

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



В І С Н И К

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 1 (299)
2026**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Київ 2026

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 1 (299) 2026

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 KB № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

№ 1 (299) 2026

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.

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 № 6 від 30 січня 2026 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2026

© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2026

З М І С Т

Спеціальність 122

Могильний Г.А., Переяславська С.О., Донченко В.Ю.,

Швець І.М., Донченко С.М., Самотіс С.І.

СТВОРЕННЯ ВІРТУАЛЬНОГО НАВЧАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ЗАСАДАХ VMWARE VCENTER..... 5

Рязанцев О.І., Кардашук В.С, Бортник К.Я., Барбарук В.М.

ВІРТУАЛІЗАЦІЯ ТА КОНТЕЙНЕРІЗАЦІЯ ЯК ЗАСОБИ ОРГАНІЗАЦІЇ

ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ 16

Спеціальність 133

Долінський М.П.

МОДЕРНІЗАЦІЯ АЕРОДРОМНОГО БАГАТОЦІЛЬОВОГО КОНДИЦІОНЕРА

АМК-24/56-131 ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ

СПЕЦІАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ..... 28

Подригало М.А., Вахнюк С.А.

ВПЛИВ ВІДКЛЮЧЕННЯ ЧАСТИНИ ЦИЛІНДРІВ НА НЕРІВНОМІРНІСТЬ

КРУТНОГО МОМЕНТУ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ 35

Спеціальність 141

Мелконова І.В., Рейс Франсіско Гюго

АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЗЕЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ НА ПРИКЛАДІ США 41

Рябов Є.С., Юр'єва О.Ю., Іванов С.В., Жуков А.Ю.

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА МОТОР-

ВЕНТИЛЯТОРА ОХОЛОДЖЕННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВУ 53

Стрункін Г.М.

УТОЧНЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ЧАСТОТИ КОМУТАЦІЇ ІНВЕРТОРА НАПРУГИ З ФІЛЬТРОМ 61

Спеціальність 151

Кишенько В.Д., Горпинченко А.С.

КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА

НА ОСНОВІ САМООРГАНІЗАЦІЇ В НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМАХ..... 66

Kobzarev E.V., Kulikov D.O., Duryshch O.A., Loria M.G.

DEVELOPMENT OF A MODEL-BASED CONTROL ALGORITHM

FOR AN AMMONIA SYNTHESIS COLUMN 74

Моркун Н.В., Грищенко С.М., Мацуй А.М., Олійник Т.А.

РОЗПІЗНАВАННЯ МІНЕРАЛОГІЧНИХ РІЗНОВИДІВ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ

ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ БЕЗКОНТАКТНИХ НЕРУЙНІВНИХ ВИМІРЮВАНЬ..... 81

Карпюк Л. В., Давіденко Н. О., Ганжа С. А.

ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ НАГРІВАННЯ РІДИНИ..... 92

Спеціальність 273

Фомін О.В., Климаш А.О., Полупан Є.В., Прохорчук М.В.

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВИКЛИКИ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ МЕХАНІЧНИХ ЧАСТИН РУХОМОГО СКЛАДУ

ЗАЛІЗНИЧНОГО ТА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ 97

CONTENTS

Speciality 122

Mohylnyi H.A., Pereiaslavskaya S.O., Donchenko V.U.,

Shvets I. M., Donchenko S.M., Samotis S.I.

CREATING A VIRTUAL TRAINING ENVIRONMENT BASED ON VMWARE VCENTER..... 5

Ryazantsev O.I., Kardashuk V.S., Bortnyk K.Y., Barbaruk V.M.

VIRTUALIZATION AND CONTAINERIZATION AS MEANS OF ORGANIZING COMPUTING ENVIRONMENTS..... 16

Speciality 133

Dolinskyi M.P.

MODERNIZATION OF THE AIRFIELD MULTI-PURPOSE AIR CONDITIONING UNIT
AMK-24/56-131 BY APPLYING AN ELECTRIC DRIVE FOR SPECIAL EQUIPMENT..... 28

Podrygalo M.A., Vakhniuk S.A.

THE EFFECT OF CYLINDER DEACTIVATION ON THE UNEVENNESS
OF THE TORQUE OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE..... 35

Speciality 141

Melkonova I.V., Francisco Hugo Reyes

ANALYSIS OF THE STATUS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT
OF GREEN GENERATION USING THE EXAMPLE OF THE USA 41

Riabov Ye.S., Yurieva O.Yu., Ivanov S.V., Zhukov A.Yu.

DETERMINATION OF THE RATIONAL VOLTAGE FOR THE INDUCTION MOTOR
OF A BLOWER USED FOR COOLING OF LOCOMOTIVE TRACTION MOTORS..... 53

Strunkin H.M.

REFINEMENT OF THE OPTIMAL SWITCHING FREQUENCY OF A VOLTAGE-
SOURCE INVERTER WITH A FILTER..... 61

Speciality 151

Kyshenko V.D., Gorpichenko A.S.

CONTROL OF TECHNOLOGICAL OBJECTS OF SUGAR PRODUCTION
ON THE BASIS OF SELF-ORGANIZATION IN NONLINEAR SYSTEMS..... 66

Kobzarev E.V., Kulikov D.O., Duryshch O.A., Loria M.G.

DEVELOPMENT OF A MODEL-BASED CONTROL ALGORITHM
FOR AN AMMONIA SYNTHESIS COLUMN 74

Morkun N.V., Hryshchenko S.M., Matsui A. M., Oliynyk T.A.

RECOGNITION OF MINERALOGICAL VARIETIES
OF IRON ORE USING NON-CONTACT NON-DESTRUCTIVE MEASUREMENT METHODS..... 81

Karpiuk L.V., Davidenko N.O., Ganzha S.A.

AUTOMATION FEATURES OF THERMAL PROCESSES FOR HEATING LIQUIDS 92

Speciality 273

Fomin O.V., Klymash A.O., Polupan Ye.V., Prokhorchuk M.V.

OPERATIONAL CHALLENGES IN THE INTERACTION OF MECHANICAL PARTS
OF RAILWAY AND ROAD TRANSPORT ROLLING STOCK IN MARTIAL ARTS CONDITIONS..... 97

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-5-15>

УДК 004.45: 004.38

СТВОРЕННЯ ВІРТУАЛЬНОГО НАВЧАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ЗАСАДАХ VMWARE VCENTER

Могильний Г.А., Переяславська С.О., Донченко В.Ю.,
Швець І.М., Донченко С.М., Самотіс С.І.

CREATING A VIRTUAL TRAINING ENVIRONMENT BASED ON VMWARE VCENTER

Mohylnyi H.A., Pereiaslavska S.O., Donchenko V.U.,
Shvets I. M., Donchenko S.M., Samotis S.I.

У сучасних умовах функціонування системи вищої освіти України, що характеризуються необхідністю забезпечення безперервного змішаного навчання, питання створення гнучких та відмовостійких навчальних середовищ набуває критичного значення. Для ІТ-спеціальностей наявність високопродуктивних комп'ютерних лабораторій є базовою вимогою для формування професійних компетенцій у галузі системного адміністрування, кібербезпеки та мережових технологій.

У роботі розглядаються шляхи створення віртуального навчального середовища на засадах комплексного аналізу можливостей програмного компоненту VMware vCenter.

Методологія. У ході дослідження було застосовано комплексний системний підхід, що включає порівняльний аналіз сучасних гіпервізорів та платформ управління віртуалізацією. У процесі реалізації використовувалися методи проєктування мережової топології віртуальних машин, налаштування прав доступу на основі рольових моделей.

У роботі проведено дослідження програмно-апаратних вимог для розгортання середовища VMware vSphere (включаючи гіпервізори ESXi та центр керування vCenter Server).

Наукова новизна дослідження полягає у розробці та адаптації моделі віртуальної лабораторії для потреб закладів вищої освіти. На відміну від стандартних корпоративних рішень, запропонована архітектура, що оптимізована за умов обмежених апаратних ресурсів та специфічних сценаріїв використання. Запропоновано механізм інтеграції віртуальної інфраструктури з існуючими системами управління надання доступу до віртуальних робочих місць. Обґрунтовано

використання специфічних конфігурацій ролей для сховищ даних, віртуальних ресурсів та віртуальних мереж для забезпечення ізоляції навчальних проєктів студентів один від одного за умови збереження загальної керованості системи.

Отримані результати. Успішно впроваджено та апробовано навчальне віртуальне середовище, яке базується на використанні технологій серверної віртуалізації від компанії VMware by Broadcom. Це найбільш ефективний шлях до створення «приватної хмари» університету, здатної задовольнити потреби освітнього процесу незалежно від фізичного місцезнаходження викладачів та студентів.

Ключові слова: VMware by Broadcom, vCenter, ESX, рольова модель, Access Control, віртуальні ресурси, навчальне середовище, віддалений доступ, роутер, VPN.

Вступ. В умовах стрімкої цифровізації та переходу бізнес-процесів у хмарні середовища, технології віртуалізації стали фундаментальною складовою сучасної ІТ-інфраструктури. Наразі роботодавці вимагають від випускників не лише знання архітектури віртуалізації, але й практичних навичок адміністрування, розгортання кластерів та управління віртуальними мережами. Проте розгортання фізичних лабораторних стендів для кожного студента є фінансово витратним та складним в обслуговуванні завданням. Рішенням такої проблеми є впровадження віртуальних освітніх середовищ (ВОС) як цифрових платформ, що розроблені для сприяння інтерактивному

практичному освітньому досвіду за допомогою технологій віртуалізації.

На сьогоднішній день рішення VMware by Broadcom, є де-факто промисловим стандартом у галузі корпоративної віртуалізації, що забезпечує надійність, масштабованість та гнучкість управління ресурсами центрів обробки даних. Використання VMware vCenter у навчальному процесі частково вирішує зазначену проблему, що дозволяє реалізувати концепцію хмарного навчального полігону. Критично важливою перевагою такого підходу є можливість забезпечення віддаленого доступу до лабораторних потужностей за умови додаткових налаштувань мережевої інфраструктури. В умовах поширення дистанційних та змішаних форм навчання, можливість працювати з інфраструктурою підприємства через вебінтерфейс (vSphere Client) із будь-якої точки світу набуває особливого значення та сприяє глибшому засвоєнню матеріалу. Крім того, при певних налаштуваннях vCenter може гарантувати безпеку та ізоляцію: виконання складних налаштувань відбувається у віртуальному просторі, що усуває ризики пошкодження основного обладнання, навіть при віддаленому підключенні через VPN або захищений шлюз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблематика підготовки майбутніх фахівців у закладах вищої освіти засобами віртуального освітнього середовища (ВОС) активно досліджується зарубіжними і вітчизняними науковцями. Д. Костенко та ін. [1] розглядають віртуальне освітнє середовище як відкриту систему, в рамках якої на основі застосування технологій віртуальної реальності забезпечується ефективне інтерактивне самонавчання в освітньому процесі. У роботі [2] проведено порівняльний аналіз таких термінів, як «віртуальне освітнє середовище», «віртуальне навчальне середовище», «інформаційне освітнє середовище», та виділено спільний системний підхід, згідно з яким середовище – це система взаємопов'язаних, взаємозалежних компонентів, яка виконує якісно нову функцію, не властиву її окремим елементам. Н. Lin та ін. [3] розглядають віртуальні освітні середовища як трансформаційний підхід до організації та реалізації освітнього процесу, що характеризується створенням нового мережевого комунікаційного простору, який підтримує динамічну взаємодію між здобувачами освіти та викладачами за

допомогою комплексних систем управління. V. R. Kebande [4] досліджує віртуальні лабораторії з позиції технології віртуалізації. Такі віртуальні лабораторії являють собою специфічну реалізацію ВОС, яка дозволяє здобувачам освіти брати участь у практичних завданнях шляхом дистанційного виконання на комп'ютерних системах, що є віртуальною емуляцією.

Технічні питання створення віртуальних ВОС, таких як кіберполігони, досліджувалися Д. Tymoshchuk та V. Yatskiv [5]. Автори проаналізували різні аспекти використання гіпервізорів, зокрема типи гіпервізорів, їх основні функції та специфіку їх застосування в моделюванні кіберзагроз. У статті показана здатність гіпервізорів, таких як VMware ESXi, Microsoft Hyper-V, Xen та KVM підвищувати ефективність апаратних ресурсів, створювати складні віртуальні середовища для детального моделювання мережевих структур та симуляції реальних ситуацій у кіберпросторі.

