою роботи є моделювання основних складових і визначення характеристичних параметрів вихрострумowego перетворення електромагнітного сигналу для розпізнавання

мінералого-технологічних різновидів залізної руди.

Викладання основного матеріалу. У пристроях вихрострумowego контролю котушка збудження індукуює вихровий струм у зразку через електромагнітний зв'язок. У свою чергу, циркуляція вихрового струму індукуює вторинне магнітне поле. Це поле змінюватиметься, якщо присутній дефект, який перешкоджає вихровим струмам, або зміниться електропровідність, магнітна проникність або товщина зразка. Зміну в полі вловлює чутливий пристрій, яким зазвичай є або котушка, або магнітний датчик. Проникнення та щільність вихрового струму в зразку є важливим питанням при реалізації методу контролю на його основі. Проникнення обмежене завдяки скін-ефекту, внаслідок чого його щільність експоненціально зменшується з глибиною. Глибина скін-слою δ визначається як [13].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2)$$

де δ - глибина слою (м), μ - магнітна проникність (Гн/м), σ - електропровідність (См/м), а ω - кутова частота (рад/с).

Основоположним при розробці пристроїв вихрострумowego контролю є обчислення магнітного поля, створюваного котушкою, яка містить певну кількість витків. У статичному випадку поле можна визначити шляхом

інтегрування вздовж дроту в обчисленні Біо-Савара [14]. Однак, якщо використовується велика кількість витків, ця процедура стає непомірно дорогою. У таких випадках потрібен альтернативний метод обчислення магнітного поля, особливо якщо передбачається якийсь тип оптимізації, у якому потрібна велика кількість обчислень поля. У роботі [15] запропоновано простий метод обчислення магнітного поля, створеного круглою котушкою, яка містить велику кількість витків, намотаних на соленоїд прямокутного перерізу. Таким чином, котушка апроксимується круглим кільцем, що містить безперервну постійну густину струму, що дуже близько до реальної ситуації, коли використовується дріт прямокутного перетину. Процедура передбачає обчислення функцій, які визначаються як інтеграли періодичних величин. Це точно й ефективно виконується за допомогою квадратури трапеції.

У роботі [15] зроблено припущення про те, що фактичний соленоїд можна замінити областю з постійною густиною струму J_0 . Це наближення стає точнішим із збільшенням N . Якщо соленоїд містить велику кількість N щільно намотаних витків дроту, через який проходить деякий струм I_0 , тоді в котушці існує ефективна (постійна) щільність струму J_0

$$J_0 = \frac{NI_0}{4ab} \quad (3)$$

При цьому мається на увазі, що вісь z декартової системи координат лежить уздовж центральної лінії котушки, а нижня і верхня поверхні котушки лежать на площинах $z = -a$ та $z = a$ відповідно. Внутрішня і зовнішня поверхні котушки мають радіуси $r = R_0 - b$ та $r = R_0 + b$.

З рівнянь Максвелла випливає, що магнітну індукцію \mathbf{B} для статичного поля можна вивести з магнітного векторного потенціалу з використанням формули [14,15]

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \text{rot } \mathbf{A}(\mathbf{r}) \quad (4)$$

де $\mathbf{A}(\mathbf{r})$ задано узагальненим законом Біо-Савара [14] у формі

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \frac{J(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}'-\mathbf{r}|} dV' \quad (5)$$

де μ - магнітна проникність повітря поза котушкою.

У виразі (5) штриховані змінні відносяться до вихідних точок всередині соленоїда (\mathbf{r}'), а

нештриховані змінні позначають точки поля поза ним (\mathbf{r}).

Циліндричні полярні координати вибираються так, що точка джерела \mathbf{r}' має компоненти (r', θ', z') , а точка поля \mathbf{r} представлена як (r, θ, z) . Якщо \mathbf{i} , \mathbf{j} та \mathbf{k} позначають одиничні вектори, спрямовані вздовж осей x , y та z декартової системи координат, відповідно, тоді відповідними одиничними векторами в напрямках r , θ та z у точці поля є \mathbf{e}_r , \mathbf{e}_θ та \mathbf{k} , де

$$\mathbf{e}_r = \cos\theta\mathbf{i} + \sin\theta\mathbf{j} \quad (6)$$

$$\mathbf{e}_\theta = -\sin\theta\mathbf{i} + \cos\theta\mathbf{j} \quad (7)$$

У полярних координатах вектор щільності струму \mathbf{J} у (5) має вигляд

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}') = J_0\mathbf{e}'_\theta \quad (8)$$

де J_0 - постійна щільність струму, задана в (3).

У роботі [15] показано, що магнітний векторний потенціал \mathbf{A} , заданий формулою (5), має лише один компонент у θ -напрямку, тому

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = A_\theta(r, z)\mathbf{e}_\theta \quad (9)$$

$$A_\theta(r, z) = \frac{\mu J_0}{2\pi} \int_{z'=-a}^a \int_{r'=R_0-b}^{R_0+b} M(r', z'; r, z) r' dr' dz' \quad (10)$$

де

$$M(r', z'; r, z) = \int_0^\pi \frac{\cos\beta d\beta}{[(r')^2 + r^2 - 2rr'\cos\beta + (z' - z)^2]^{1/2}} \quad (11)$$

Оскільки векторний потенціал \mathbf{A} має лише одну компоненту, поле магнітної індукції в (4) має просту форму [15]

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = -\frac{\partial}{\partial z}(A_\theta)\mathbf{e}_r + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rA_\theta)\mathbf{k}. \quad (12)$$

Для представлення магнітної індукції в декартовій формі $\mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z)$ компоненти поля отримуються з (6)-(12) і можуть бути записані у вигляді

$$B_x = -\frac{x}{r}\frac{\partial}{\partial z}(A_\theta), \quad (13)$$

$$B_y = -\frac{y}{r}\frac{\partial}{\partial z}(A_\theta), \quad (14)$$

$$B_z = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rA_\theta), \quad (15)$$

де $x = r\cos\theta$ та $y = r\sin\theta$ відповідно до звичайних умов для циліндричних полярних координат.

Обчислення магнітного векторного потенціалу A та щільності магнітного потоку B виконано із застосуванням методу розподіленого джерела струму (DCS) та засобів, наведених у роботах [16,17]. DCS - це метод моделювання динамічних реакцій вихрових струмів, викликаних об'єктами. На відміну від звичайних чисельних методів, таких як метод скінченних елементів, DCS враховує вихрові струми та намагніченість за допомогою об'ємних і поверхневих джерел струму, що дає закриті рішення для вихрових струмів, щільності магнітного потоку та електрорушійної сили. При розрахунках використані наступні параметри котушки:

внутрішній радіус котушки - $5\text{e-}3$ м; зовнішній радіус котушки - $10\text{e-}3$ м; довжина індуктора - $7.5\text{e-}3$ м. Розрахунок проведений для кількості 50, 100 та 150 витків котушки. На рис. 1 наведено результати обчислення векторного потенціалу A у θ -напрямку із застосуванням класичного методу (потрійного інтегралу) [14] та методу DCS [16], а на рис. 2,3 представлено результати обчислення щільності магнітного потоку B_r та B_z для тих же умов.

Отримані результати свідчать про те що метод DCS практично не поступається за точністю класичному методу із застосуванням потрійного інтегралу але потребує на порядок менше часу та обчислювальних ресурсів. Це дозволяє використовувати саме цей метод для формування алгоритмічної бази засобів вихрострумовевого контролю.

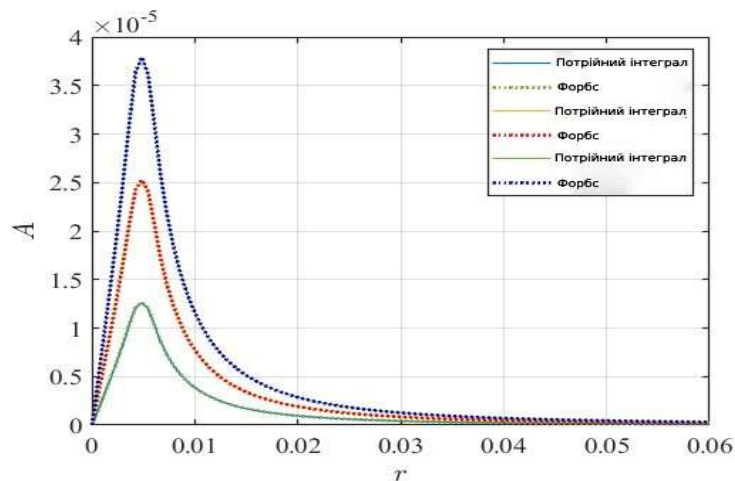


Рис. 1. Результати обчислення векторного потенціалу A соленоїду із застосуванням класичного методу (потрійного інтегралу) та методу DCS

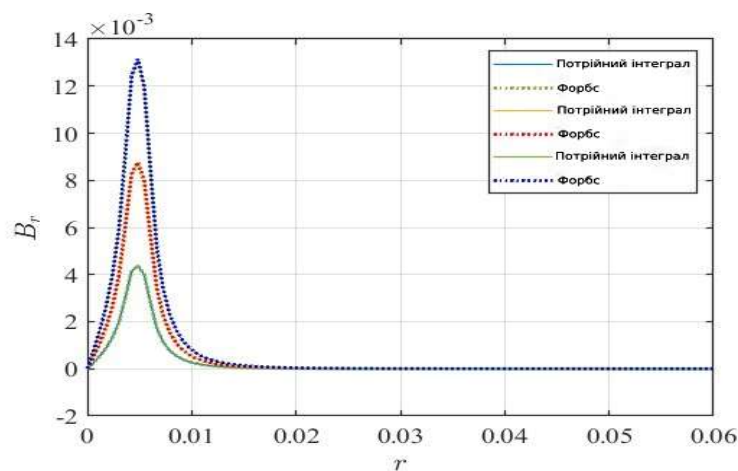


Рис. 2. Результати обчислення щільності магнітного потоку B_r соленоїду із застосуванням класичного методу (потрійного інтегралу) та методу DCS