Питанням розробки віртуальних навчальних центрів за технологією VMware vSphere, керуванню доступом до ресурсів та пов'язаними з цими проблемами, присвячені дослідження [6, 7, 8]. Milan K. розглядає актуальні питання побудови, експлуатації та підготовки консолідованих центрів обробки даних для навчання технологіям адміністрування та експлуатації віртуалізації за допомогою VMware vSphere. Окрему увагу автор приділяє апаратній та програмній інфраструктурі, зокрема можливостям автоматизації підготовки навчальних середовищ за допомогою PowerCLI та PowerShell [6]. Fazuludeen N. та ін. у своєму дослідженні визначають проблеми з плануванням потужностей, безпеки віртуальної системи, технічні проблеми з віртуалізації на рівні мережі, платформи VMware vSphere, віртуального сховища та наводять приклади рішення зазначених ситуацій [7]. Akuthota, A. K. досліджує вплив моделі керування доступом на основі ролей (RBAC) у сучасній хмарі на безпеку та оптимізацію адміністративних процесів та забезпечення відповідності нормативним вимогам. Крім того, у статті оцінюється вплив RBAC на організаційну ефективність, управління ризиками та масштабованість в контексті найкращих практик впровадження та тенденцій в системах контролю доступу. Увага приділяється конвергенції RBAC з новими технологіями, такими як блокчейн та архітектура нульової довіри (Zero Trust), що дало змогу

запропонувати перспективний погляд на еволюцію управління хмарною безпекою [8].

Проведений аналіз доводить актуальність теми дослідження й водночас свідчить про недостатній обсяг дослідження проблеми створення віртуальних освітніх середовищ за допомогою платформи VMware vCenter в умовах обмежених апаратних ресурсів та специфічних сценаріїв використання, що потребують налаштування прав доступу за допомогою конфігурації ролей з метою забезпечення ізоляції користувачів за умови збереження загальної керованості системи.

Мета статті. На засадах комплексного аналізу можливостей програмного компоненту VMware vCenter розробити шляхи створення віртуального навчального середовища.

Виклад основного матеріалу дослідження. Після поглинання компанією Broadcom значна кількість ліцензій було скасовано. Наразі лінійку платформ VMware vSphere було скорочено до двох ключових версій: vSphere Foundation (VVF) та Cloud Foundation (VCF) [9,10,11]. Нині існують два основні пакети передплати та один додатковий:

- VMware Cloud Foundation (VCF) — "Все включено";
- VMware vSphere Foundation (VVF) — "Основна віртуалізація";
- vSphere Standard / Essentials Plus. — тільки для невеликих організацій, які починають працювати з віртуалізацією.

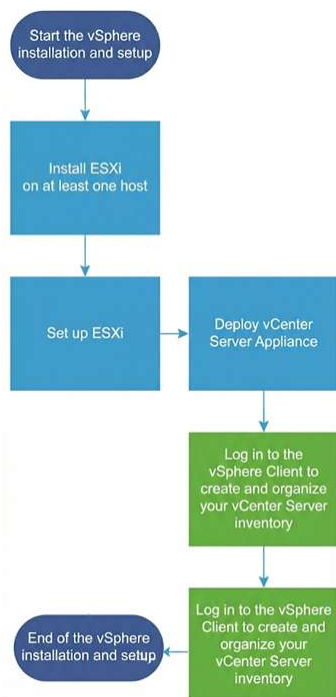


Рис. 1. Послідовність інсталювання [12]

Загальну послідовність інсталювання VMware vSphere показано на рис. 1. Ця послідовність використовується для всіх типів ліцензій.

До кожного типу ліцензії входить компонент ESXi – найнижчий шар програмного забезпечення. Слід відзначити, що в цей час Broadcom пропонує дві версії: ESX v8 та ESX v9. Однак ці версії більш вимогливі до апаратного забезпечення, працюють тільки на процесорах останніх моделей, але версія ESX v7, підтримка якої вже завершена працює стабільно та її достатньо для навчальних цілей (рис. 2). Таким чином, компонент ESXi 7 – перший базовий елемент навчального середовища, що пропонується. Після встановлення буде доступний основний засіб налаштувань ESXi – доступ через браузер на адресу мережевого адаптера (рис. 3), що налаштована при розгортанні на Management.

Характеристика	ESXi 7.0	ESXi 8.0	ESXi 9.0
Статус (2026)	EGS (End of General Support)	Mainstream (Стабільна)	Latest (Найновіша)
Модель драйверів	Native Only (vmklinux видалено)	Native + DPU Support	Native + Enhanced Offload
Завантажувальний диск	USB/SD допустимі (але ненадійні)	USB/SD Deprecated (потрібен дод. диск)	NVMe/SSD (обов'язковий (USB блокується))
Управління конфігом	Host Profiles (XML)	Configuration Profiles (JSON)	VCF Configuration Integration
Підтримка DPU (SmartNIC)	Hi	Так (Project Monterey, v1)	Так (Gen 2, новіше розвантаження NSX/vSAN)
Максимум vGPU	Обмежена підтримка MIG	Покращена робота з Multi-Instance GPU	AI/ML Optimization (Shared Pass-Through)

Рис. 2. ESXi – базовий компонент навчального середовища

vCenter Server — це централізована платформа управління інфраструктурою VMware vSphere. Це ключовий компонент, без якого неможливі кластеризація (HA, DRS), vMotion та управління життєвим циклом (Lifecycle Manager). vCenter Server – це другий базовий компонент навчального середовища. В цей час існують наступні версії:

- vCenter Server 7.x;
- vCenter Server 8.x;
- vCenter Server / VCF 9 (The Future / New Standard).

Слід враховувати сумісність версій ESXi та vCenter. У таблиці 1 наведено перелік сумісних версій [13]. Встановлення vCenter 8.0/9.0 відбувається методом "Installer з клієнтської машини" (Windows/Mac/Linux) на цільовий хост ESXi. Після двоетапного встановлення використовуємо вебсторінку за адресою, що вказана при встановленні vCenter де виконується остаточне налаштування та створення різноманітних об'єктів (рис. 4). Фактично у цьому додатку буде створено віртуальне навчальне середовище.

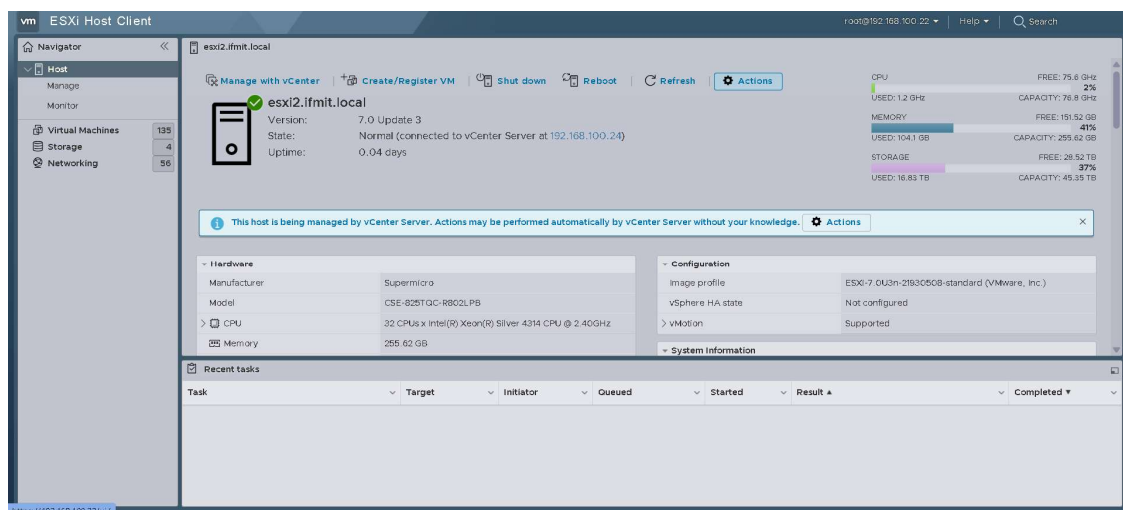


Рис. 3. Налаштування Хоста ESX v7

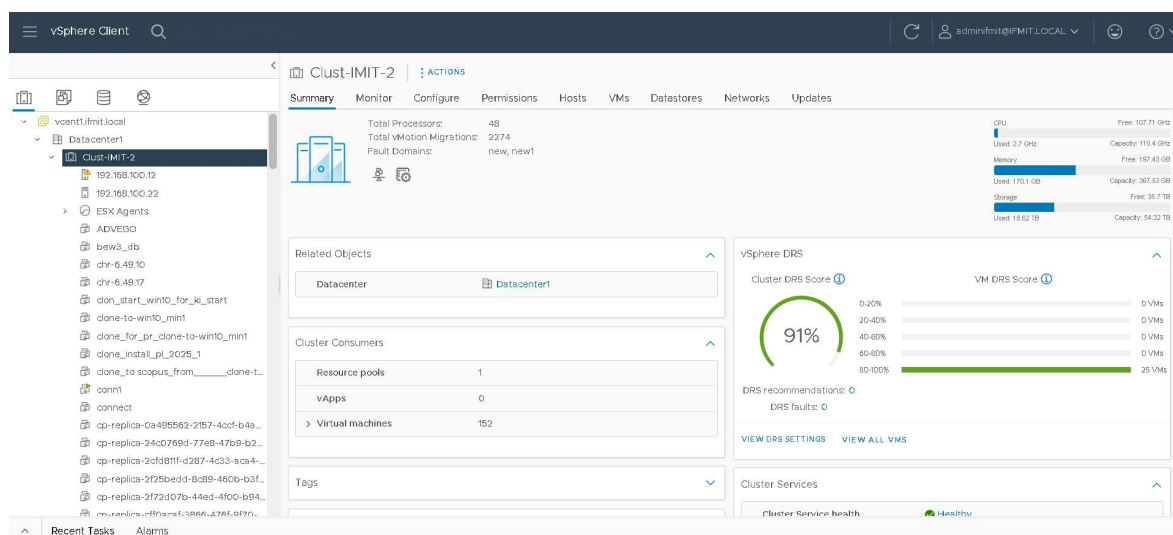


Рис. 4. Приклад налаштувань vCenter

Таблиця 1

Матриця сумісності [4] (Interoperability Matrix)

Версія vCenter Server	Підтримувані версії ESXi	Коментар
vCenter 9.0	ESXi 9.0 ESXi 8.0 U3	Підтримка ESXi 7.0 та старіших повністю вилучена. Перед апгрейдом vCenter до 9.0 переконайтеся, що всі хости мінімум версії 8.0 U3.
vCenter 8.0	ESXi 8.0 ESXi 7.0 ESXi 6.7 (до EOL)	Найбільш універсальна версія для перехідного періоду. Дозволяє керувати змішаним кластером під час міграції.
vCenter 7.0	ESXi 7.0 ESXi 6.7 ESXi 6.5	Не підтримує ESXi 8.0. Якщо ви купили новий сервер з ESXi 8.0, ви не зможете підключити його до старого vCenter.

Встановлено, що підсистема розмежування доступу у vCenter 7 базується на ієрархічній моделі рольового управління (Role-Based Access Control — RBAC). Коректна конфігурація цього компонента є критичною умовою забезпечення цілісності та конфіденційності даних, оскільки більшість інцидентів безпеки у віртуальних середовищах пов'язані саме з помилками конфігурації прав доступу, а не з вразливостями програмного коду.

Архітектура безпеки будується на взаємозв'язку трьох фундаментальних сутностей (рис. 5): Суб'єкт — Роль — Об'єкт [12]. Глибоке розуміння їх взаємодії є необхідним для побудови захищеного середовища управління та уникнення ефекту «надлишкових привілеїв».



Рис. 5. Модель RBAS у vCenter

Суб'єктами доступу виступають сутності, що ініціюють запит на виконання операції.

1. Користувачі та Групи: локальні та зовнішні.

- Локальні суб'єкти – облікові записи в домені vsphere.local, або аналогічному, що налаштовується під час інсталювання. Їх використання має бути зведене до мінімуму (переважно для аварійного доступу «break-glass», коли зовнішні служби недоступні).

- Зовнішні суб'єкти – користувачі з AD/LDAP або федеративні провайдери (IDP). При цьому, рекомендується призначення привілеїв виключно на рівні Груп. Призначення прав індивідуальним користувачам робить аудит безпеки дуже складним та ускладнює процедуру редагування прав.

2. Сервісні акаунти, які використовуються для систем резервного копіювання, моніторингу, автоматизації. Для них не діє принцип MFA, тому паролі та політики та обмеження прав мають бути максимально жорсткими.