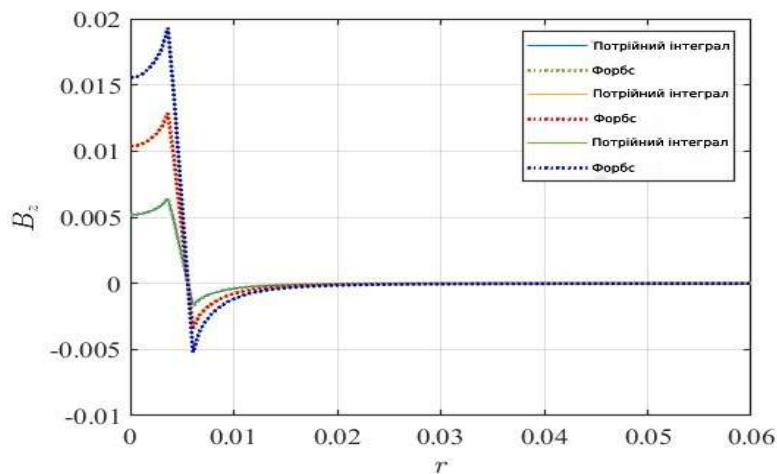


Рис. 3. Результати обчислення щільності магнітного потоку B_z соленоїду із застосуванням класичного методу (потрійного інтегралу) та методу DCS

Імпеданс є важливим параметром, що характеризує частотну характеристику датчиків вихрострумного контролю. Зазвичай імпеданс визначається як повний опір пристрою або ланцюга протікання змінного струму заданої частоти і представляється комплексною величиною [18]. Вектор імпедансу складається з дійсної частини R і уявної частини X . Дійсна частина є опір, а уявна частина позначає реактивний опір, який може бути або індуктивним, або ємнісним. Для отримання імпедансу необхідно виміряти як дійсну, так і уявну частини. У роботі [19] надано інформацію стосовно основних методів, що застосовуються для цього.

Розрахунок електричного опору котушки, включаючи вихрові струми у циліндричному сердечнику, наведено у роботі [20]. Динаміка вихрових струмів визначається напруженістю магнітного поля \mathbf{H} феромагнітного матеріалу з втратами, що регулюється рівнянням дифузії

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (16)$$

де μ - магнітна проникність, а σ - електропровідність матеріалу.

Індуктивність індуктора без вихрових струмів з котушкою з N витків, радіусом a , намотаними на магнітопроводі з проникністю μ і довжиною l визначається виразом [20]

$$L_0 = \mu N^2 2\pi a^2 / l \quad (17)$$

З урахуванням наведеного імпеданс можна обчислити за формулою [20,21]

$$Z = j\omega L_0 \left[\frac{2J_1(j\beta a)}{j\beta a J_0(j\beta a)} \right] \quad (18)$$

де $\beta = \sqrt{j\omega\sigma\mu}$; σ - електропровідність матеріалу сердечника.

В області низьких частот $|\beta a| \ll 1$ і останній множник у рівнянні (17) наближається до одиниці. Таким чином, низькочастотна індуктивність L_0 визначається рівнянням (17). Тобто це значення, яке може бути розраховано для сердечника без вихрових струмів.

У високочастотній асимптотичній області $|\beta a| \gg 1$ і імпеданс стає

$$Z \rightarrow \sqrt{j\omega L_0 R_0} = \frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega L_0 R_0} \quad (19)$$

де опір R_0 (не є фактичним фіксованим опором) визначається як

$$R_0 = \frac{4\pi N^2}{\sigma l} \quad (20)$$

У термінах, використаних у рівнянні (17), можна отримати

$$\beta a = 2\sqrt{j\omega L_0 / R_0} \quad (21)$$

Значення R_0 можна обчислити на основі детального знання конструкції або його можна визначити з вимірювання імпедансу в асимптотичній області високої частоти та за допомогою рівняння (19). Фактично, на всіх частотах імпеданс повністю характеризується значеннями L_0 і R_0 , використовуючи рівняння (17) і (21).

Приклад розрахованого таким чином імпедансу показано на рис. 4. При цьому застосовані сценарій та засоби, наведені у роботах [22,23]. Розрахунок проведений для $R_0 = 0.75$ Ом та $L_0 = 0.004$ Гн.

З цього графіка можна побачити, що імпеданс є індуктивним на низьких частотах з індуктивністю L_0 , і стає напівіндуктивним на частоті, де $R_0 = j\omega L_0$, і залишається напівіндуктивним на всіх вищих частотах.

У роботі [21] доведено, що цей імпеданс можна моделювати за допомогою нескінченної сходої мережі Сауер. Усічення цієї мережі забезпечує наближення з обмеженою смугою, яке є дуже точним на низьких частотах і стає менш точним із збільшенням частоти. Хоча ця мережа може забезпечити довільну точність, для цього потрібно багато компонентів [21].

Велика кількість компонентів, необхідна для точності мережі Сауер, спонукає до пошуку

альтернативи з меншою кількістю компонентів [24-26]. Мережа Foster (послідовне з'єднання набору паралельних ділянок LR) може забезпечити розумну точність з набагато меншою кількістю компонентів.

Запропонований у роботі [21-24] метод, полягає у використанні структури Foster та запуску завдання оптимізації для вибору значень компонентів, які мінімізують помилку апроксимації імпедансу. Вирішується задача знаходження мережі Foster, імпеданс якої приблизно збігається з опором наведеної вище котушки з втратами. При цьому R і L є векторами значень для резисторів і котушок індуктивності в мережі і значення цих векторів обираються таким чином, щоб мінімізувати помилку в наближенні «точного» значення, обчисленого вище.

Результати цього процесу оптимізації показані на рис. 5. Це наближення використовує чотири пари Foster [21,22].

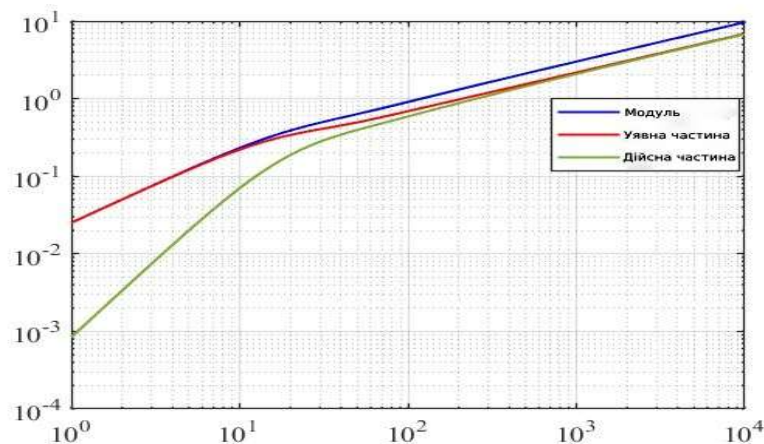


Рис. 4. Електричний опір вихрострумового датчика, змодельованого у вигляді циліндричного індуктора із сердечником з магнітного матеріалу

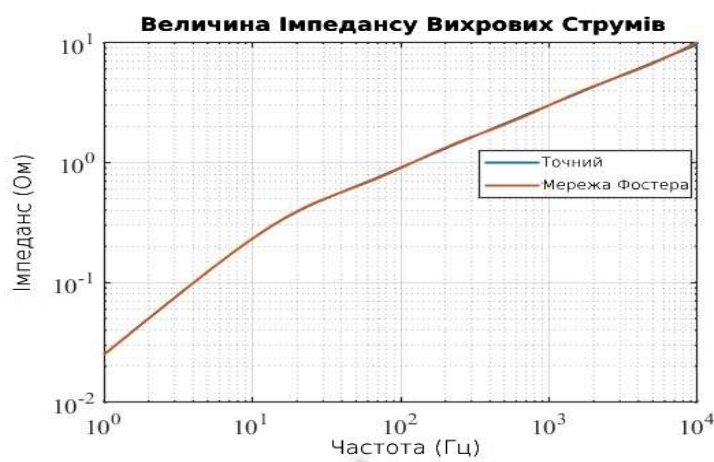


Рис. 5. Результат виконання оптимізаційної процедури щодо компонентів мережі Foster для наближення імпедансу індуктора до теоретичного значення

Як слідує з рис. 5 використана процедура обчислення значень резисторів Foster та котушок індуктивності дають прийнятне наближення до імпедансу котушки: два отриманих графіка важко розрізнити.

Досліджений у роботі [12] акустичний перетворювач електромагнітного типу (ЕМАП) являє собою розподілену структуру, що складається з джерела змінного магнітного поля і деякого об'єму феромагнітного компонента гірської породи, де відбуваються процеси перетворення енергії електромагнітного поля в енергію пружних коливань частинок середовища. Разом з тим також відбуваються зміни імпедансу ЕМАП в залежності від характеристик гірської породи.

Наведена вище технологія дозволяє методом оптимізаційної процедури щодо обмеженої кількості сегментів мережи Foster обчислити імпеданс котушки вихрострумного датчика, його резистивну та індуктивну складові та визначити частоту, відповідно до якої ці складові дорівнюють одна одній. Ці параметри є характеристичними ознаками властивостей феромагнітних корисних копалин, зокрема мінералого-технологічних різновидів залізної руди. Для практичної реалізації такого підходу доцільно застосовувати метод інтелектуального розпізнавання із застосуванням адаптивної нейро-нечіткої системи, опис якої надано у роботах [27-29].

Висновки. Запропонований метод визначення характеристик залізної руди на основі електромагнітного акустичного перетворення. Він включає формування під дією імпульсного магнітного поля у феромагнітному середовищі ультразвукових хвиль та вихрових струменів, визначення супутніх параметрів, що характеризують ці процеси та їх узгодження з властивостями середовища, де вони відбуваються. Розглянуто основні елементи моделі процесу вихрострумного перетворення, як складової частини запропонованого методу.

Основоположним при розробці пристроїв вихрострумного контролю є обчислення магнітного поля, створюваного котушкою, яка містить певну кількість витків. Вихрові струми в матеріалах магнітного сердечника викликані змінними в часі магнітними полями. Ці зміни щільності поля індукують потенціали напруги всередині матеріалу, змушуючи струм протікати в замкнених контурах. Доведено доцільність застосування методу розподіленого джерела струму для обчислення магнітного векторного

потенціалу та щільності магнітного потоку у котушці вихрострумного датчика.

Імпеданс є важливим параметром, що характеризує частотну характеристику датчиків вихрострумного контролю. Він визначається як повний опір датчика або ланцюга протікання змінного струму заданої частоти і представляється комплексною величиною. Для підвищення точності визначення імпедансу вихрострумного датчика доцільно використовувати модель на основі мережи Foster та оптимізаційну процедуру для вибору значень компонентів, які мінімізують помилку апроксимації цього параметру.

Таким чином, отримані результати дозволяють сформулювати основні елементи моделі вихрострумного перетворення для реалізації комбінованого електромагнітного акустичного методу визначення характеристик залізної руди.

Л і т е р а т у р а

1. Li Y, Tian G Y, Simm A. Fast analytical modelling for pulsed eddy current evaluation. *NDT E Int.*, 2008, 41(6): 477–483.
2. Desjardins D, Krause T W, Clapham L. Transient eddy current method for the characterization of magnetic permeability and conductivity. *NDT E Int.*, 2016, 80: 65–70.
3. Ala Eddine Lakhdari, Ahmed Cheriet, Islam Nacereddine El-Ghoul. Skin effect based technique in eddy current non-destructive testing for thickness measurement of conductive material. *IET Circuits, Devices & Systems*. 2019, Volume13, Issue2, p. 255-259. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5322>.
4. Bour, J.-C., Zubiri, E., Vasseur, P. et. al. Étude de la répartition des courants de Foucault pulsés dans une configuration de contrôle non destructive. *J. Phys.* III, 1996, 6, (1), pp. 7–22.
5. Popovic, Z., Popovic, B.D. *Introductory electromagnetics*. (Prentice hall Upper Saddle River, NJ, USA, 2000).
6. Kharudin Bin Ali, Ahmed N. Abdalla, Damhuji Rifai, Moneer A. Faraj. Review on system development in eddy current testing and technique for defect classification and characterization. *IET Circuits, Devices & Systems, Special Issue: Developments and Advancements on Electronics Education*. 2017, Volume 11, Issue 4, P. 338-351. doi: 10.1049/iet-cds.2016.0327.
7. Betta G., Ferrigno L., Laracca M., et al: 'Optimized complex signals for eddy current testing'. *IEEE Instrumentation Measurement Technology Conf.*, 2014, pp. 1120–1125
8. Schroeder M.R.: 'Synthesis of low-peak-factor signals and binary sequences with low

- autocorrelation', IEEE Trans. Inf. Theory, 1970, 16, (1), pp. 85–89
9. Xuanbing Qiu, Peng Zhang, Jilin Wei, Xiaochao Cui, Chao Wei, Lulu Liu. Defect classification by pulsed eddy current technique in con-casting slabs based on spectrum analysis and wavelet decomposition. *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 203, 1 December 2013, Pages 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.09.004>.
 10. Xingle Chen, Yinzhaoli. Electrical conductivity measurement of ferromagnetic metallic materials using pulsed eddy current method. - *NDT & E International*, Volume 75, October 2015, Pages 33-38. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.06.005>.
 11. Zhicheng Shan, Yi Yuan, Bin Cao, Shilong Miao, Guojian Li, Qiang Wang. The effect of interaction between particles on eddy current separation. - *Separation and Purification Technology*, Volume 346, 2024, 127382. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127382>.
 12. Моркун В. С., Моркун Н. В., Грищенко С.М., Гапоненко А. А., Гапоненко І. А., Бобров Є. Ю. Моделювання електромагнітного акустичного перетворювача. *Гірничий вісник, Кривий Ріг*, 2023. Вип. 111. с. 88-95.
 13. Sophian, A., Tian, G. & Fan, M. Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review. *Chin. J. Mech. Eng.* 30, 500–514 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0122-4>.
 14. S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. Van Dum, *Fields and Waves in Communication Electronics*.
 15. Forbes, L. K., Crozier, S., Doddrell, D. M. Rapid computation of static fields produced by thick circular solenoids. - *IEEE Transactions on Magnetics*, 1997, vol. 33, issue 5, pp. 4405-4410. DOI:10.1109/20.620453.
 16. B. J. Hao, K. M. Lee, and K. Bai, "Distributed current source modeling method for 3D eddy current problem in magnetic conductor with discrete state-space J-φ formulation," *Journal of Computational Physics*, vol. 401, Jan. 2020. doi: 10.1016/j.jcp.2019.109027.
 17. Distributed Current Source. <https://github.com/wei-chen-li/Distributed-Current-Source>.
 18. Xia, Z.; Huang, R.; Chen, Z.; Yu, K.; Zhang, Z.; Salas-Avila, J.R.; Yin, W. Eddy Current Measurement for Planar Structures. *Sensors* 2022, 22,8695. <https://doi.org/10.3390/s22228695>.
 19. Technologies Keysight. *Impedance Measurement Handbook*. Available online: www.keysight.com.
 20. Vanderkooy, J., A Model of Loudspeaker Driver Impedance incorporating eddy currents in the pole structure," *J. Audio Eng. Soc.*, 37(37), pp. 119-128, 1989.
 21. Thompson, S. C. and Warren, D. M., "Analog circuit model for loudspeakers including eddy current behavior and suitable for time domain simulation," AES Convention Paper 9826, 143rd Convention, 2017.
 22. Steve Thompson. MathWorks files for inductor with eddy currents in core. <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/80218-mathworks-files-for-inductor-with-eddy-currents-in-core>.
 23. Thompson, Stephen Simscape model for Eddy Currents in a Cylindrical Core [Data set]. *Scholarsphere*. 2024. <https://doi.org/10.26207/3h14-4190>.
 24. Thompson, S. C., Warren, D. M. and Gabrielson, T. B. Analog model for thermoviscous propagation in a cylindrical tube, *J. Acoust. Soc. Am.*135(2) pp. 585-590.
 25. Bilbao, S. and Harrison, R., "Passive time-domain numerical models of viscothermal wave propagation in acoustic tubes of variable cross section," *J. Acoust. Soc. Am.*140(1) 728 (2016). doi: 10.1121/1.4959025.
 26. Thibault, A. and Chabassier, J., "Dissipative time-domain one-dimensional model for viscothermal acoustic propagation in wind instruments," *J. Acoust. Soc. Am.*150(2) 1165 (2021). doi: 10.1121/10.0005537
 27. Morkun, V., Morkun, N., Fischerauer, G., Tron, V., Haponenko, A., & Bobrov, Y. Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*. 2024. 18(3), 1-8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.
 28. Morkun, N., Fischerauer, G., Tron, V., Gaponenko, A. Mineralogical Analysis of Iron Ore Using Ultrasonic Wave Propagation Parameters. - *Acta Mechanica et Automatica*, 2023, 17(3), p. 364-371.
 29. Morkun V.S., Morkun N.V., Tron V.V., Serdiuk O.Y., Haponenko A. Use of backscattering ultrasound parameters for iron ore varieties recognition. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2023, No 6, pp. 19-24. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-6/019>.

References

1. Li Y, Tian G Y, Simm A. Fast analytical modelling for pulsed eddy current evaluation. *NDT E Int.*, 2008, 41(6): 477–483.
2. Desjardins D, Krause T W, Clapham L. Transient eddy current method for the characterization of magnetic permeability and conductivity. *NDT E Int.*, 2016, 80: 65–70.
3. Ala Eddine Lakhdari, Ahmed Cheriet, Islam Nacereddine El-Ghoul. Skin effect based technique in eddy current non-destructive testing for thickness measurement of conductive material. *IET Circuits, Devices & Systems*. 2019, Volume13, Issue2, p. 255-259. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5322>.
4. Bour, J.-C., Zubiri, E., Vasseur, P. et. al. Étude de la répartition des courants de Foucault pulsés dans une configuration de contrôle non destructive. *J. Phys.* III, 1996, 6, (1), pp. 7–22.