Роль у vCenter — це не просто набір прав, а визначення функціонального профілю. Існують наступні типи ролей:

1. Системні ролі (System Roles): Administrator, Read-Only та No Access:

- Administrator – надає повний контроль, включаючи керування правами доступу. Використання цієї ролі для щоденних операцій є грубим порушенням безпеки.

- Read-Only – забезпечує можливість моніторингу. Важливо розуміти, що ця роль дозволяє переглядати конфігурацію мережі та сховищ, що може бути використано зловмисником для розвідки (Reconnaissance).

- No Access – блокуюча роль. Використовується для створення «сліпих зон». Наприклад, адміністратори продуктивного середовища не повинні бачити об'єкти середовища розробки або секретного проєкту.

2. Шаблонні ролі (Sample Roles), які містять попередньо сконфігуровані набори прав (наприклад, Virtual Machine Power User). Слід відзначити, що після оновлення vCenter ці ролі можуть бути перезаписані до значень за замовчуванням. Тому їх застосування у «чистому» вигляді заборонено в Production-середовищах. Перед використанням треба клонувати у нову роль (наприклад, CORP_VM_PowerUser).

3. Користувацькі ролі (Custom Roles), які дозволяють реалізувати принцип найменших привілеїв (Least Privilege). Створюються шляхом вибору конкретних атомарних операцій (понад 500 доступних привілеїв) і, таким чином, можуть бути використані для створення віртуального навчального середовища.

До об'єктів у vCenter належать певні об'єкти інвентарю. Це найбільш складний і часто неправильно зрозумілий аспект vSphere. Ключовою концептуальною помилкою є сприйняття vCenter як єдиного ієрархічного дерева. Фактично, vCenter керує чотирма паралельними вимірами (деревами) об'єктів (рис. 6):

1. Hosts and Clusters (Хости та Кластери), яке відображає фізичні обчислювальні ресурси.

2. VMs and Templates (BM – віртуальні машини та Шаблони), де розташована логічна організація робочих навантажень.

3. Storage (Сховища), де розташована уся ієрархія систем зберігання (Datastores, Datastore Clusters) файли та каталоги.

4. Networking (Мережі), у якому розташовано ієрархію мереж та віртуальної комутації (DVS, Port Groups).

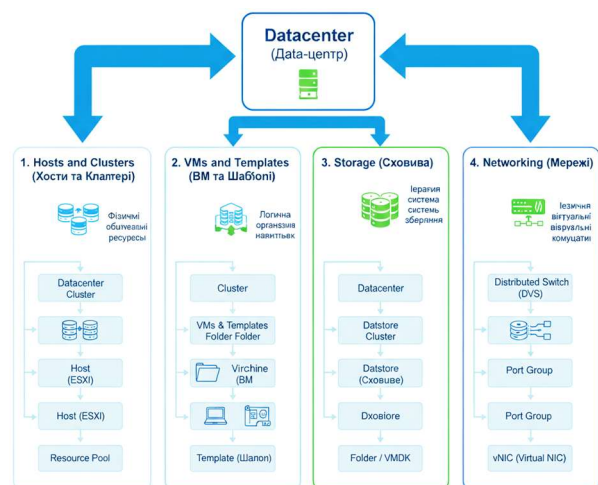


Рис. 6. Дерева інвентарю vCenter

Слід зазначити, що призначення прав в одному дереві ніколи автоматично не поширюється на об'єкти в інших деревах, навіть якщо логічно вони пов'язані. Таким чином, якщо створити папку (Folder), наприклад «Virtual X», у поданні (дереві) VMs and Templates і надати користувачеві права адміністратора на цю папку, він зможе керувати ВМ. Однак, він не побачить Datastores, на яких лежать диски цих ВМ, і мереж, до яких вони підключені, оскільки це об'єкти інших дерев.

Грунтуючись на виявлених ризиках в організації навчального процесу та принципі Zero Trust, розроблено деталізовану систему доступу. Основний акцент зроблено на відмові від стандартних ролей на користь користувацьких (Custom Roles), що дозволить нівелювати конфлікти між «деревами» інвентарю та забезпечити безпечну роботу.

З огляду на викладене вище, головна ідея створення навчального віртуального середовища полягає у виборі, розробці та призначенні певних нестандартних ролей (Custom Roles) на певні об'єкти програмного компоненту vCenter.

Пропонується віртуальну лабораторію розташувати у вбудованих, додаткових об'єктах (рис. 7):

- Головний каталог (Folders) та підкаталоги Віртуальних машин та шаблонів.
- Головний каталог (Folders) та підкаталоги мереж та комутаторів.



Рис. 7. Структура віртуального середовища

Folders віртуальних машин і шаблонів призначені для створення студентами (здобувачами освіти) навчально-тренувальних віртуальних машин відповідно до параметрів, визначених і контрольованих викладачем.

Folders мереж та комутаторів призначені для розташування викладачем певних віртуальних комутаторів (мереж), що використовуються здобувачами освіти для створення окремого мережевого середовища.

Залежно від завдання існує можливість надати слухачам освіти право на створення певних мереж (груп портів). Однак накопичений досвід свідчить, що достатньо створити ці мережі заздалегідь та надати слухачам доступ лише на читання. Фактично це означає, що слухачі освіти мають можливість використати певні ізольовані мережі, і таким чином, отримати при виконанні лабораторних робіт свою, особисту мережу, яка не конфліктує з іншими мережами у всій інформаційній системі.

Загалом для створення віртуального середовища було розроблено п'ять додаткових ролей. Для реалізації цього середовища необхідно мати інфраструктуру, у якій є система серверів із підтримкою Ms AD (Microsoft Active Directory) та інстальовані ESXi + vCenter.

В результаті комплексного аналізу ролі моделі vCenter та особливостей організації навчального процесу було розроблено послідовність дій, необхідних для створення навчального середовища (рис. 8).

1. Приєднати компонент vCenter до Microsoft AD. Для цього потрібно знати пароль адміністратора Microsoft AD. У компоненті vCenter обираємо Системне меню Administration -> Cofiguration -> Active Directory Domain. Після такої дії vCenter буде «бачити» користувачів та групи з Active Directory Domain.

2. Створити додаткові групи у Microsoft AD на сервері- контролері AD. Запустити додаток «Диспетчер Серверів». У цьому додатку обрати «засоби» -> «Користувачі та комп'ютери». На цьому етапі треба спланувати типи та кількість доступів.

Усі інші процеси створення віртуального середовища виконуємо у компоненті vCenter у різноманітних структурах. Для переходу з однієї структури до іншої використовуємо системне меню, підменю Shortcuts.

3. Створити додаткові каталоги (Folders) віртуальних машин для розташування віртуальних машин слухачів. Спочатку переходимо в системне меню, підменю Shortcuts розділ Virtuals. Створення віртуального середовища робимо у головному каталозі (Folder) за допомогою команд: Action -> Create new folder. В межах експериментального розгортання було створено головний каталог віртуального середовища (наприклад, lab_corp_mer) та підкаталоги для певних груп користувачів-студентів (наприклад, GR2024_??), де вони мають право створювати свої віртуальні машини.

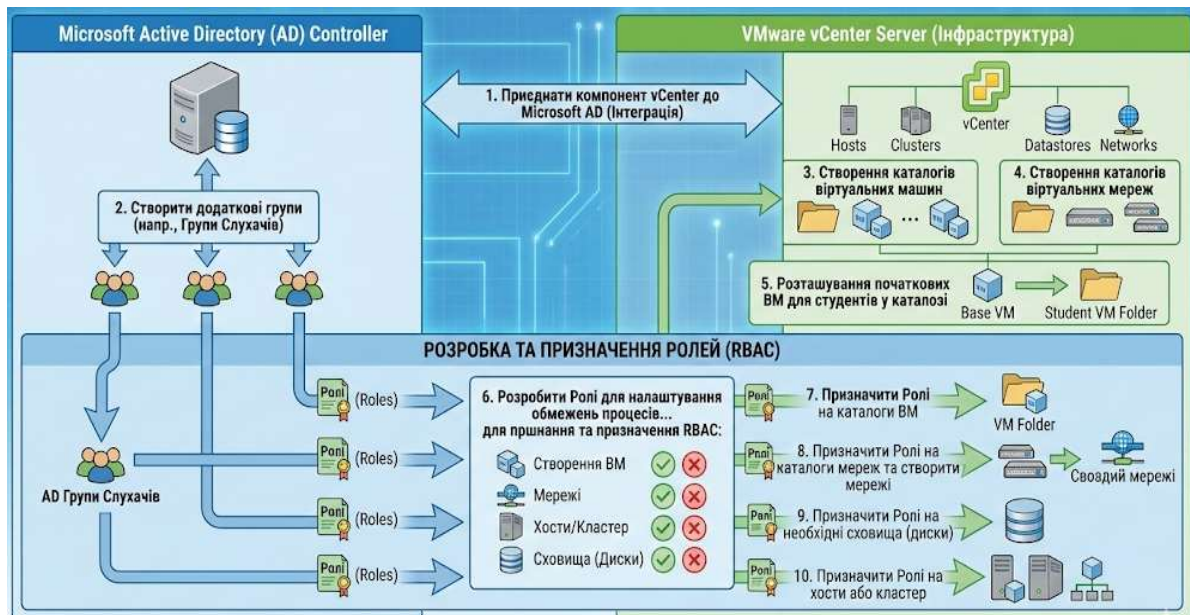


Рис. 8. Послідовність створення навчального середовища

4. Створити додаткові каталоги (Folders) для віртуальних мереж з метою використання віртуального середовища. Спочатку переходимо у системне меню, підменю Shortcuts розділ Networking. Далі застосовуються команди: Action -> Create new folder. В межах експериментального розгортання було створено головний каталог віртуального середовища (наприклад, net_folder_for_lab) та підкаталоги для певних груп користувачів-студентів (наприклад, GR2024_??), де вони мають право створювати (використовувати) свої віртуальні мережі.

5. Розташувати початкові віртуальні машини для студентів у головному каталозі віртуального середовища (в нашому варіанті це наприклад у lab_corp_mer). У даному випадку всі початкові VM – віртуальні машини, які студенти беруть за основу для подальшого використання.

6. Розробити Ролі для налаштування обмежень процесів створення віртуальних машин, використання або створення мереж, використання хостів або кластеру, використання певних сховищ (дисків). Створення певних ролей робиться у системному меню, підменю Administration. Після цього обираємо меню Roles та додаємо певну Роль. Це найважливіший процес налаштування. Він потребує особливої уваги. Слід враховувати ідеологію vCenter, враховувати різні типи Дерев (див. рис.6) та призначати певні ролі. Загалом було створено 5 ролей:

- Роль на головний каталог віртуальних машин,
- Роль на особистий каталог віртуальних машин,
- Роль на підкаталог віртуальних мереж,
- Роль на сховище даних,
- Роль на хост (кластер).

Роль на головний каталог віртуальних машин (наприклад, lab_for_corp_mer) віртуального середовища робимо з обмеженнями – ТІЛЬКИ ЧИТАННЯ та можливістю КЛОНУВАТИ початкові віртуальні машини, що створені викладачем (крок 5). Можливість створення віртуальних машин на цьому рівні ЗАБОРОНЕНО. Підкаталогам для студентів (наприклад, GR2024_??) надано можливість створення віртуальних машин ТІЛЬКИ МЕТОДОМ КЛОНУВАННЯ. Створення віртуальних машин іншими засобами ЗАБОРОНЕНО. Крім того ЗАБОРОНЕНО змінювати параметри віртуальних машин (обсяг диску, процесор, ОЗУ та інші).

Окремі ролі створюємо:

- для використання певного сховища (диску) ROLE_Disk надаємо можливість ЧИТАННЯ каталогів та файлів цього диску;
- роль ROLE_Host – для використання ресурсів хосту, надаємо можливість ЧИТАННЯ РЕСУРСІВ;
- роль ROLE_Net – для ЧИТАННЯ мереж.

7-10. Призначити Ролі для певних груп Ms AD на каталоги для збереження віртуальних

машин. Потім призначаємо ROLE_Net для певних груп Ms AD на каталоги віртуальних мереж, ROLE_Disk – для певних груп Ms AD на необхідне сховище, а ROLE_Host – для певних груп Ms AD на хост (кластер).

11. За необхідністю треба провести додаткове налаштування мережевої інфраструктури для забезпечення доступу до навчального середовища з мережі Інтернет. При цьому можна виділити такі основні шляхи (рис. 9):

- Організація доступу до локальної мережі шляхом використання VPN підключення на мережевому, пороговому роутері.
- Використання додаткового RDP підключення на засадах ОС Microsoft Windows Server та налаштування брандмауєру для порту 3389.
- Прокидання службових портів vCenter на пороговому роутері: 443, 902, 80, 903, 22, 5480, 9443 та ін. Цей варіант небажано використовувати з міркувань безпеки. Крім того порт 443 може бути вже використано для іншого вебсерверу.
- Використання додаткових програмних комплексів (наприклад Omnisia Horizon) та створення спеціалізованого додатку для використання vCenter. Для цього варіанту необхідні додаткові ліцензії, що є платними.

середовища, та розроблено послідовність дій процесу розгортання віртуальної інфраструктури на базі vCenter (VMware vSphere). Ключовою особливістю розгорнутого середовища є його адаптація під багатокористувацьку модель навчання, де гіпервізор ESXi та компонент vCenter Server виступають не лише технічним фундаментом, а й керованим простором. Це досягається шляхом глибокої ієрархічної структуризації інвентарю, де використання спеціалізованих папок (Folders) та призначення певних поєднань «Суб'єкт — Роль» дозволяє логічно ізолювати ресурси окремих навчальних груп та індивідуальних проєктів у межах єдиного апаратного комплексу.

Створення навчального середовища ґрунтується на конфігурації моделі управління доступом (RBAC), яку можна адаптувати під специфіку навчальних сценаріїв. На відміну від стандартних корпоративних налаштувань, тут основний акцент зміщений на створення «sandbox-каталогів» для студентів, що забезпечується шляхом жорсткого обмеження прав на рівні віртуальних машин, мереж, хостів та сховищ даних. Така детермінація прав доступу гарантує неможливість деструктивного впливу на загальну інфраструктуру або результати роботи інших учасників навчального процесу. За таким підходом зберігається достатній рівень автономії для виконання складних лабораторних завдань.

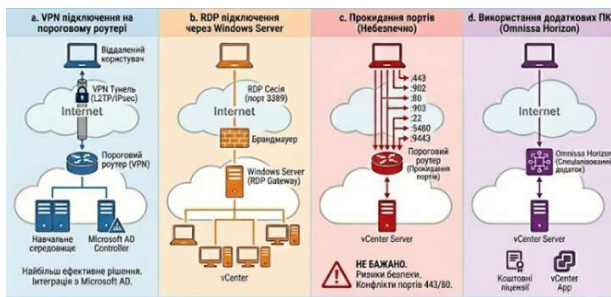


Рис. 9. Варіанти підключення до зовнішньої мережі

На підставі аналізу джерел [14-17] а також практичного досвіду, встановлено, що VPN-з'єднання з підтримкою шифрування (наприклад, типу L2TP) є найбільш ефективним рішенням. Водночас специфіка навчального процесу вимагає особливих налаштувань та інтеграції з Microsoft AD, що виходить за межі цієї роботи.

Висновки. На засадах комплексного аналізу рольової моделі vCenter досліджено шляхи створення віртуального навчального

Література

- Костенко Д. Впровадження віртуального інформаційного середовища у освітній процес / Д. Костенко, Н. Токуєва, О. Гречановська, М. Вереш, Ю. Кланічка. Наукові інновації та передові технології. 2023. № 6(20). DOI: 10.52058/2786-5274-2023-6(20)-462-471.
- Bondarenko O., Pakhomova O., Lewoniewski W. The didactic potential of virtual information educational environment as a tool of geography students. Training. Augmented Reality in Education : Proceedings of the 2nd International Workshop. Kryvyi Rih, Ukraine, March 22, 2019 (2547). pp. 13-23. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2547/paper01.pdf> (дата звернення: 17.01.2026).
- Lin, H. Metaverse in Education: Vision, Opportunities, and Challenges / H. Lin, S. Wan, W. Gan, J. Chen, H.-C. Chao. 2022 IEEE International Conference on Big Data. 2022. DOI: [10.1109/BigData55660.2022.10021004](https://doi.org/10.1109/BigData55660.2022.10021004).
- Kebande, V. R. The Impact of Virtual Laboratories on Active Learning and Engagement in

- Cybersecurity Distance Education. arXiv preprint arXiv. 2024. DOI: [10.48550/arXiv.2404.04952](https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.04952).
5. Tymoshchuk D., Yatskiv V. Using hypervisors to create a cyber polygon. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2024. No. 3. P. 52–56. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-79-7.
 6. Milan K. Možnosti výuky virtualizačních technologií a její automatizace s využitím technologie vmvmware vsphere. *Trends in Education*. 2022. Vol. 14, no. 2. P. 5–14. DOI: 10.5507/tvv.2022.001.
 7. Fazuludeen N. Challenges And Issues Of Managing The Virtualization Environment Through VMware vSphere / N. Fazuludeen, S. S. Banu, A. Gupta, S. Swathi. *Nanotechnology Perceptions*. 2024. Vol. 20, S1. DOI: 10.62441/nano-ntp.v20is1.23.
 8. Arun Kumar Akuthota. Role-Based Access Control (RBAC) in Modern Cloud Security Governance: An In-depth Analysis. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. 2025. Vol. 11, no. 2. P. 3297–3311. DOI: 10.32628/cseit25112793.
 9. Broadcom Completes Acquisition of VMware [Електронний ресурс] URL: <https://www.broadcom.com/company/news/financial-releases/61541> (дата звернення: 21.01.2026)
 10. VMware Cloud Foundation [Електронний ресурс] URL: https://ftpdocs.broadcom.com/cadocs/0/contentimages/VCF_SPD_June2024.pdf (дата звернення: 21.01.2026).
 11. VMware vSphere Foundation [Електронний ресурс] URL: https://ftpdocs.broadcom.com/cadocs/0/contentimages/VVF_SPD_May2024.pdf (дата звернення: 21.01.2026).
 12. Vmware-vsphere-7-0 [Електронний ресурс] URL: <https://techdocs.broadcom.com/content/dam/broadcom/techdocs/us/en/pdf/vmware/vsphere/vsphere/vmware-vsphere-7-0.pdf> (дата звернення: 21.01.2026).
 13. Product Interoperability Matrix [Електронний ресурс] URL: <https://interopmatrix.broadcom.com/Interoperability?isHidePatch=false&isHideLegacyReleases=false&col=1,3495,5558,5890,18609&row=2,3496,5891,18702> (дата звернення: 21.01.2026).
 14. Могильний Г. Аналіз програмно-апаратних засобів створення системи з віддаленим доступом до навчальних комп'ютерних лабораторій закладів середньої освіти. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2023. № 1(277). С. 5–19. DOI: 10.33216/1998-7927-2019-256-8-5-19.
 15. Могильний Г., Донченко В., Донченко С. Огляд та аналіз інструментів створення корпоративного середовища. *Інформаційні технології та суспільство*. 2024. № 4 (15). С. 99–107. DOI: 10.32689/maup.it.2024.4.16.
 16. Кардашук В., Бортник К., Багнюк Н. Проблеми захисту інформації у віртуальних приватних мережах та відбиття атак на Web-додатки. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. Луцк, 2023. № 53. С. 117–124. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2023-53-18.
 17. Могильний Г., Семенов М., Кіреєв І. Впровадження системи віддаленого доступу до інформаційних ресурсів комп'ютерних лабораторій. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2022. № 2 (272). С. 7–14. DOI: 10.33216/1998-7927-2022-272-2-7-14.

References

1. Kostenko D. Vprovdzhennia virtualnoho informatsiinoho seredovyshcha u osvittii protses / D. Kostenko, N. Tokuieva, O. Hrechanovska, M. Veresh, Yu. Klanichka. *Naukovi innovatsii ta передові tekhnolohii*. 2023. № 6(20). DOI: 10.52058/2786-5274-2023-6(20)-462-471.
2. Bondarenko O., Pakhomova O., Lewoniewski W. The didactic potential of virtual information educational environment as a tool of geography students. *Training. Augmented Reality in Education : Proceedings of the 2nd International Workshop*. Kryvyi Rih, Ukraine, March 22, 2019 (2547). pp. 13-23. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2547/paper01.pdf> (accessed: 17.01.2026).
3. Lin, H. Metaverse in Education: Vision, Opportunities, and Challenges / H. Lin, S. Wan, W. Gan, J. Chen, H.-C. Chao. 2022 IEEE International Conference on Big Data. 2022. DOI: 10.1109/BigData55660.2022.10021004.
4. Kebande, V. R. The Impact of Virtual Laboratories on Active Learning and Engagement in Cybersecurity Distance Education. arXiv preprint arXiv. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2404.04952.
5. Tymoshchuk D., Yatskiv V. Using hypervisors to create a cyber polygon. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2024. No. 3. P. 52–56. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-79-7.
6. Milan K. Možnosti výuky virtualizačních technologií a její automatizace s využitím technologie vmvmware vsphere. *Trends in Education*. 2022. Vol. 14, no. 2. P. 5–14. DOI: 10.5507/tvv.2022.001.
7. Fazuludeen N. Challenges And Issues Of Managing The Virtualization Environment Through VMware vSphere / N. Fazuludeen, S. S. Banu, A. Gupta, S. Swathi. *Nanotechnology Perceptions*. 2024. Vol. 20, S1. DOI: 10.62441/nano-ntp.v20is1.23.
8. Arun Kumar Akuthota. Role-Based Access Control (RBAC) in Modern Cloud Security Governance: An In-depth Analysis. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. 2025. Vol. 11, no. 2. P. 3297–3311. DOI: 10.32628/cseit25112793.

9. Broadcom Completes Acquisition of VMware URL: <https://www.broadcom.com/company/news/financial-releases/61541> (accessed: 21.01.2026)
10. VMware Cloud Foundation URL: https://ftpdocs.broadcom.com/cadocs/0/contentimages/VCF_SPD_June2024.pdf (accessed: 21.01.2026).
11. VMware vSphere Foundation URL: https://ftpdocs.broadcom.com/cadocs/0/contentimages/VVF_SPD_May2024.pdf (accessed: 21.01.2026).
12. VMware-vsphere-7-0 URL: <https://techdocs.broadcom.com/content/dam/broadcom/techdocs/us/en/pdf/vmware/vsphere/vsphere/vmware-vsphere-7-0.pdf> (accessed: 21.01.2026).
13. Product Interoperability Matrix URL: <https://interopmatrix.broadcom.com/Interoperability?isHidePatch=false&isHideLegacyReleases=false&col=1,3495,5558,5890,18609&row=2,3496,5891,18702> (accessed: 21.01.2026).
14. Mohylnyi H. Analiz prohramno-aparatnykh zasobiv stvorennia systemy z viddalenyim dostupom do navchalnykh kompiuternykh laboratorii zakladiv serednoi osvity. Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia. 2023. № 1(277). S. 5–19. DOI: 10.33216/1998-7927-2019-256-8-5-19.
15. Mohylnyi H., Donchenko V., Donchenko S. Ohliad ta analiz instrumentiv stvorennia korporatyvnoho seredovyscha. Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo. 2024. № 4 (15). S. 99–107. DOI: 10.32689/maup.it.2024.4.16.
16. Kardashuk V., Bortnyk K., Bahniuk N. Problemy zakhystu informatsii u virtualnykh pryvatnykh merezhakh ta vidbytta atak na Web-dodatky. Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo. Lutsk, 2023. № 53. S. 117–124. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2023-53-18.
17. Mohylnyi H., Semenov M., Kirieiev I. Vprovadzhennia systemy viddalenooho dostupu do informatsiinykh resursiv kompiuternykh laboratorii. Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia. 2022. № 2 (272). S. 7–14. DOI: 10.33216/1998-7927-2022-272-2-7-14.

Mohylnyi H.A., Pereiaslavskaya S.O., Donchenko V.U., Shvets I.M., Donchenko S.M., Samotis S.I. Creating a virtual training environment based on VMware vCenter

The current conditions of the functioning of the higher education system of Ukraine are characterized by the need to ensure continuous blended learning. Therefore, the issue of creating flexible and fault-tolerant learning environments is of critical importance. For IT specialties, the availability of high-performance computer laboratories is a basic requirement for the formation of professional competencies in the field of

system administration, cybersecurity and network technologies.

The work, based on a comprehensive analysis of the capabilities of the VMware vCenter software component, examines ways to create a virtual learning environment.

Methodology. The study used a comprehensive systems approach, including a comparative analysis of modern hypervisors and virtualization management platforms. In the implementation process, methods for designing the network topology of virtual machines and configuring access rights based on role models were used.

The work examined the software and hardware requirements for deploying the VMware vSphere environment (including ESXi hypervisors and the vCenter Server management center).