5. Popovic, Z., Popovic, B.D. Introductory electromagnetics. (Prentice hall Upper Saddle River, NJ, USA, 2000).
6. Kharudin Bin Ali, Ahmed N. Abdalla, Damhuji Rifai, Moneer A. Faraj. Review on system development in eddy current testing and technique for defect classification and characterization. IET Circuits, Devices & Systems, Special Issue: Developments and Advancements on Electronics Education. 2017, Volume 11, Issue 4, P. 338-351. doi: 10.1049/iet-cds.2016.0327.
7. Betta G., Ferrigno L., Laracca M., et al: 'Optimized complex signals for eddy current testing'. IEEE Instrumentation Measurement Technology Conf., 2014, pp. 1120–1125
8. Schroeder M.R.: 'Synthesis of low-peak-factor signals and binary sequences with low autocorrelation', IEEE Trans. Inf. Theory, 1970, 16, (1), pp. 85–89
9. Xuanbing Qiu, Peng Zhang, Jilin Wei, Xiaochao Cui, Chao Wei, Lulu Liu. Defect classification by pulsed eddy current technique in con-casting slabs based on spectrum analysis and wavelet decomposition. - Sensors and Actuators A: Physical, Volume 203, 1 December 2013, Pages 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.09.004>.
10. Xingle Chen, Yinzhaoli. Electrical conductivity measurement of ferromagnetic metallic materials using pulsed eddy current method. - NDT & E International, Volume 75, October 2015, Pages 33-38. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.06.005>.
11. Zhicheng Shan, Yi Yuan, Bin Cao, Shilong Miao, Guojian Li, Qiang Wang. The effect of interaction between particles on eddy current separation. - Separation and Purification Technology, Volume 346, 2024, 127382. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127382>.
12. Morkun V. S., Morkun N. V., Ghryshhenko S.M., Haponenko A. A., Haponenko I. A., Bobrov Je. Ju. Modeljuvannja elektromagnitnogo akustychnogo peretvorjuvacha. Ghirnychyj visnyk, Kryvyj Righ, 2023. Vyp. 111. S. 88-95.
13. Sophian, A., Tian, G. & Fan, M. Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review. Chin. J. Mech. Eng. 30, 500–514 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0122-4>.
14. S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. Van Dum, Fields and Waves in Communication Electronics.
15. Forbes, L. K., Crozier, S., Doddrell, D. M. Rapid computation of static fields produced by thick circular solenoids. - IEEE Transactions on Magnetics, 1997, vol. 33, issue 5, pp. 4405-4410. DOI:10.1109/20.620453.
16. B. J. Hao, K. M. Lee, and K. Bai, "Distributed current source modeling method for 3D eddy current problem in magnetic conductor with discrete state-space $J\text{-}\phi$ formulation," Journal of Computational Physics, Vol. 401, Jan. 2020. doi: 10.1016/j.jcp.2019.109027.
17. Distributed Current Source. <https://github.com/weichen-li/Distributed-Current-Source>.
18. Xia, Z.; Huang, R.; Chen, Z.; Yu, K.; Zhang, Z.; Salas-Avila, J.R.; Yin, W. Eddy Current Measurement for Planar Structures. Sensors 2022, 22,8695. <https://doi.org/10.3390/s22228695>.
19. Technologies Keysight. Impedance Measurement Handbook. Available online: www.keysight.com.
20. Vanderkooy, J., A Model of Loudspeaker Driver Impedance incorporating eddy currents in the pole structure," J. Audio Eng. Soc., 37(37), Pp. 119-128, 1989.
21. Thompson, S. C. and Warren, D. M., "Analog circuit model for loudspeakers including eddy current behavior and suitable for time domain simulation," AES Convention Paper 9826, 143rd Convention, 2017.
22. Steve Thompson. MathWorks files for inductor with eddy currents in core. <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/80218-mathworks-files-for-inductor-with-eddy-currents-in-core>.
23. Thompson, Stephen Simscape model for Eddy Currents in a Cylindrical Core [Data set]. Scholarsphere. 2024. <https://doi.org/10.26207/3h14-4190>.
24. Thompson, S. C., Warren, D. M. and Gabrielson, T. B. Analog model for thermoviscous propagation in a cylindrical tube, J. Acoust. Soc. Am.135(2) pp. 585-590.
25. Bilbao, S. and Harrison, R., "Passive time-domain numerical models of viscothermal wave propagation in acoustic tubes of variable cross section," J. Acoust. Soc. Am.140(1) 728 (2016). doi: 10.1121/1.4959025.
26. Thibault, A. and Chabassier, J., "Dissipative time-domain one-dimensional model for viscothermal acoustic propagation in wind instruments," J. Acoust. Soc. Am.150(2) 1165 (2021). doi: 10.1121/10.0005537
27. Morkun, V., Morkun, N., Fischerauer, G., Tron, V., Haponenko, A., & Bobrov, Y. Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. Mining of Mineral Deposits. 2024. 18(3), 1-8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.
28. Morkun, N., Fischerauer, G., Tron, V., Gaponenko, A. Mineralogical Analysis of Iron Ore Using Ultrasonic Wave Propagation Parameters. - Acta Mechanica et Automatica, 2023, 17(3), p. 364-371.
29. Morkun V.S., Morkun N.V., Tron V.V., Serdiuk O.Y., Haponenko A. Use of backscattering ultrasound parameters for iron ore varieties recognition. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2023, No 6, pp. 19-24. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-6/019>.

Morkun V.S., Morkun N.V., Oliynyk TA., Hryshchenko Y.O. Modeling of eddy current transformation of an electromagnetic signal to solve the problem of determining the characteristics of iron ore

The method of combined electromagnetic transformation for determining the characteristics of ferromagnetic materials is proposed. The method is based on the formation of elastic ultrasonic waves in a rock mass by electromagnetic means and the determination of the parameters of the pulsed eddy current transformation, as well as the amplitude, phase, and frequency of the generated accompanying acoustic signal that has traveled a certain distance in the studied environment. The connection of certain characteristic properties of mineralogical and technological properties of rocks with the parameters of electromagnetic acoustic transformation of sounding signals is proved. The main elements of the model of the eddy-current transformation process as an integral part of the proposed method are considered.

In eddy-current monitoring devices, an AC-driven excitation coil induces an eddy current in the sample through electromagnetic coupling. In turn, the circulation of the eddy current induces a secondary magnetic field. This field will change if the electrical conductivity and magnetic permeability of the sample change. The change in the field is detected by a sensing device, which is either a coil or a magnetic sensor.

The magnetic vector potential and magnetic flux density are calculated using the distributed current source (DCS) method. DCS takes into account eddy currents and magnetization using bulk and surface current sources, which provides closed-form solutions for eddy currents, magnetic flux density, and electromotive force.

The impedance is an important parameter characterizing the frequency response of eddy current sensors. A technology has been investigated that allows, using an optimization procedure for a limited number of segments of the Foster network, to calculate the impedance of the eddy current sensor coil, its resistive and inductive components, and to determine the frequency at which these components are equal to each other. These parameters are characteristic features of the properties of ferromagnetic minerals, in particular, mineralogical and technological types of iron ore. For the practical implementation of this approach, it is proposed to apply the method of intelligent recognition using an adaptive neuro-fuzzy system.

Keywords: *electromagnetic transducer, physical parameters, modeling, eddy currents.*

Моркун Володимир Станіславович – д-р техн. наук, проф., професор Криворізького національного університету (Кривий Ріг), morkunv@gmail.com.

Моркун Наталя Володимирівна – д-р техн. наук, проф., професор Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів), nmorkun@gmail.com.

Олійник Тетяна Антоліївна – д-р техн. наук, проф., завідувачка кафедри збагачення корисних копалин і хімії Криворізького національного університету (Кривий Ріг), zkkh@knu.edu.ua

Грищенко Ярослав Олександрович – аспірант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Київ), grischencokogtl@gmail.com.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-79-89>

УДК 629.463.65

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ ЕПОКСИДНОГО ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ НЕСІВНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ЗАСОБІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Фомін О.В., Козинка О.С., Красулін О.С., Саченок Д.С.

ANALYSIS OF THE PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF EPOXY PROTECTIVE COATING FOR LOAD-BEARING METAL STRUCTURES OF RAILWAY TRANSPORT VEHICLES

Fomin O.V., Kozynka O.S., Krasulin A.S., Sachenok D.S.

В роботі було проаналізовано перспективи застосування епоксидного захисного покриття для несівних металокопструкцій для залізничного транспорту. Епоксидні смоли відіграють важливу роль у захисті, зміцненні та подовженні терміну служби несучих металокопструкцій, особливо в агресивних середовищах. Сучасні епоксидні покриття розробляються з урахуванням екологічних стандартів і менше шкодять навколишньому середовищу. Використання нанотехнологій дозволяє створювати покриття з кращими властивостями. Дослідження допоможуть знайти оптимальні покриття для різних типів залізничних засобів і умов їх використання, таких як холодний клімат або морські перевезення. Відповідність стандартам безпеки та довговічності є обов'язковою для експлуатації залізничного транспорту, тому важливо вивчати можливості використання епоксидних покриттів. Епоксидні покриття, які добре захищають від корозії, можуть значно подовжити термін служби вагонів, зменшити витрати на ремонт і заміну, а також знизити потребу в частому фарбуванні. Це важливо для вагонів, що перевозять небезпечні вантажі або пасажирів, де надійність копструкцій є особливо важливою. Був проведений аналіз існуючих технологій захисту металевих копструкцій залізничного транспорту від корозії та інших негативних впливів. Технологій захисту металевих копструкцій залізничного транспорту (вагони, платформи, цистерни, візки тощо) від корозії та інших негативних впливів (механічного зносу, вологи, хімії, УФ-випромінювання, вібрацій) Дослідження властивостей епоксидних матеріалів, їх переваг та недоліків у порівнянні з

іншими типами захисних покриттів. Вивчення впливу факторів експлуатації залізничного транспорту (вібрації, температурні коливання, агресивне середовище) на довговічність епоксидних покриттів. Вивчення фізико-хімічних, механічних та антикорозійних властивостей епоксидних матеріалів, що застосовуються для покриття та захисту металевих копструкцій (особливо в галузі залізничного транспорту, мостобудування, промислових споруд). Аналіз методів нанесення епоксидних покриттів на металеві копструкції, а також оцінка їх економічної ефективності. Розробка рекомендацій щодо вибору та застосування епоксидних захисних покриттів для несінних металокопструкцій засобів залізничного транспорту.