The scientific novelty of the study lies in the development and adaptation of a virtual laboratory model specifically for the needs of higher education institutions. The developed architecture is optimized for conditions of limited hardware resources and specific usage scenarios, unlike standard corporate solutions. A mechanism for integrating virtual infrastructure with existing management systems for providing access to virtual workplaces is proposed. The use of specific role configurations for data storage, virtual resources, and virtual networks is justified to ensure the isolation of students' educational projects from each other while maintaining the overall manageability of the system.

Results. A virtual educational environment based on the use of server virtualization technologies from VMware by Broadcom has been successfully implemented and tested. This is the most effective way to create a "private cloud" of the university, capable of meeting the needs of the educational process regardless of the physical location of teachers and students.

Key words: VMware by Broadcom, vCenter, ESX, role model, Access Control, virtual resources, learning environment, remote access, router, VPN.

Могильний Геннадій Анатолійович – к. т. н., доцент, директор Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, g.mogilniy@gmail.com

Переяславська Світлана Олександрівна – к. п. н., доцент кафедри інформаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, pereyaslav9@gmail.com

Донченко Володимир Юрійович – старший викладач кафедри інформаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, ifmit.s.2014@gmail.com

Швець Ірина Михайлівна – асистент кафедри математики та інформатики Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, irinachipenko00@gmail.com

Донченко Світлана Миколаївна – асистент кафедри інформаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського

національного університету імені Тараса Шевченка, donchenko.lana77@gmail.com

САМОТІС Сергій Іванович – магістрант Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, ssamotss@gmail.com

Стаття подана 12.12.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-16-27>

УДК 004.75

ВІРТУАЛІЗАЦІЯ ТА КОНТЕЙНЕРІЗАЦІЯ ЯК ЗАСОБИ ОРГАНІЗАЦІЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ

Рязанцев О.І., Кардашук В.С., Бортник К.Я., Барбарук В.М.

VIRTUALIZATION AND CONTAINERIZATION AS MEANS OF ORGANIZING COMPUTING ENVIRONMENTS

Ryazantsev O.I., Kardashuk V.S., Bortnyk K.Y., Barbaruk V.M.

В статті досліджено використання віртуалізації та контейнеризації для організації обчислювальних процесів. Проведено ґрунтовний аналіз технологій віртуалізації та контейнеризації, принципи роботи та сфери застосування. Встановлено, що віртуалізація дозволяє створювати ізольовані обчислювальні середовища з високим рівнем безпеки та гнучкості, проте супроводжується додатковими витратами на ресурси. Контейнеризація забезпечує легкість розгортання, ефективне використання апаратних ресурсів та швидкодію, що робить її особливо актуальною для сучасних DevOps-процесів і хмарних інфраструктур. Розглянуто переваги та недоліки кожного підходу, а також сценарії їх практичного застосування. Здійснено огляд платформ VirtualBox та Docker, які використовуються для реалізації віртуалізованих і контейнерних середовищ відповідно. Проведено порівняльний аналіз функціональних можливостей, переваг і обмежень кожної платформи. Визначено, що VirtualBox забезпечує гнучке налаштування віртуальних машин і підтримку різних гостьових ОС, тоді як Docker орієнтований на легкі, швидкі та масштабовані контейнери. На основі аналізу сформовано експериментальне середовище для тестування продуктивності, що дозволило об'єктивно оцінити ефективність обох технологій у реальних умовах. Виконано практичне дослідження та порівняльний аналіз двох підходів до віртуалізації обчислювальних середовищ: класичної віртуалізації на основі віртуальних машин (VirtualBox) та контейнеризації з використанням платформи Docker. Проведена оцінка ефективності кожного підходу з точки зору продуктивності, використання обчислювальних ресурсів, рівня ізоляції, безпеки та зручності розгортання. Результати практичного дослідження підтвердили, що віртуальні машини та контейнери мають різні області ефективного

застосування. Віртуальні машини доцільно використовувати у випадках, коли пріоритетом є максимальна ізоляція та універсальність середовища, тоді як контейнеризація є оптимальним рішенням для швидкого розгортання, ефективного використання ресурсів та побудови масштабованих сучасних інформаційних систем. Отримані результати можуть бути використані для вибору технології віртуалізації залежно від вимог конкретної задачі при практичному застосуванні.

Ключові слова: віртуалізація, контейнеризація, масштабованість, операційна система, сервер, додаток.

Вступ. Сучасний етап еволюції інформаційних технологій вирізняється стрімким зростанням обсягів даних, які потребують обробки, підвищенням складності програмних систем та розширенням вимог до гнучкості й продуктивності обчислювальних ресурсів. Для забезпечення високої продуктивності, надійності й масштабованості інформаційних систем дедалі ширше впроваджуються технології віртуалізації та контейнеризації, які спрямовані на оптимізацію використання апаратних ресурсів, ізоляцію середовищ виконання, а також спрощення процесів розгортання й управління сервісами [1].

Технологія віртуалізації дозволяє створювати декілька віртуальних машин на одній фізичній платформі, кожна з яких функціонує у власному операційному середовищі з відокремленими програмними компонентами [2]. Такий підхід сприяє

гнучкому розподіленню ресурсів і забезпечує високий рівень ізоляції, проте супроводжується додатковими накладними витратами, що потенційно можуть впливати на загальну ефективність системи. Як альтернатива, контейнеризація пропонує можливість запуску ізольованих програмних компонентів без вимоги створення окремої гостьової операційної системи. Це значно прискорює розгортання програмного середовища й мінімізує споживання апаратних ресурсів. У контексті таких тенденцій постає актуальна задача проведення порівняльного аналізу продуктивності та ефективності використання обчислювальних ресурсів у середовищах, основаних на технологіях віртуалізації та контейнеризації. Глибоке дослідження дозволяє визначити найбільш доцільні підходи для виконання різного типу обчислювальних задач та сервісів, а також розробити практичні рекомендації для побудови оптимальних інфраструктур.

Постановка проблеми. Для об'єднання різних обчислювальних ресурсів та перенесення їх функцій із фізичної машини на віртуальну використовують технологію віртуалізації. Завдяки цьому можна використовувати окремі ресурси, такі як оперативна пам'ять (RAM), процесор (CPU) та інші складові, для створення декількох незалежних віртуальних машин на одному сервері. Це дозволяє оптимізувати витрати та зменшити потребу у придбанні додаткового обладнання та підвищити ефективність роботи всієї IT-інфраструктури компанії. Віртуалізація платформ передбачає створення програмних систем на базі вже існуючих апаратно-програмних комплексів, які можуть як залежати від цих комплексів, так і працювати незалежно від них. Система, що забезпечує апаратні ресурси та програмне середовище, називається хостовою, а ті системи, що виконуються в її середовищі — гостьовими [3]. Для стабільної роботи гостьових систем на основі хостової платформи необхідно, щоб апаратне та програмне забезпечення хоста вирізнялося високою надійністю і надавало потрібний набір інтерфейсів для доступу до своїх ресурсів. Існує кілька типів віртуалізації платформ, кожен із яких має власний підхід до реалізації концепції віртуалізації. Види такої віртуалізації залежать від рівня симуляції апаратного забезпечення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Технологію віртуалізації платформ

здебільшого розділяють на кілька основних типів.

У рамках повної емуляції віртуальна машина реплікує все апаратне забезпечення, забезпечуючи функціонування «гостьової» операційної системи (ОС) без її модифікації. Такий метод дозволяє емулювати різні апаратні архітектури. Основна проблема пов'язана зі значним уповільненням роботи емульованої апаратної частини, що негативно позначається на швидкодії ОС і ускладнює комфортне користування нею.

Часткова емуляція, або нативна віртуалізація, передбачає віртуалізацію лише мінімально необхідної частини апаратного забезпечення для забезпечення ізольованого запуску віртуальної машини. Завдяки цьому підходу можуть працювати «гостьові» ОС, які розраховані на ту саму архітектуру, що й хост. Це дозволяє одночасно запускати кілька екземплярів «гостьових» систем. Такий вид віртуалізації значно підвищує продуктивність у порівнянні з повною емуляцією і є дуже актуальним на сьогоднішній день. Головними перевагами такого підходу є відносна простота впровадження, універсальність та висока надійність рішення, оскільки всі функції управління виконує «хостова» ОС. Однак недоліком цього методу залишається залежність віртуальних машин від архітектури апаратної платформи. Часткова віртуалізація, а також «віртуалізація адресного простору» («address space virtualization»). При такому підході, віртуальна машина симулює кілька екземплярів апаратного оточення (але не всього), зокрема, простору адрес. Такий вид віртуалізації дозволяє спільно використовувати ресурси та ізолювати процеси, але не дозволяє розділяти екземпляри «гостьових» ОС. При застосуванні паравіртуалізації немає необхідності симулювати апаратне забезпечення, однак, замість цього (або на додаток до цього), використовується спеціальний програмний інтерфейс (API, application programming interface) для взаємодії з «гостьовою» операційною системою. Це вимагає підтримки з боку виробників операційних систем, які слабо вірять у можливість такого методу віртуалізації, у зв'язку з чим цей вид віртуалізації розвивається дуже слабо, хоча і існують порівняння, що показують, що швидкодія паравіртуалізації вища.

Віртуалізація рівня ОС (віртуалізація систем). Даний вид віртуалізації застосовується з метою створення декількох захищених

віртуальних серверів на одному фізичному. «Гостьова» система, в даному випадку, розділяє використання одного ядра операційної системи хостингу з іншими «гостьовими» операційними системами. Даний тип віртуалізації застосовується при організації систем хостингу, коли в рамках одного екземпляра ядра потрібно підтримувати кілька віртуальних серверів клієнтів. Віртуалізація на рівні додатків відрізняється від інших видів віртуалізації. У той час як попередні способи передбачають створення віртуальних середовищ або машин для ізоляції додатків, у цьому випадку сам додаток розміщується в спеціальному контейнері, який містить усі необхідні компоненти для його функціонування: файли реєстру, конфігураційні файли, а також користувацькі та системні об'єкти. У результаті отримується додаток, який не потребує стандартної інсталяції на відповідній платформі. При перенесенні такого додатка на інший пристрій і запуску, створене для нього віртуальне середовище усуває потенційні конфлікти з операційною системою чи іншими програмами. Віртуалізація ресурсів, на відміну від віртуалізації платформ, має більш широке і розпливчасте значення і являє собою масу різних підходів, спрямованих на підвищення зручності користування системами в цілому. Оскільки віртуалізація платформ орієнтована більше на конкретні цілі, то її застосування може підвищити ефективність використання комп'ютерного обладнання.

Мета статті. Основною метою статті є підвищення ефективності використання обчислювальних ресурсів на основі аналізу, порівняння та експериментального оцінювання продуктивності віртуальних машин і контейнерів.

Виклад основного матеріалу дослідження. На сьогоднішній день можна виділити наступні варіанти використання продуктів віртуалізації:

1. Консолідація серверів. На даний момент додатки, що працюють на серверах в ІТ-інфраструктурі (ІТ – Information Technology) компаній або інших установах, створюють невелике навантаження на апаратні ресурси серверів. Віртуалізація дозволяє розмістити все на одному фізичному сервері, збільшивши його завантаження, підвищивши тим самим ефективність використання апаратури, що дозволяє істотно заощадити на обладнанні, обслуговуванні та електроенергії.

2. Розробка і тестування додатків. Безліч продуктів віртуалізації дозволяють запускати кілька різних операційних систем одночасно, дозволяючи тим самим розробникам і тестувальникам програмного забезпечення тестувати їх додатки на різних платформах і конфігураціях.

3. Використання в бізнесі. Цей варіант використання віртуальних машин є найбільш широким і творчим. До нього відноситься все, що може знадобитися при повсякденному використанні ІТ ресурсів в бізнесі. На основі віртуальних машин можна легко створювати резервні копії робочих станцій і серверів, що забезпечують мінімальний час відновлення після збоїв тощо.

4. Використання віртуальних робочих столів. VDI (Virtual Desktop Infrastructure) — це технологія, що дозволяє створювати віртуальну ІТ-інфраструктуру і розгортати повноцінні робочі місця на базі одного сервера, на якому працює безліч віртуальних машин [4].