Ключові слова: транспортна механіка, перевезення, вагони, рухомий склад, промисловість, автоматизація, ремонт, експлуатація, надійність

Вступ. Актуальність наукового визначення перспектив застосування епоксидного захисного покриття для несівних металокопструкцій засобів залізничного транспорту зумовлена необхідністю забезпечення безпеки, довговічності та економічної ефективності залізничного транспорту. Несівні металокопструкції засобів залізничного транспорту, особливо в умовах підвищеної вологості та агресивного середовища, схильні до інтенсивної корозії, що знижує їх міцність і надійність, створюючи ризики аварійних ситуацій. Епоксидні покриття,

відомі своєю високою стійкістю до корозії, можуть значно подовжити термін служби вагонів, зменшити витрати на ремонт і заміну, а також забезпечити довготривалий захист, знижуючи необхідність частого повторного фарбування. Це особливо важливо для вагонів, що використовуються для перевезення небезпечних вантажів або пасажирів, де надійність конструкцій є критично важливою. Сучасні епоксидні покриття розробляються з урахуванням екологічних вимог, зменшуючи негативний вплив на навколишнє середовище, а використання нанотехнологій відкриває нові перспективи для створення покриттів з покращеними властивостями. Дослідження також дозволять визначити оптимальні типи покриттів для різних типів засобів залізничного транспорту та умов їх експлуатації, адаптуючи їх до специфічних умов, таких як арктичний клімат або морські перевезення. Відповідність нормативним вимогам до безпеки та довговічності залізничного транспорту є обов'язковою умовою для експлуатації вагонів, що робить наукове визначення перспектив застосування епоксидного захисного покриття актуальною та важливою задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Стаття [1] аналізує ринок вагонобудування України, зосереджуючись на конкурентоспроможності підприємств у контексті світового ринку та країн СНД, однак, її актуальність обмежена часом публікації, оскільки не враховані сучасні економічні та політичні фактори. Попри це, робота корисна для розуміння загальних тенденцій ринку, але потребує доповнення практичним застосуванням досліджень для більш повної картини.

У статті [2] детально описуються властивості епоксидних захисних покриттів, їх переваги та недоліки. Також аналізуються різні методи нанесення цих покриттів на металеві поверхні. Однак, на жаль, публікація не приділяє достатньої уваги перспективам застосування епоксидного захисного покриття для несівних металоконструкцій засобів залізничного транспорту, що обмежує розуміння потенційних можливостей їх використання в цій галузі.

Робота [3] пропонує теоретичну модель оцінки конкурентної позиції машинобудівних підприємств, що корисна для розуміння теоретичних аспектів конкурентоспроможності. Однак, робота не містить практичного застосування запропонованої моделі, що

обмежує її цінність для реальних бізнес-ситуацій. Крім того, стаття потребує доповнення сучасними дослідженнями, щоб відобразити зміни ринку та економічні фактори, що відбулися з моменту її публікації.

Публікація [4] детально описує властивості епоксидних захисних покриттів, їх переваги та недоліки, а також аналізує різні методи їх нанесення на металеві поверхні. Однак, на жаль, публікація не приділяє достатньої уваги перспективам застосування епоксидного захисного покриття для несівних металоконструкцій засобів залізничного транспорту, що обмежує розуміння потенційних можливостей їх використання в цій галузі.

Стаття [5] детально описує властивості епоксидних захисних покриттів, їх переваги та недоліки, а також аналізує різні методи їх нанесення на металеві поверхні. Однак, на жаль, публікація не приділяє достатньої уваги перспективам застосування епоксидного захисного покриття для несівних металоконструкцій засобів залізничного транспорту, що обмежує розуміння потенційних можливостей їх використання в цій галузі.

Автори статті [6] року аналізує вплив фінансово-економічної кризи 2008 року на залізничний транспорт України, детально розглядаючи конкретні аспекти впливу. Хоча робота корисна для розуміння загальних тенденцій впливу кризових явищ на транспортну галузь, її актуальність обмежена часом публікації, оскільки не враховує сучасні кризові явища. Тому, для повної картини, необхідний сучасний аналіз впливу поточних економічних та політичних факторів на залізничний транспорт України.

Стаття [7] фокусується на визначенні ефективності реалізації потенціалу конкурентоспроможності вагонобудівних підприємств, пропонуючи методи оцінки. Хоча дослідження має відносно сучасний аналіз та корисне для розуміння теоретичних аспектів конкурентоспроможності, воно має теоретичний характер. Тому, для повної картини, необхідне практичне застосування запропонованої моделі, щоб оцінити її ефективність у реальних бізнес-ситуаціях.

Стаття [8] детально розглядає властивості та методи нанесення захисних покриттів, аналізуючи їх переваги та недоліки. Однак, на жаль, в публікації не приділено достатньої уваги перспективам застосування цих покриттів для несівних металоконструкцій засобів транспорту, що обмежує розуміння їх

потенціалу. Отже, необхідні додаткові дослідження для поглибленого вивчення цього аспекту.

Дослідження [9] розглядає підвищення ефективності процесів експлуатації та технічного обслуговування рухомого складу на залізничному транспорті, аналізуючи систему ремонтних підприємств галузі. Хоча робота корисна для розуміння теоретичних аспектів управління, її актуальність обмежена часом публікації, оскільки не враховує сучасні технології та зміни в галузі. Тому, для повної картини, необхідне практичне застосування запропонованої моделі, щоб оцінити її ефективність у реальних бізнес-ситуаціях, а також сучасні дослідження.

Наукова стаття [10] досліджує вплив графена та його похідних на антикорозійні властивості водорозчинних поліуретанових покриттів, проводячи експериментальне дослідження. Хоча робота має науковий характер і буде корисна для матеріалознавців, її актуальність може бути обмежена через відсутність аналізу впливу сучасних технологій, що швидко розвиваються. Тому, для повної картини, необхідні сучасні дослідження, які б враховували останні досягнення в цій галузі.

Ця стаття [11], опублікована у 2023 році, присвячена дослідженню сучасних методів випробування лакофарбових покриттів на стійкість до корозії. Автори надають детальний аналіз сучасних методів випробувань, що має велике практичне значення для галузей, де використовуються лакофарбові покриття. Науковий характер робить її цінним ресурсом для фахівців у цій галузі.

Стаття [12], представлена на міжнародній конференції IEEE у 2018 році, розглядає розробку структури інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для локомотивів та оцінює якість її роботи. Вона описує сучасні технології, що використовуються в цій системі, та має науковий характер. Стаття висвітлює важливі питання, пов'язані з автоматизацією транспорту, що робить її цінною для фахівців у цій галузі.

Стаття [13] 2024 року, опублікована в журналі *Renewable Energy*, досліджує використання біопалива в морських дизельних двигунах з метою забезпечення сталого та безпечного морського транспорту. Вона описує сучасні технології, що застосовуються в цій галузі, та має науковий характер. Стаття висвітлює важливі питання, пов'язані з

екологічністю транспорту, що робить її актуальною та цінною для фахівців у цій сфері.

Стаття [14] в науковому віснику Національного гірничого університету, присвячена теоретичному та практичному визначенню параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії підземного рухомого складу. Вона описує сучасні технології, що застосовуються в цій галузі, та має науковий характер. Стаття висвітлює важливі питання, пов'язані з автоматизацією транспорту, зокрема підземного, що робить її актуальною та цінною для фахівців у цій сфері.

Робота [15] детально розглядає властивості та методи нанесення захисних покриттів, аналізуючи їхні переваги та недоліки. Однак, на жаль, у публікації не приділено достатньої уваги перспективам застосування цих покриттів для несівних металокопункцій засобів транспорту, що обмежує розуміння їхнього потенціалу. Отже, необхідні додаткові дослідження для поглибленого вивчення цього аспекту.

Наукова стаття [16], опублікована у 2024 році, присвячена дослідженню новітніх технологій в екологічно безпечних полімерних покриттях. Автори надають детальний аналіз сучасних технологій та перспектив розвитку цієї галузі. Стаття має велике практичне значення для галузей, де використовуються полімерні покриття, та відрізняється науковим характером.

Наукова публікація [17], виконана у 2022 році в журналі «*J. Mar. Sci. Eng.*», присвячена забезпеченню екологічної безпеки бурових суден під час їх роботи в особливих екологічних районах Північної Європи. Автори описують сучасні технології, спрямовані на підвищення екологічності морського транспорту. Стаття має науковий характер і висвітлює важливі питання, пов'язані з екологічною безпекою морського транспорту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій виявляє недостатню увагу до перспектив застосування епоксидних захисних покриттів для металокопункцій залізничного транспорту. Необхідно провести більш глибокі дослідження для визначення оптимальних складів та методів нанесення епоксидних покриттів. Важливо врахувати специфічні умови експлуатації залізничного транспорту, такі як вібрація, температурні коливання та вплив агресивних середовищ. Це також дозволить зменшити витрати на ремонт та обслуговування залізничного транспорту.

Подальші дослідження в цій галузі є важливими для забезпечення безпеки та ефективності залізничних перевезень.

Мета. Мета науково-прикладної статті полягає у дослідженні можливостей та ефективності використання епоксидних матеріалів для підвищення довговічності та надійності металевих конструкцій, що експлуатуються в умовах залізничного транспорту.

Задачі для досягнення поставленої мети:

– аналіз існуючих технологій захисту металевих конструкцій залізничного транспорту від корозії та інших негативних впливів;

– дослідження властивостей епоксидних матеріалів, їх переваг та недоліків у порівнянні з іншими типами захисних покриттів;

– вивчення впливу факторів експлуатації залізничного транспорту (вібрації, температурні коливання, агресивне середовище) на довговічність епоксидних покриттів;

– аналіз методів нанесення епоксидних покриттів на металеві конструкції, а також оцінка їх економічної ефективності;

– розробка рекомендацій щодо вибору та застосування епоксидних захисних покриттів для несінних металоконструкцій засобів залізничного транспорту.

Виклад основного матеріалу. Епоксидні смоли – це група термореактивних полімерів, які після затвердіння утворюють міцний, хімічно стійкий та довговічний матеріал. Вони використовуються в промисловості, будівництві, автомобілебудуванні, авіації, суднобудуванні та багатьох інших галузях. Характеризуються наявністю однієї або більше гліцидильних чи епоксидних функціональних груп у своїй молекулярній структурі. У немодифікованому стані вони проявляють термопластичні властивості. Смоли демонструють розчинність в ацетоні та інших органічних розчинниках, а також стабільність при тривалому зберіганні. Однак, при ініціюванні реакції з затверджувачами, відбувається процес полімеризації, що призводить до формування тривимірної полімерної сітки без виділення низькомолекулярних побічних продуктів.

Модифікація епоксидних смол може бути досягнута шляхом введення фенольно-альдегідних, кремнійорганічних та інших полімерів, а також жирних кислот рослинних олій. Включення останніх призводить до синтезу еластичних полімерів, а при високих концентраціях – до утворення маслорозчинних

смол, придатних для використання у виробництві друкарських та офсетних фарб.