Віртуальні персональні комп'ютери, з якими працюють користувачі, нічим не відрізняються від звичайних персональних комп'ютерів. Однак технологія VDI дозволяє тримати всю необхідну для роботи інформацію під рукою в будь-якому місці, де є доступ до Інтернету (вдома, у ділових поїздках, на відпочинку). Віддалена робота стає дуже простою і комфортною. Вся інформація з віртуального комп'ютера зберігається в спеціальних дата-центрах. Це забезпечує її гарантований захист від втрати (всі дані проходять процедуру автоматичного резервного копіювання), випадкового або навмисного видалення, а також від доступу до неї сторонніх осіб. Обслуговування віртуальних робочих місць (зокрема встановлення програмного забезпечення, оновлення додатків тощо) здійснюється централізовано, що дозволяє мінімізувати витрати часу, а також значно знизити навантаження на системних адміністраторів. У процесі віртуалізації ІТ-інфраструктури створюється віртуальна інфраструктура – комплекс систем на основі віртуальних машин, що забезпечують функціонування всієї ІТ-інфраструктури, що володіє багатьма новими можливостями при збереженні існуючої схеми діяльності ІТ-ресурсів. Розробники різних платформ віртуалізації можуть надати інформацію про успішні проекти з впровадження віртуальної інфраструктури у великих банках, промислових компаніях, лікарнях, освітніх установах.

Віртуалізація програмного забезпечення дозволяє створювати середовище з визначеною апаратною конфігурацією, що забезпечує можливість запуску гостьової операційної системи. Простіше кажучи, ви можете працювати з операційною системою Android на платформі Microsoft Windows, використовуючи ресурси вашого пристрою. Ця технологія поділяється на два основні типи: віртуалізацію додатків та віртуалізацію процесів та сервісів. Віртуалізація на рівні операційної системи зазнала значних змін упродовж останніх кількох років. Так, реалізація віртуалізації на апаратному рівні є доволі складною, оскільки потребує апаратної емуляції. Як альтернатива, віртуалізація на рівні ОС використовує контейнерні механізми, що базуються на функціях ядра, таких як CGroups, простори імен, CHROOT та інші. Ці механізми забезпечують створення ізольованих примірників операційного середовища, відомих як контейнери, на базі хостової машини [5].

Завдяки використанню контейнерного механізму контейнери розділяють ресурси ядра хост-системи, залишаючись незалежними від повноцінної операційної системи. Віртуалізація серверів метою серверної віртуалізації є створення програмної архітектури, яка дозволяє запускати кілька операційних систем на одному фізичному сервері. При цьому програмне забезпечення кожного віртуального сервера функціонує незалежно від апаратного забезпечення. Процес віртуалізації здійснюється за допомогою гіпервізора і не поступається за ефективністю традиційним рішенням. Гіпервізор створює віртуальні ресурси й функціонує безпосередньо на апаратному забезпеченні, маючи систему головного адміністратора як обов'язкову складову. Основна функція гіпервізора полягає у створенні ізольованих середовищ для роботи кожної віртуальної машини та контролі доступу віртуальних машин і гостьових операційних систем до фізичних апаратних ресурсів комп'ютера. За допомогою віртуалізації систем зберігання даних (СЗД) компанії можуть забезпечувати рівномірний розподіл навантаження з урахуванням важливих параметрів, таких як ефективність, доступність, захист та відмовостійкість. Впровадження такої технології дає можливість: спростити процес міграції корпоративних даних; забезпечити надійне зберігання інформації; оптимально використовувати серверний простір; знизити витрати на розширення ІТ-інфраструктури.

Основна ідея віртуалізації систем зберігання полягає у створенні абстрактного проміжного шару між фізичними пристроями (HDD, SSD, NVMe, SAN, NAS) та логічними дисками, які використовуються операційними системами, гіпервізорами або програмними додатками. Це дозволяє приховувати фізичну структуру даних, забезпечувати їх логічне групування та спрощувати централізоване управління.

У сучасних системах використовуються два основні підходи до віртуалізації зберігання:

а) Віртуалізація на рівні хост-сервера. Цей підхід передбачає реалізацію шару абстракції безпосередньо в гіпервізорі або операційній системі. До прикладів можна віднести віртуальні диски у форматах VDI (VirtualBox), VMDK (VMware), VHDX (Hyper-V). Хост-сервер виконує функції зі створення, розширення, клонування та управління знімками цих віртуальних дисків. Серед переваг такого підходу виділяють простоту реалізації та відсутність потреби в додатковому обладнанні. Проте недоліками є обмежені можливості масштабування і залежність від конкретного програмного забезпечення [6].

б) Віртуалізація на рівні мережевого середовища (SAN/NAS) [7]. Тут абстрагування зберігання реалізується за допомогою спеціалізованих контролерів або програмних рішень, які об'єднують кілька фізичних масивів у єдині віртуальні пули сховищ. Сервери отримують доступ до цих логічних томів через мережу. До основних переваг підходу належать висока масштабованість, покращена доступність даних та розширені можливості балансування навантаження. Водночас основними недоліками виступають складність у адмініструванні та значна вартість обладнання.

Віртуалізація сховищ пропонує низку важливих переваг: гнучке та оперативне управління ресурсами, зокрема швидке створення, розширення та перенесення віртуальних томів; ефективне використання дискового простору завдяки тонкому розподілу ресурсів (thin provisioning) та інтелектуальному управлінню даними; збільшення рівня надійності завдяки реплікації і можливості оперативного відновлення з резервних копій; спрощене централізоване адміністрування, яке полегшує управління великими обчислювальними інфраструктурами; розширювана масштабованість, що дозволяє додавати нові накопичувачі без необхідності зупинки роботи системи.

Однак, попри значні переваги, ця технологія має певні недоліки: можливе збільшення часу доступу до даних через додатковий шар абстракції;

зростання рівня складності системи, що потребує високої кваліфікації ІТ-фахівців; ризик перевантаження фізичних носіїв при неправильному налаштуванні тонкого розподілу ресурсів; залежність від програмного забезпечення, збої якого можуть спричинити проблеми з доступом до всього логічного сховища.

У системах віртуалізації (VirtualBox, VMware ESXi, KVM, Hyper-V) віртуалізація систем зберігання є критично важливою [8]. Вона забезпечує можливість швидкого розгортання віртуальних машин, створення шаблонів, резервування та відкату стану. У середовищах контейнеризації (Docker, Kubernetes) вона використовується для роботи з персистентними томами, що гарантує збереження даних незалежно від життєвого циклу контейнера.

У популярних системах віртуалізації серверів, є свої відмінні риси і переваги. Серед них:

Система віртуалізації Microsoft Hyper-V являє собою професійне рішення в галузі апаратної віртуалізації, яке дозволяє створювати декілька незалежних програмних середовищ на основі одного фізичного сервера. Використовуючи платформу Hyper-V, організації отримують можливість взаємодіяти з апаратним забезпеченням за допомогою інструментарію віртуалізації. Основними напрямками застосування системи Microsoft Hyper-V є: реалізація рішень для віртуалізації робочих місць співробітників підприємств; впровадження і підтримка серверної інфраструктури в центрах обробки даних (ЦОД); надання розробникам безпечного середовища для тестування нових програмних функцій перед їх впровадженням у виробничі системи.

Система віртуалізації VMware ESXi є апаратним гіпервізором, призначеним для реалізації віртуалізації в центрах обробки даних, а також для створення хмарних ІТ-інфраструктур [9]. Ця платформа підтримує роботу з різноманітними операційними системами та застосовується головним чином для: консолідації роботи серверів; підвищення ефективності функціонування ІТ-систем і конкурентоспроможності організації; оптимізації процесів адміністрування ІТ-

інфраструктури через використання гіпервізора; зменшення капітальних і операційних витрат; забезпечення безперервності бізнес-процесів; інтеграції механізмів аварійного відновлення для гарантування стійкості системи до збоїв. Таким чином, обидві системи забезпечують ключові інструменти для підвищення ефективності управління ІТ-інфраструктурою, проте відрізняються своїми можливостями і сферою застосування.

Розробка програмного забезпечення не відбувається ізольовано: на всіх етапах, від контролю до тестування, необхідні операційна система та відповідний набір інструментів. Ці інструменти можуть суттєво відрізнятися залежно від завдань. Наприклад, те, чим користується тестувальник, навряд чи знадобиться спеціалісту з development та operations (DevOps) – об'єднанню команди розробки та ІТ-експлуатації. Крім того, кожен інструмент має свої вимоги до конкретних версій бібліотек, фреймворків та інших залежностей. Також потрібно враховувати, що фінальний продукт, наприклад, розроблений для Linux, може бути призначений для використання під Windows, Android або інші платформи. У результаті утворюється досить різнобічне програмне середовище, яке щоразу складно налаштовувати заново, особливо якщо потрібна конкретна версія інструментів. Це може викликати додаткові труднощі та забирати час. На щастя, таку проблему можна вирішити за допомогою створення образів віртуальних машин або контейнерів.

Віртуалізація серверів є технологією, яка дозволяє на одному фізичному сервері розгорнути кілька віртуальних серверів. Це забезпечує більш раціональне використання обчислювальних ресурсів фізичного сервера, що сприяє зниженню витрат і підвищенню ефективності роботи. Зниження витрат: віртуалізація серверів дозволяє скоротити кількість фізичних серверів, що призводить до економії на електроенергії, охолодженні та обладнанні.

Підвищення продуктивності: віртуалізація серверів дозволяє більш ефективно використовувати ресурси фізичних серверів.

Поліпшення масштабованості: віртуалізація серверів дозволяє легко додавати нові сервери в ІТ-інфраструктуру. Підвищення безпеки: віртуалізація серверів дозволяє ізолювати один від одного різні середовища і додатки. Підвищення мобільності: віртуалізація

серверів дозволяє легко переміщати віртуальні сервери між фізичними серверами.

3) Віртуалізація графічних процесорів(GPU).

Зауважимо, що віртуалізація передусім забезпечує ізоляцію інструкцій, які виконуються центральним процесором, одна від одної. До того ж, цей процес охоплює й емуляцію решти периферійних пристроїв, серед яких і відеокarti. Проте, на відміну від оперативної пам'яті чи мережесих портів, відеокarti також здатні виконувати інструкції. Тому для досягнення повноцінної віртуалізації важливо забезпечити їхню ізоляцію, що є доволі нетривіальним завданням. Навіть суто фізичний доступ до відеокarti без належної віртуалізації може обернутися складним викликом. При цьому в домашніх умовах можливо надати кожній віртуальній машині власну відеокарту, але в професійному середовищі цього буде недостатньо.

У сучасному контексті хмарних сервісів ключовими моментами стають масштабованість і ефективність. Високопродуктивна серверна відеокarta або навіть цілий масив таких карт можуть знадобитися декільком клієнтам одночасно із різними рівнями навантаження в різний час. В умовах таких вимог особливо актуальним стає питання максимальної окупності дорогого обладнання на кшталт DGX A1000, графічної системи на основі штучного інтелекту для прискорення обчислень [10]. Тому простої такого обладнання є неприйнятними, а його обчислювальні ресурси потрібно розподіляти між віртуальними машинами, причому динамічно.

Контейнеризація — це підхід до розгортання програмного забезпечення разом із усіма необхідними компонентами, такими як код, бібліотеки, фреймворки та інші залежності. У традиційній розробці програмного забезпечення процес запуску відбувається в конкретному обчислювальному середовищі.

Технологія контейнеризації використовується вже досить тривалий час та стала набирати значну популярність з приходом хмарних технологій. Недоліки традиційних віртуальних машин стали каталізатором зростання популярності контейнерів [11]. Постачальники інструментів для роботи з контейнерами, наприклад, Docker, значною мірою спростили технологію контейнеризації, що сприяло впровадженню даної технології в широкі маси [12]. При спробі перенести програму, наприклад, із локального комп'ютера

до хмарної інфраструктури чи з однієї операційної системи на іншу (з Linux на Windows), можуть з'явитися помилки або несумісності. Контейнеризація вирішує цю проблему, оскільки все необхідне для роботи програми поміщається в контейнер, який є ізольованим, незалежним від операційної системи хосту та здатним працювати на будь-якій платформі без додаткових налаштувань. Такий підхід можна порівняти з процесом переїзду. Ви складаєте свої речі по коробках: посуд в одну, одяг в іншу, книги в третю. Кожна категорія ізольована та структурована. Завдяки цьому коробки легко транспортувати з місця на місце, не перепаковуючи кожен предмет окремо. Аналогічно, контейнери дозволяють легко переносити програми між середовищами без необхідності їх перекомпіляції чи налаштування. Всі компоненти, необхідні для роботи додатка (код, середовище запуску, системні інструменти, бібліотеки та налаштування), упаковуються в один образ і можуть бути використані повторно в рамках поточного завдання або для будь-яких інших. Контейнер незалежний від ресурсів і архітектури хоста. Він створює ізольоване середовище для додатка, не використовуючи CPU, RAM або сховище хостової ОС. Всі процеси відбуваються всередині.

На фізичному сервері операційна система може підтримувати велику кількість контейнерів. Усі вони повністю ізольовані один від одного, але при цьому спільно використовують основні компоненти операційної системи, такі як ядро. Цікавою є специфіка роботи додатків у таких контейнерах. Кожен додаток може залежати від певного набору компонентів, необхідних для його функціонування. Ці залежні компоненти доступні виключно всередині того контейнера, в якому розташований сам додаток. Це означає, що у разі будь-яких збоїв програми чи її залежностей у першому контейнері, робота додатка та файлів у другому контейнері залишиться незмінною. У традиційному середовищі ситуація, наприклад, із видаленням реєстру додатком 1 призвела б до порушення роботи як програми 1, так і програми 2. Однак використання контейнерів гарантує повну ізоляцію додатків 1 і 2, тому всі дії програми 1, зокрема зміна чи видалення реєстру, жодним чином не впливатимуть на роботу програми 2.

Усі виконувані файли та залежні компоненти знаходяться всередині контейнера, що забезпечує повну переносимість програми,

яка працює в такому середовищі. Це дозволяє розгортати контейнер на будь-якому вузлі з встановленим диспетчером контейнерів, після чого його можна запускати та використовувати без потреби у додатковій зміні чи налаштуванні. Наприклад, розробник може розпочати розгортання програми у контейнері Hyper-V на Windows 11 (рис. 1).

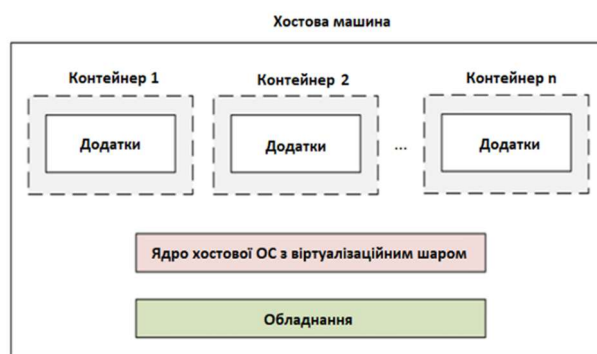


Рис. 1. Схематичне представлення контейнерної віртуалізації

Після завершення підготовки до робочого середовища таку програму можна розгорнути на Windows Server 2025 [13], включно з Nano Server, а також у публічній, приватній чи гібридній хмарі.

Контейнери складаються з кількох рівнів. Першим і базовим рівнем є образ операційної системи, на якому будуються всі наступні шари. Цей образ зберігається у репозиторії, що дозволяє використовувати його за необхідності, посилаючись на відповідне посилання. Наступний рівень, який може бути іноді й останнім, представляє платформу для додатків. Він може бути універсальним для всіх додатків. Наприклад, якщо базовий рівень побудовано на ядрі Windows Server, то платформою додатків можуть слугувати .NET Framework та Internet Information Services (IIS). Другий рівень також можна зберегти як окремий образ, який описує залежність від базового — ядра Windows Server. На рівні додатків розміщується сам додаток, що базується на платформі для додатків і водночас залежить від базового рівня системи.

На базовий рівень та рівень платформи додатків можуть посилатися всі створювані контейнери додатків у будь-який момент. Кожен рівень доступний лише для читання, за винятком верхнього рівня розгорнутого образу. Наприклад, якщо контейнер розгортається з використанням лише ядра Windows Server, то цей рівень стає верхнім у контейнері. Для збереження всіх операцій запису та змін, які

виконуються під час роботи, створюється пісочниця. Згодом ці зміни можна зберегти як окремий образ для подальшого використання. Такий самий підхід застосовується і під час розгортання образу з рівнем платформи додатків: цьому рівню присвоюється власна пісочниця, а після виконання програми пісочницю можна зберегти у вигляді образу для наступного використання.

Загальний принцип полягає в наступному: під час розгортання контейнера на вузлі система самостійно визначає наявність базового рівня. Якщо цього рівня немає, вузол завантажує його зі сховища образів. Аналогічний процес повторюється для рівня платформи додатків, після чого створюється необхідний контейнер додатка. У разі потреби створити інший контейнер із такими ж залежностями достатньо виконати команду для створення нового контейнера додатків. Новий контейнер буде готовий до роботи майже миттєво, оскільки всі необхідні компоненти вже є в наявності. Існуючі рішення контейнерної віртуалізації представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Існуючі рішення контейнерної віртуалізації

Тип	Ядро	Коротка характеристика
OpenVZ	Linux	Запуск на одному фізичному сервері безліч ізольованих копій ОС, які називають віртуальні приватні сервери або віртуальні середовища.
Linux upstream containers (LXC)	Linux	Схожа з технологією з OpenVZ, але вирізняється однією суттєвою особливістю — усе необхідне для роботи з LXC уже інтегровано в стандартне ядро Linux.
Windows Server і контейнери Hyper-V	Windows	Використовує номенклатуру контейнерів Windows для опису розділів, створених поверх рівня віртуалізації операційної системи
Docker	Linux	Відкрита платформа для розробки, доставки та запуску додатків. Використовує клієнт-серверну архітектуру
CoreOS	Linux	Спільний проєкт із відкритого впорядкування, який отримав назву Відкрита ініціатива контейнерів (OCI) під Linux

Змінювати розмір межі ресурсів, таких як процесор чи оперативна пам'ять, у контейнерах можна динамічно, без необхідності перезавантаження, завдяки функції ядра CGROUP. Проте у випадку з віртуальними машинами спочатку потрібно зупинити їх, виконати переналаштування, а тоді перезапустити. У підсумку процес масштабування для віртуальних машин є менш простим. Принцип функціонування технологій контейнерів, доступних в Windows Server 2025, показано на рис. 2.

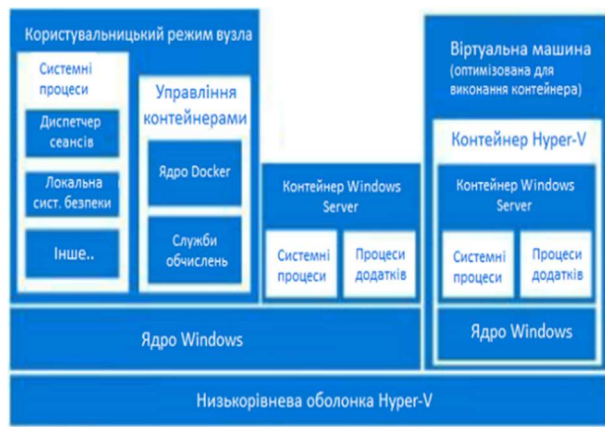


Рис. 2. Контейнери Windows Server 2025 і контейнери Hyper-V на одному і тому ж фізичному сервері

Серед недоліків технології віртуалізації та контейнеризації слід відмітити: складність управління при збільшенні кількості контейнерів, що працюють з додатком, перевантаження ресурсів при контейнери включенні значно більше компонентів і ресурсів, ніж це потрібно для коректної роботи програми, сумісність із Linux, що створює певні незручності під час роботи в середовищі Windows, роблячи його менш інтуїтивним і складнішим у щоденному використанні в порівнянні з Linux, короткий життєвий цикл.

Подальший розвиток використання контейнеризації наступний:

1) Міграція в хмару – це програмна стратегія, яка включає інкапсуляцію застарілих додатків у контейнери та розгортання їх у середовищі хмарних обчислень. Організації можуть модернізувати свої додатки без переписування всього програмного коду.

2) Впровадження мікросервісної архітектури. Організації, які прагнуть створювати хмарні додатки з мікросервісами, потребують технології контейнеризації. Архітектура мікросервісів – це підхід до

розробки програмного забезпечення, який використовує кілька взаємозалежних програмних компонентів для надання функціонального додатка. Кожен мікросервіс має унікальну і специфічну функцію. Сучасний хмарний додаток складається з декількох мікросервісів. Наприклад, додаток потокового відео може мати мікросервіси для обробки даних, відстеження користувачів, виставлення рахунків і персоналізації. Контейнеризація надає програмний інструмент для пакування мікросервісів у вигляді програм, що розгортаються на різних платформах.

3) Пристрої Інтернету речей (IoT). Пристрої IoT містять обмежені обчислювальні ресурси, що робить оновлення програмного забезпечення вручну складним процесом. Контейнеризація дозволяє розробникам легко розгортати та оновлювати додатки на пристроях IoT.

На перший погляд, віртуалізація та контейнеризація здаються схожими за своїми характеристиками. Проте контейнери й віртуальні машини – це зовсім різні технології. Тому твердження про те, що вони функціонують однаково, є некоректним. Віртуальні машини та контейнери мають різну природу і призначення, а також спрямовані на вирішення різних задач у сфері віртуалізації. Ці відмінності наочно продемонстровані на рис. 3.

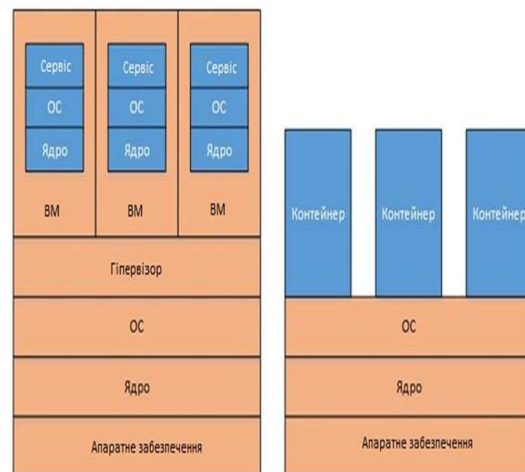


Рис. 3. Відмінність між віртуальною машиною (VM) і віртуальним контейнером

Гіпервізор потрібен для кожної VM використовується власна гостьова ОС. Дозволяє створювати неоднорідні обчислювальні середовища на одному комп'ютері. Через власну ОС VM може займати кілька ГБ, а запуск ОС і всіх додатків займає якийсь час.

Віртуальні машини функціонують на глибшому рівні, ніж контейнери. Вони забезпечують віртуалізацію програмного забезпечення, включаючи процесор, системи введення-виведення, пам'ять тощо. Віртуальні машини повністю містять операційну систему та виконують її незалежно від оточення основної системи, на якій запущений їхній образ. Завдяки цьому вони забезпечують повну ізоляцію процесів. Проте через те, що віртуальні машини включають весь функціональний набір операційної системи, вони доволі ресурсоємні. Така особливість може бути як перевагою, так і недоліком. Головна перевага полягає у високому рівні ізоляції процесів, які виконуються всередині віртуальної машини. З іншого боку, недоліком є обмеженість кількості віртуальних машин, що можуть одночасно працювати на одному сервері, оскільки вони потребують значних ресурсів для своєї роботи [11].

Розмір віртуальної машини значною мірою впливає на тривалість її запуску та зупинки. Процес запуску передбачає завантаження операційної системи, через що загальний час цього етапу зазвичай є досить тривалим.

На відміну від віртуальних машин, контейнери використовують спільні частини ядра як для гостьової, так і для хостової операційної системи. Вони не оперують концепцією окремої гостьової операційної системи. Завдяки технології контейнеризації забезпечується ізольоване середовище виконання безпосередньо на базі хостової операційної системи. Такий підхід має як переваги, так і певні недоліки. Основною перевагою контейнерів є їх легкість і висока швидкість роботи. Через те, що контейнери спільно використовують ресурси хостової операційної системи, їх споживання ресурсів є мінімальним. Це дозволяє запускати велику кількість невеликих контейнерів на одній машині, що значно важче реалізувати за допомогою віртуальних машин. Проте існують і певні обмеження. Через використання однієї хостової операційної системи неможливо, наприклад, налаштувати брандмауер (iptables) всередині окремого контейнера. Однак процеси в межах кожного контейнера залишаються повністю ізольованими та незалежними від процесів інших контейнерів, які працюють на тій самій хостовій системі.

Легка структура контейнерів відкриває широкий спектр можливостей для їх автоматизованого створення, розгортання,

завантаження та копіювання. Завдяки простоті виконання кількох команд або використанню REST API, завдання зі збору, доставки й запуску контейнера стає значно ефективнішим варіантом при розробці систем.

Контейнери мають значну перевагу порівняно з віртуальними машинами, проте останні також мають свої сильні сторони.

Для практичної реалізації віртуального середовища здійснено встановлення програмного забезпечення Oracle VirtualBox, яке використовується як гіпервізор для створення та керування віртуальними машинами [14]. Вибір даного програмного продукту обумовлений його безкоштовністю, кросплатформенністю, підтримкою широкого спектра гостьових операційних систем, а також наявністю розширених засобів конфігурації, що є необхідними для реалізації поставлених у роботі завдань.