Введення наповнювачів у епоксидні смоли сприяє покращенню механічних та термічних властивостей, таких як твердість та теплостійкість, а також зменшенню усадки та вартості кінцевого матеріалу. Використання армуючих наповнювачів, зокрема волокон та тканин, дозволяє створювати високоміцні композиційні матеріали.

Епоксидні смоли широко застосовуються як захисні покриття та адгезиви для різноманітних матеріалів, включаючи сталь, алюміній, деревину та непористі субстрати. Вони також використовуються як зв'язуючі речовини для текстильних матеріалів, покращуючи їх експлуатаційні характеристики. Епоксидні смоли є ключовими компонентами у виробництві лакофарбових матеріалів для суднобудування, авіабудування, нафтопереробної, машинобудівної, будівельної та харчової промисловості. Особливо слід відзначити їх застосування у створенні наливних епоксидних підлог, що забезпечують естетичний зовнішній вигляд, легкість обслуговування та стійкість до механічних та хімічних впливів.

Епоксидні ґрунти, що базуються на епоксидних смолах, використовуються для захисту металевих поверхонь від корозії завдяки їх здатності формувати щільну та міцну захисну плівку.

Епоксидні смоли є двокомпонентними термореактивними полімерами, що при змішуванні з затверджувачами утворюють жорсткі, але міцні матеріали. Вони використовуються у виробництві ювелірних виробів, ремонті транспортних засобів, суднобудуванні та будівництві.

Узагальнюючи, епоксидні смоли є універсальними полімерними матеріалами з широким спектром застосування завдяки їх високій міцності, хімічній стійкості та адгезійним властивостям. Для затвердіння епоксидних смол необхідні реакційноздатні сполуки, і вибір затверджувача залежить від необхідних умов затвердіння. У 1995 році світове споживання епоксидних смол для виробництва покриттів складало 700 тис. тонн.

Епоксидні ґрунтовки широко використовуються для захисту металоконструкцій у промислових умовах, включаючи мости, нафтогазове обладнання та морські споруди. Для цих цілей часто використовуються високонаповнені епоксидні

грунтовки, здатні створювати покриття товщиною до 240 мікрон за один шар.

Застосування епоксидних смол у композитних матеріалах:

Епоксидна смола є основним компонентом у виробництві композитів, зокрема склопластиків та вуглепластиків, виконуючи функцію зв'язуючого агента між волокнистим наповнювачем і матрицею. Це забезпечує формування легких, але високоміцних конструкцій, широко використовуваних у авіаційній, автомобільній та суднобудівній галузях. Наприклад, композитні корпуси літаків і автомобілів, модифіковані епоксидними смолами, демонструють оптимальне співвідношення міцності та маси, що підвищує їх експлуатаційні показники та енергоефективність. Аналогічні матеріали застосовуються у виробництві спортивного інвентарю (гоночні велосипеди, тенісні ракетки), де критичними параметрами є мінімізація ваги при збереженні механічної стійкості.

Класифікація епоксидних смол за хімічною структурою:

Бісфенольні А смоли – продукт конденсації бісфенолу А з епіхлоргідриним. Їх фізико-хімічні властивості (молекулярна маса, в'язкість, температура плавлення) залежать від співвідношення реагентів. Низькомолекулярні форми – рідини, середньомолекулярні – тверді речовини. Смоли з високою молекулярною масою використовуються для фізично-висихаючих покриттів (наприклад, ґрунтовок), оскільки містять переважно гідроксильні групи, які реагують з ізоціанатами або аміносмолами.

Бісфенольні Ф смоли – синтезуються з бісфенолу Ф (похідне фенолу та формальдегіду) та епіхлоргідрину. Вони мають нижчу в'язкість і вищу епоксидну функціональність порівняно з бісфенольними А аналогами. Покриття на їх основі відрізняються підвищеною стійкістю до розчинників та УФ-опромінення.

Епоксидні новолаки – отримують з новолачних смол (фенол/формальдегід). Високий ступінь функціональності (2,2–5,8) забезпечує щільну сітку зшивання, що підвищує термостійкість і хімічну інертність. Однак такі покриття менш еластичні й мають нижчу адгезію до металів.

Аліфатичні епоксидні сполуки (наприклад, епоксидовані спирти) використовуються як реактивні розріджувачі або пластифікатори. Вони демонструють кращу колірну стабільність,

але поступаються ароматичним смолам у стійкості до кислот.

Епоксидні емалі та ґрунти

Епоксидна емаль і епоксидна ґрунтовка є захисними покриттями на основі епоксидних смол, але вони виконують різні функції в системі покриттів.

Епоксидна емаль – композитний матеріал на основі смоли, що формує міцне, гладке покриття з високою адгезією до різних субстратів (метал, бетон, дерево). Її універсальність обумовлює застосування як у промисловості, так і в побуті.

Епоксидний ґрунт – спеціалізований матеріал для захисту металевих поверхонь, особливо в автомобілебудуванні. Він забезпечує антикорозійний бар'єр і покращує адгезію фарбувальних систем. На (рис.1) кузов вантажного напіввагону покритий епоксидною ґрунтовкою.

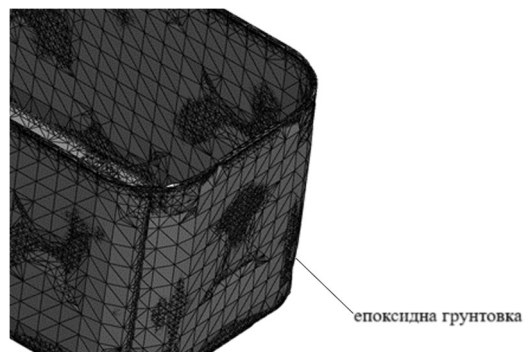


Рис. 1. Напіввагон покритий епоксидною ґрунтовкою

Ці матеріали є ключовими у сучасних технологіях завдяки поєднанню механічної міцності, хімічної стійкості та адаптивності до різних умов експлуатації.

Основні причини його використання епоксидної ґрунтовки:

Захист від корозії: Завдяки своїй щільній структурі та стійкості до проникнення рідини, епоксидний ґрунт створює надійний бар'єр, що запобігає розвитку корозії на металевих поверхнях автомобіля.

Первинна обробка: Епоксидний ґрунт часто застосовується при первинній обробці автомобіля, забезпечуючи міцну основу для всієї лакофарбової системи.

Адгезія: Він забезпечує відмінну адгезію між металевою поверхнею та наступними шарами фарби та лаку, що підвищує довговічність покриття.

Вирівнювання поверхні: Хоча епоксидний ґрунт не вимагає шліфування, він допомагає

згладити дрібні нерівності поверхні, створюючи рівну основу для фарбування.

Універсальність: Епоксидний ґрунт можна використовувати на різних металевих поверхнях, що робить його універсальним рішенням для різних завдань автомобільної індустрії.

Хімічна стійкість: Він має високу стійкість до різних хімічних речовин, що додатково захищає кузов автомобіля від агресивних зовнішніх впливів.

Довговічність: Застосування епоксидного ґрунту значно збільшує термін служби лакофарбового покриття автомобіля.

На ринку представлено безліч марок епоксидних ґрунтовок, кожна з яких має свої особливості та переваги. Наприклад, APP GRUND EP 3:1 є універсальним ґрунтом для автомобільного ремонту, тоді як APP PRIMER EP 30-620 Grey 4:1 призначений для промислового застосування з можливістю нанесення товстих шарів.

Таким чином, епоксидний ґрунт є найважливішим компонентом у процесі захисту та підготовки металевих поверхонь автомобіля, забезпечуючи надійну основу для довговічного та якісного лакофарбового покриття.

Епоксидні емалі та інші хімістійки лакофарбові матеріали, активно використовуються в промисловості для обробки котлів, підлог, деталей різних механізмів, проводки, обмотки і багато чого іншого. Це робиться для надання оброблюваним агрегатів і елементів конструкцій стійкості до корозії, підвищення гідроізоляційних і електроізоляційних якостей. Також емалями покриваються деталі, які піддаються регулярному і тривалому нагріванню або постійно контактують з агресивними хімічними речовинами. Є як універсальні, так і вузьконаправлені склади. На (рис.2) кузов вантажного напіввагону покритий епоксидною емаллю.

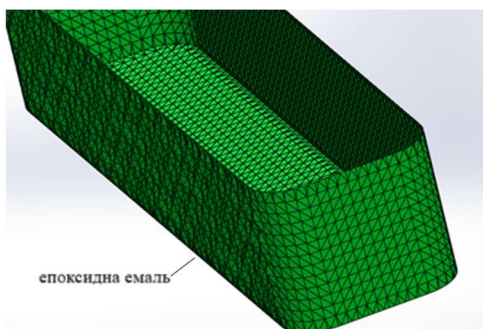


Рис. 2. Напіввагон покритий епоксидною емаллю

Незважаючи на те, що кожний окремих різновид епоксидної емалі має деякі відмінності за способом застосування, умовно всі ЛКМ можна розділити на два типу: висихання і повне затвердіння плівки відбувається природним шляхом; повне затвердіння покриття вимагає штучної сушки.

Вибір між цими двома варіантами дуже важливий, адже в ряді ситуацій (причому як в побуті, так і в промисловості) висушити виріб штучно може бути дорого, незручно, або й зовсім неможливо. Приміром, дорожню розмітку слід проводити тільки за допомогою лакофарбових матеріалів, що висихають природним шляхом і не мають жорстких обмежень за робочої температури і рівня вологості в момент нанесення.

У більшості випадків, епоксидні емалі універсальні, якщо справа стосується способу нанесення. Майже всі лакофарбові матеріали такого роду легко наносяться як валиком або пензлем, так і фарборозпилювачем. Покриття досить ефективно і в один шар, але для досягнення найкращих результатів, рекомендується нанесення хімістійких епоксидних емалей в два або три шари.

Епоксидні покриття – це захисні покриття від корозії металевих виробів за допомогою епоксидних смол. Більшість ринку епоксидних покриттів складає антикорозійне покриття **труб**, які використовуються як для трубопроводів, так і для влаштування фундаментів на трубчастих палі. Прикладом такої споруди є міст (рис. 3).



Рис. 3. Сучасний міст

Найбільшими елементами мосту є центральні прольоти над фарватером. Відповідно, в першу чергу потрібно забезпечити їх від можливих дій ворогів. Нагадаю: довжина арок 227 метрів і важить конструкція 5,5 тисячі тонн.

Опори центральної арки мають дуже потужну пальову основу: 110 паль завтовшки 1,5 метра заповнених армованим бетоном. На додаток палі розташовані під кутом і по суті

утворюють конус-найміцнішу фігуру. У конуса немає слабких місць і неважливо з якого боку йде руйнівний вплив. Підходи до опор центральної арки додатково захищені потужними палами.

Захист трубчастих свай від корозії епоксидними покриттями

Трубчасті палі з антикорозійним покриттям з епоксидних смол для фундаментів застосовуються досить часто, практика показує дуже високу стійкість покриття до здирання, оскільки воно не відривається при зануренні палі в ґрунт та при її вилученні під час демонтажу тимчасових конструкцій.

Приклади епоксидних покриттів – порошки двох сортів Scotchkote 8352N та Scotchkote 226N, вироблені американською корпорацією 3M, використовуються також аналогічні порошки Resicoat R-726A та Resicoat R-641 від голландської корпорації AkzoNobel. Контролером якості сертифіката надійності покриття є шотландська компанія Eхова. Розглянемо основні відмінності епоксидної емалі та епоксидної ґрунтовки (табл.)

Таблиця

Основні відмінності епоксидних покриттів

Характеристика	Епоксидна емаль	Епоксидна ґрунтовка
Функція	Декоративне та захисне фінішне покриття	Основа для фінішного покриття, адгезія до поверхні
Склад	Епоксидна смола + пігменти + розчинники	Епоксидна смола + антикорозійні добавки + наповнювачі
Колір	Може бути будь-якого кольору	Зазвичай сірий, червоний, білий
Товщина шару	50 – 200 мкм	30 – 100 мкм
Захист	Стійкість до стирання, механічних і хімічних впливів	Захист від корозії, покращення адгезії
Застосування	Фінішний шар для металу, бетону, дерева	Базовий шар перед нанесенням емалі
Час висихання	8–24 години	4–12 годин

Технологія нанесення епоксидних покриттів трубчастих свай

1. Спочатку в печі трубу нагрівають до 60°C для осушення та подальшої підготовки до хромування, для якого необхідна гаряча труба.

2. Потім поверхню труби очищається струменями піску в дробоструминній установці.

3. Після цього виконується процес хромування, який полягає у нанесенні біхромату калію на гарячу трубу. Хромове покриття має високі антикорозійні властивості, але основне призначення його в іншому - це захист основного полімерного шару від «катодного відшарування» і збереження адгезії (прилипання) покриття, навіть якщо окремі молекули води проникли через полімерний шар. Катодне відшарування – це комплексний електрохімічний процес, пов'язаний з електролітичною появою бульбашок водню на поверхні металу з втратою надійного контакту з полімерною плівкою. За високої різниці потенціалів катодне відшарування може стати суттєвою проблемою. Відшарування може досягати 3 мм, щоправда, без розриву покриття. Шар хрому запобігає цьому електрохімічному процесу, змінюючи електричні потенціали лежить на поверхні рахунок гальванічної пари хрому із залізом. Додатково хромування забезпечує високе зчеплення із полімерами, навіть якщо вони частково просочилися водою.

4. Далі на трубу наноситься двошарове порошкове покриття [13] з епоксидних смол. Порошок розплавляється за температури 270°C і утворює полімерні плівки.

5. Перший шар епоксидних смол (праймер) створений із порошку Scotchkote 226N або його аналога Resicoat R-726 та адаптований для хімічного бар'єру та прилипання до труби за рахунок адгезії. Шар створений за технологією завтовшки з 300-400 мк. Найтонше і рівне нанесення порошку до гелеутворення плівки здійснюється за рахунок технології без участі людини з електростатичним прилипанням до труби частинок порошку, що парять. Для цього порошок компресорами перетворюють на аерозвіль і проганяють через електрод під напругою 40.000-120.000 вольт. Далі заряджені частинки починають притягуватися до заземленої труби і осідаючи на ній, починають відштовхувати інші частинки, що забезпечує тонкий і рівномірний шар.

6. Другий шар адаптований проти зовнішніх механічних пошкоджень за рахунок епоксидних смол із порошку Scotchkote 8352N або його аналога Resicoat R-641, що робить

покриття стійким до сколів, ударів, стирання. У дешевому варіанті технології зазвичай цей шар виконують із поліетилену з підсумковою товщиною покриття близько 2-3 мм. У разі Керченського мосту використовується другий шар із епоксидної смоли з товщиною 400 – 600 мк. Незважаючи на меншу товщину, епоксидні смоли стійкіші до здирання і, крім того, не володіють, на відміну від поліетилену, помітною водопроникністю під осмотичним тиском.

7. Далі труба вивчається електроіскровим дефектоскопом «Крона-С», який виявляє мінімальні дефекти: труба обертається під електродом дефектоскопа, і якщо товщина полімеру зменшена, то крізь нього станеться іскровою пробою, і дефект буде виявлено. Потім труба вивчається по всій довжині томографом на ультразвуковій фазованій решітці (УЗФР) для пошуку дефектів у глибині металу, особливо в місцях зварювання. Контроль якості нанесення покриття здійснюють експерти світового лідера сертифікації антикорозійних покриттів із шотландської компанії Eхова. Процедура контролю якості такого епоксидного покриття регулюється також ДСТУ ISO 21809-2-2013, що дозволяє виконувати також державний контроль за якістю покриття та регламентує процедури та технологію усунення виявлених дефектів.

Висновки. Епоксидні смоли – це основний компонент епоксидної емалі та епоксидної ґрунтовки, але самі по собі вони не є готовими фарбувальними матеріалами.

Епоксидний ґрунт є сучасним і ефективним рішенням для захисту металоконструкцій від корозії. Його унікальні властивості, універсальність застосування та постійні інновації в галузі розробки роблять його незамінним матеріалом як для професійних автомеханіків, так і для промислових підприємств.

Інвестуючи в якісний захист з використанням епоксидного ґрунту, ви не тільки продовжуєте термін служби вашого автомобіля чи обладнання, а й заощаджуєте значні кошти на майбутніх ремонтах. У світі, де кожна деталь має значення, вибір правильного ґрунту може стати вирішальним фактором у боротьбі з корозією та збереженні цінності металоконструкції у машинобудуванні.

Епоксидні смоли є надзвичайно універсальними матеріалами, що знаходять застосування в багатьох галузях, включаючи машинобудування.

Епоксидні ґрунти та покриття ефективно захищають металеві поверхні від корозії завдяки своїй щільній структурі та стійкості до проникнення рідини.

Епоксидні смоли забезпечують відмінну адгезію між різними матеріалами, що робить їх ідеальними для використання в якості клеїв та сполучних речовин.

Епоксидні покриття мають високу стійкість до різних хімічних речовин, включаючи луги, кислоти, солі та розчинники, що робить їх придатними для використання в агресивних середовищах.

Епоксидні смоли використовуються як сполучні речовини у виробництві композитних матеріалів, таких як склопластик та вуглепластик, що дозволяє створювати легкі та міцні конструкції.

Технологія нанесення епоксидних покриттів включає кілька етапів, включаючи нагрівання, очищення, хромування та нанесення порошкового покриття, що забезпечує високу якість та довговічність покриття.

Типи епоксидних смол: Існує кілька типів епоксидних смол, включаючи бісфенольні А, бісфенольні Ф, епоксидні новолаки та аліфатичні епоксидні сполуки, кожна з яких має свої унікальні властивості та застосування.

Епоксидні емалі є універсальними лакофарбовими матеріалами, які забезпечують міцне та довговічне покриття на різних поверхнях, включаючи метал.

Контроль якості епоксидних покриттів є важливим етапом, який включає використання дефектоскопів та томографів для виявлення дефектів та забезпечення високої якості покриття.

Література

1. Посохов І. М. Дослідження ринку вагонобудування України та конкурентоспроможності промислових підприємств залізничного транспорту на світовому ринку та ринку країн СНД. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПИ»*: зб. наук. пр. Темат. вип.: Технічний прогрес та ефективність виробництва. Харків. 2015. № 60 (1169). С. 115-118.
2. Бараш Ю.С., Корженевич І.П., Мельянцова Ю.П. Вплив фінансово-економічної кризи на діяльність залізничного транспорту України. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. В. Лазаряна*. 2009. Вип. 29. С. 212-220.
3. Квятковська Л.А., Кулінічев П.К. Формування моделі оцінки конкурентної позиції

- машинобудівного підприємства. *Науковий вісник Херсонського державного університету*. 2014. Випуск 6 (Ч. 2). С.183-188.
4. Соляник Л.Г., Дубей Ю.В. *Оборотні активи машинобудівних підприємств: процеси відтворення й оптимізації структури: монографія / за ред. Л.Г. Соляник. Д. : НГУ, 2015. С. 391.*
 5. Отенко І.П., Полтавська Є.О.. *Управління конкурентними перевагами підприємства*. ХНЕУ, 2005. С. 212.
 6. Бараш Ю.С., Корженевич І.П., Мельянцева Ю.П. Вплив фінансовоекономічної кризи на діяльність залізничного транспорту України. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. В. Лазаряна*. 2009. Вип. 29. С. 212-220.
 7. Дикань В. Л., Обруч Г. В. Визначення ефективності реалізації потенціалу конкурентоспроможності вагонобудівних підприємств. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2016. Вип. 56. С. 9-18.
 8. Каличева Н.Є. Організація управління на підприємствах залізничного транспорту в сучасних умовах. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. Збір наук. праць. Харків, УкрДАЗТ. 2014. № 45. С. 167-170.
 9. Сосунов Н. Н. Підвищення ефективності процесів експлуатації та технічного обслуговування рухомого складу у системі ремонтних підприємств галузі. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. Луганск. 2006. С. 219-223.
 10. Jing Li et al. Reinforcement of graphene and its derivatives on the anticorrosive properties of waterborne polyurethane coatings. *Composites Science and Technology*. P. 30-37. 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.04.017>
 11. Павленко В. М.. Дослідження методів випробування лакофарбового покриття на стійкість до корозії. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2023. №2 (18). С. 127–133. doi: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-18-2-127-133>
 12. Gorobchenko O., Fomin O., Gritsuk I., Saravas V., Grytsuk Y., Bulgakov M., Volodarets M. and Zinchenko D. Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine. 2018. P. 239-243. doi:10.1109/IEPS.2018.8559487
 13. Sergii V. Sagin, Sergii S. Sagin, Oleksij Fomin, Oleksandr Gaichenia, Yurii Zablotskyi, Václav Pištěk, Pavel Kučera. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport. *Renewable Energy*. 2024. 120221 ISSN 0960-1481 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>
 14. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1), P.79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
 15. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 2/1(92). P. 63-71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080
 16. Павленко В. М.. Новітні технології в екологічно безпечних полімерних покриттях: дослідження, технології, перспективи. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024. №1 (19). С. 85–94. doi: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-85-94>
 17. Sagin, S.; Kuropyatnyk, O.; Sagin, A.; Tkachenko, I.; Fomin, O.; Pištěk, V.; Kučera, P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. 10, 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>

References

1. Posokhov I. M. Doslidzhennja rynku vagonobuduvannja Ukrainy ta konkurentospromozhnosti promyslovykh pidpryemstv zaliznychnogho transportu na svitovomu rynku ta rynku krajin SND. [Research on the Railway Car Building Market in Ukraine and the Competitiveness of Industrial Railway Transport Enterprises in the Global Market and the CIS Countries Market.] *Bulletin of the National Technical University "KhPI": Collection of Scientific Papers. Thematic Issue: Technological Progress and Production Efficiency*. Kharkiv, 2015. No. 60 (1169). P. 115–118.
2. Barash Yu. S., Korzhenevych I. P., Melyantsova Yu. P. Vplyv finansovo-ekonomichnoji kryzy na dijalnijstj zaliznychnogho transportu Ukrainy. [The Impact of the Financial and Economic Crisis on the Operation of Railway Transport in Ukraine.] *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after V. Lazaryan*. 2009. Issue 29, P. 212–220.
3. Kvyatkovska L. A., Kulinichev P. K. Formuvannja modeli ocinky konkurentnoji pozycji mashynobudivnogho pidpryemstva. [Development of a Model for Assessing the Competitive Position of a Machine-Building Enterprise.] *Scientific Bulletin of Kherson State University*. 2014. Issue 6 (Part 2), P. 183–188.
4. Solyanik L. H., Dubei Yu. V. Oborotni aktyvy mashynobudivnykh pidpryemstv: procesy vidtvorenja j optymizaciji struktury. [Current Assets of Machine-Building Enterprises: Processes of Reproduction and Structure Optimization]:

- Monograph /edited by L. H. Solyanik. Dnipro, 2015. NSU. P. 391.
5. Otenko I. P., Poltavska Ye. O. Upravlinnja konkurentnyh perevaghamy pidpryjemstva. [Managing the Competitive Advantages of an Enterprise]. KhNEU. 2005. P. 212.
 6. Barash Yu. S., Korzhenevych I. P., Melyantsova Yu. P. Vplyv finansovoeconomichnoji kryzy na dijalnistj zaliznychnogho transportu Ukrainy. [The Impact of the Financial and Economic Crisis on the Operation of Railway Transport in Ukraine.] Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after V. Lazaryan. 2009. Issue 29, P. 212–220.
 7. Dykany V. L., Obruch H. V. Vyznachennja efektyvnosti realizaciji potencialu konkurentospromozhnosti vagonobudivnykh pidpryjemstv. [Assessing the Efficiency of Realizing the Competitive Potential of Railway Car-Building Enterprises.] Bulletin of Transport and Industry Economics. 2016. Issue 56, P. 9–18.
 8. Kalycheva N. Ye. Orghanizacija upravlinnja na pidpryjemstvakh zaliznychnogho transportu v suchasnykh umovakh. [Organization of Management at Railway Transport Enterprises under Modern Conditions.] Bulletin of Transport and Industry Economics. Collection of Scientific Papers. Kharkiv: UkrDAZT, 2014. No. 45, P. 167–170.
 9. Sosunov N. N. Pidvyshhennja efektyvnosti procesiv ekspluataciji ta tekhnichnogho obslughovuvannja rukhomogho skladu u systemi remontnykh pidpryjemstv ghaluzi. [Improving the Efficiency of Operation and Maintenance Processes of Rolling Stock within the System of Repair Enterprises in the Industry.] Bulletin of the East Ukrainian National University named after V. Dahl. Luhansk, 2006. P. 219–223.
 10. Jing Li et al. Reinforcement of graphene and its derivatives on the anticorrosive properties of waterborne polyurethane coatings. Composites Science and Technology. P. 30-37.2016. doi:https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.04.017
 11. Pavlenko V. M. Doslidzhennja metodiv viprobuвання lakofarbovogho pokryttja na stijkistj do koroziji. [Research on Methods of Testing the Durability of Coatings to Corrosion.] Bulletin of Machine Engineering and Transport. 2023. No. 2 (18), pp. 127–133. doi: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-18-2-127-133
 12. Gorobchenko O., Fomin O., Gritsuk I., Saravas V., Grytsuk Y., Bulgakov M., Volodarets M. and Zinchenko D. Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment. IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). Kharkiv, Ukraine. 2018. P. 239-243. doi:10.1109/IEPS.2018.8559487
 13. Sergii V. Sagin, Sergii S. Sagin, Oleksij Fomin, Oleksandr Gaichenia, Yurii Zablotskyi, Václav Pištěk, Pavel Kučera. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport. *Renewable Energy*. 2024. 120221 ISSN 0960-1481 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221>
 14. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1), P.79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
 15. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 2/1(92). P. 63-71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080
 16. Pavlenko V. M. Novitni tekhnologhiji v ekologhichno bezpechnykh polimernykh pokryttjakh: doslidzhennja, tekhnologhiji, perspektyvy. [Modern Technologies in Environmentally Safe Polymer Coatings: Research, Technologies, Prospects.] Bulletin of Machine Engineering and Transport. 2024. No. 1 (19), P. 85–94. doi: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-85-94>
 17. Sagin, S.; Kuropyatnyk, O.; Sagin, A.; Tkachenko, I.; Fomin, O.; Pištěk, V.; Kučera, P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. 10, 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>
- Fomin O.V., Kozynka O.S., Krasulin A. S., Sachenko D. S. Analysis of the prospects for the application of epoxy protective coating for load-bearing metal structures of railway transport vehicles**
- The paper analyzes the prospects of using epoxy protective coatings for load-bearing metal structures in railway transport. Epoxy resins play an important role in protecting, strengthening, and extending the service life of load-bearing metal structures, especially in aggressive environments. Modern epoxy coatings are being developed with environmental standards in mind, reducing their impact on the environment. The use of nanotechnology allows for the creation of coatings with improved properties. The research will help identify the optimal coatings for various types of railway vehicles and operational conditions, such as cold climates or sea transportation. Compliance with safety and durability standards is mandatory for the operation of railway transport, making the study of the potential use of epoxy coatings highly relevant. Epoxy coatings, which provide excellent corrosion protection, can significantly extend the service life of carriages, reduce repair and replacement costs, and minimize the need for frequent repainting. This is especially important for carriages transporting hazardous goods or passengers, where the reliability of the structures is of utmost importance. An analysis of existing technologies for protecting metal structures in railway transport from corrosion and other negative influences*

was carried out. Technologies for protecting metal structures in railway transport (wagons, platforms, tankers, trucks, etc.) from corrosion and other negative impacts (mechanical wear, moisture, chemicals, UV radiation, vibrations) were studied. The study of the properties of epoxy materials, their advantages and disadvantages compared to other types of protective coatings, was carried out. The influence of operational factors of railway transport (vibrations, temperature fluctuations, aggressive environments) on the durability of epoxy coatings was also examined. The physicochemical, mechanical, and anticorrosive properties of epoxy materials used for coating and protecting metal structures (particularly in railway transport, bridge construction, and industrial facilities) were analyzed. Methods for applying epoxy coatings to metal structures and the evaluation of their economic efficiency were studied. Recommendations for the selection and application of epoxy protective coatings for load-bearing metal structures in railway transport were developed.

Keywords: *transport mechanics, transportation, carriages, rolling stock, industry, automation, repair, operation, reliability*

Фомін О. В. – д.т.н., професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державний університет інфраструктури та технологій, fominaleksejvictorovic@gmail.com

Козинка О.С. – аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державний університет інфраструктури та технологій, kozynka1520mm@gmail.com

Красулін О.С. – старший викладач кафедри «Транспортні технології підприємств» Приазовський державний технічний університет, krasulin2@gmail.com

Саченок Д.С. – аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державний університет інфраструктури та технологій, sachenok_ds@gsuite.duit.edu.ua

Стаття подана 10.03.2025.

Наукове видання

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 2 (288) 2025**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск

Лорія М.Г.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 12.04.2025 р.
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 10,7. Обл.-вид. арк. 12,3.
Наклад 50 прим. Вид. № 3414. Замов. № __. Ціна вільна.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса університета: вул. Іоанна Павла II, 17,
м. Київ, 01042, Україна

E-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com