Для забезпечення коректності аналізу обрано наступну конфігурацію:

- віртуальна машина: 2 CPU, 8192 MB RAM, ОС Ubuntu 24.04;
- хост-система: ОС Ubuntu 24.04 з встановленим Docker;
- програмне забезпечення: Docker 24.x, Nginx (офіційний образ).

Процес встановлення VirtualBox здійснювався на хост-операційній системі з урахуванням вимог до апаратної віртуалізації. Перед інсталяцією перевірено підтримку технологій Intel VT-x або AMD-V у налаштуваннях BIOS/UEFI, що є необхідною умовою для коректної роботи віртуальних машин. Після цього завантажено дистрибутив актуальної версії VirtualBox з офіційного джерела та виконано стандартну процедуру встановлення. Файли віртуальної машини було розміщено в окремому каталозі на диску хост-системи.

Результати дослідження наведені в таблиці 2.

Проведений аналіз дозволив виявити принципові архітектурні відмінності між класичною віртуалізацією та контейнеризацією. Віртуальна машина, що функціонує у середовищі VirtualBox, забезпечує повну ізоляцію гостьової ОС від хост-системи за рахунок використання гіпервізора та віртуалізованого апаратного забезпечення. Такий підхід мінімізує ризики впливу процесів гостьової системи на хост та інші віртуальні середовища. Контейнеризація забезпечує оптимальний баланс між рівнем ізоляції та

ефективністю використання обчислювальних ресурсів.

Таблиця 2

Результати досліджень

Критерій порівняння	Контейнер Docker (Nginx)	Віртуальна машина (Ubuntu + Nginx)
Стан простою	~3.3 міб	~1.2 гіб
Час розгортання	30с	600 с
Кількість кроків розгортання	3	12
Під навантаженням (ad, wrk)	~3.4 міб	~1.0-1.1 гіб
CPU-навантаження	низьке	100% на одному ядрі (wrk)
Кількість процесів	122	122
Налаштування ОС	Використання готового образу	Повна інсталяція та конфігурація
Мережа	Автоматичний проброс портів	Потрібна ручна конфігурація
Ресурси	Легке масштабування, спільні ресурси	Виділення RAM, CPU, диску
Супровід	Оновлення образу, CI/CD інтеграція	Оновлення ОС, драйвери
Швидкість Масштабування	Секунди	Хвилини-години
Тип ізоляції	Ізоляція процесів на рівні ОС	Повна ізоляція на рівні ОС та апаратури
Ядро операційної системи	Спільне ядро з хост-системою	Власне віртуалізоване ядро
Рівень безпеки	Середній	Високий
Ізоляція процесів	Забезпечується Linux namespaces	Повна
Доступ до апаратних ресурсів	Через механізми обмеження ресурсів	Через гіпервізор
Потенційні ризики	Вищі порівняно з VM	Мінімальні
Швидкість розгортання	Висока	Низька
Типові сценарії використання	Мікросхеми, веб-сервіси	Критичні системи, тестування ОС

Висновки. Досліджено сучасні підходи до віртуалізації обчислювальних середовищ, зокрема класичну віртуалізацію на основі віртуальних машин та контейнеризацію як

більш сучасну та легковагову альтернативу, що зумовлена широким впровадженням технологій віртуалізації у сфері інформаційних технологій, хмарних обчислень, DevOps-практик та розгортання масштабованих інформаційних систем. Проаналізовано архітектуру віртуальних машин, роль гіпервізора, механізми ізоляції ресурсів, а також принципи роботи контейнерів, які використовують спільне ядро операційної системи. Особливу увагу приділено питанням безпеки, продуктивності та ефективності використання апаратних ресурсів у кожному з підходів. Практично реалізоване розгортання віртуального середовища з використанням програмного забезпечення VirtualBox з ОС Ubuntu, налаштовано апаратні ресурси, мережеву взаємодію, встановлено доповнення Guest Additions та перевірено коректність роботи гостьової ОС. Отримано повноцінне ізольоване середовище, яке повністю імітує роботу окремого фізичного комп'ютера. Розгортання контейнерного середовища з використанням платформи Docker продемонструвала простоту та швидкість розгортання контейнерів у порівнянні з віртуальними машинами. Віртуальні машини є доцільними у випадках, коли необхідна максимальна ізоляція та незалежність середовищ, тоді як контейнери є оптимальним рішенням для швидкого розгортання, масштабування та ефективного використання обчислювальних ресурсів.

Література

1. Що таке контейнеризація та в чому її переваги. URL: <https://gigacloud.ua/articles/shho-take-kontejneryzaczija-ta-v-chomu-yiyi-perevagy/> (дата звернення 23.02.2026).
2. Що таке віртуалізація та які переваги вона надає. URL: <https://gigacloud.ua/articles/shho-take-virtualizaczija-ta-yaki-perevagy-vona-nadaye/> (дата звернення 23.02.2026).
3. Що таке хост система. URL: <https://mean.kultura.cx.ua/zhittya-v-kiievi/shho-take-khost-sistema.html> (дата звернення 23.02.2026).
4. Віртуалізація vs контейнеризація – порівняння відмінностей. URL: <https://alexhost.com/uk/faq/virtualization-vs-containerization-comparing-differences/> (дата звернення 23.02.2026).
5. Верес Л.А. Аналіз архітектурних особливостей віртуалізації та переваги віртуальних контейнерів. Збірник матеріалів XII Міжнародної науково-технічної конференції

- «Перспективи телекомунікацій», м. Київ, 2018. С. 116–118.
6. Віртуалізація серверів. URL: <https://bit-dp.com/it-support/virtualizacziya-serveriv/> (дата звернення 20.02.2026).
 7. Струбицький Р.П. Методи та алгоритми побудови хмарових сховищ даних на основі розподілених телекомунікаційних систем. URL: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/1551/disstrubyckyy2.pdf> (дата звернення 20.02.2026).
 8. Віртуалізація серверів: Порівняння VMware, Hyper-V та KVM. URL: <https://itez.com.ua/blog/vmware-hyper-v-kvm-detailed-comparison.html> (дата звернення 23.02.2026).
 9. Сизов А. Гіпервізори VMware VMware ESXi та його можливості. URL: <https://serversolutions.com.ua/blogs/news/гіпервізори-vmware-vmware-esxi-та-його-можливості?> (дата звернення 23.02.2026).
 10. Карпусь В. NVIDIA DGX A100 — система для прискорення ШІ-обчислень з 8 прискорювачами Tesla A100. URL: <https://itc.ua/news/nvidia-dgx-a100-sistema-dlya-uskoreniya-ii-vychislenij-s-8-uskoritelyami-tesla-a100-proizvoditelnostyu-5-petaflops-i-czenoj-200-tys/> (дата звернення 23.02.2026).
 11. Кардашук В.С., Тарасенко Д.Ю., Барбарук В.М. Віртуалізаційні технології та контейнеризація як засоби організації обчислювальних середовищ. IT-Ідея – 2025: збірник науково-практичних праць XI Міжнародного Форуму. – Київ: вид-во Східноукр. ун-ту ім. В. Даля, 2025. С. 106-109.
 12. Docker. The #1 containerization software for developers and teams. URL: <https://www.docker.com/products/docker-desktop/> (дата звернення 23.02.2026).
 13. Windows Server 2025: Нова ера гібридної хмари, безпеки та високої продуктивності. URL: <https://techexpert.ua/windows-server-2025-a-new-era-of-hybrid-cloud-security-and-high-performance/> (дата звернення 23.02.2026).
 14. Powerful open source virtualization. URL: <https://www.virtualbox.org> (дата звернення 23.02.2026).
 3. Shcho take khost systema. URL: <https://mean.kultura.cx.ua/zhittya-v-kiievi/shho-take-khost-sistema.html> (дата звернення 23.02.2026).
 4. Virtualizatsiia vs konteinerizatsiia – porivniannia vidminnostei. URL: <https://alexhost.com/uk/faq/virtualization-vs-containerization-comparing-differences/> (дата звернення 23.02.2026).
 5. Veres L.A. Analiz arkhitekturykh osoblyvosti virtualizatsii ta perevahy virtualnykh konteineriv. Zbirnyk materialiv KhII Mizhnarodnoi naukovotekhnichnoi konferentsii «Perspektyvy telekomunikatsii», м. Kyiv, 2018. S. 116–118.
 6. Virtualizatsiia serveriv. URL: <https://bit-dp.com/it-support/virtualizacziya-serveriv/> (дата звернення 20.02.2026).
 7. Strubyskyi R.P. Metody ta alhorytmy pobudovy khmarkovykh skhovysch danykh na osnovi rozpodilenykh telekomunikatsiinykh system. URL: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/dissertation/1551/disstrubyckyy2.pdf> (дата звернення 20.02.2026).
 8. Virtualizatsiia serveriv: Porivniannia VMware, Hyper-V та KVM. URL: <https://itez.com.ua/blog/vmware-hyper-v-kvm-detailed-comparison.html> (дата звернення 23.02.2026).
 9. Syzov A. Hipervizory VMware VMware ESXi ta yoho mozhlyvosti. URL: <https://serversolutions.com.ua/blogs/news/hipervizory-vmware-vmware-esxi-ta-yoho-mozhlyvosti?> (дата звернення 23.02.2026).
 10. Karpus V. NVIDIA DGX A100 — systema dlia pryskorennia ShI-obchyslen z 8 pryskoriuvachamy Tesla A100. URL: <https://itc.ua/news/nvidia-dgx-a100-sistema-dlya-uskoreniya-ii-vychislenij-s-8-uskoritelyami-tesla-a100-proizvoditelnostyu-5-petaflops-i-czenoj-200-tys/> (дата звернення 23.02.2026).
 11. Kardashuk V.S., Tarasenko D.Yu., Barbaruk V.M. Virtualizatsiini tekhnolohii ta konteinerizatsiia yak zasoby orhanizatsii obchysliuvalnykh seredovysch. IT-Ideia – 2025: zbirnyk naukovopraktychnykh prats KhI Mizhnarodnoho Forumu. – Kyiv: vyd-vo Skhidnoukr. un-tu im. V. Dalia, 2025. S. 106-109.
 12. Docker. The #1 containerization software for developers and teams. URL: <https://www.docker.com/products/docker-desktop/> (дата звернення 23.02.2026).
 13. Windows Server 2025: Nova era hibrydnoi khmary, bezpeky ta vysokoi produktyvnosti. URL: <https://techexpert.ua/windows-server-2025-a-new-era-of-hybrid-cloud-security-and-high-performance/> (дата звернення 23.02.2026).
 14. Powerful open source virtualization. URL: <https://www.virtualbox.org> (дата звернення 23.02.2026).

References

Ryazantsev O.I., Kardashuk V.S., Bortnyk K.Y., Barbaruk V.M. Virtualization and containerization as means of organizing computing environments

The article explores the use of virtualization and containerization for organizing computing processes. A thorough analysis of virtualization and containerization technologies, their principles of operation, and scope of application is conducted. It is established that virtualization allows you to create isolated computing environments with a high level of security and flexibility, but is accompanied by additional resource costs. Containerization provides ease of deployment, efficient use of hardware resources, and speed, which makes it especially relevant for modern DevOps processes and cloud infrastructures. The advantages and disadvantages of each approach are considered, as well as scenarios for their practical application. An overview of the VirtualBox and Docker platforms, which are used to implement virtualized and container environments, respectively, is provided. A comparative analysis of the functionality, advantages, and limitations of each platform is conducted. It is determined that VirtualBox provides flexible configuration of virtual machines and support for various guest Oses, while Docker is focused on lightweight, fast, and scalable containers. Based on the analysis, an experimental environment for testing performance was formed, which made it possible to objectively assess the effectiveness of both technologies in real conditions. A practical study and comparative analysis of two approaches to virtualization of computing environments were performed: classical virtualization based on virtual machines (VirtualBox) and containerization using the Docker platform. The effectiveness of each approach was assessed in terms of

performance, use of computing resources, isolation level, security, and ease of deployment. The results of the practical study confirmed that virtual machines and containers have different areas of effective application. Virtual machines are advisable to use in cases where the priority is maximum isolation and versatility of the environment, while containerization is the optimal solution for rapid deployment, efficient use of resources, and building scalable modern information systems. The results obtained can be used to select a virtualization technology depending on the requirements of a specific task in practical application.

Keywords: virtualization, containerization, scalability, operating system, server, application.

Рязанцев О.І. – д.т.н., професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, a_ryazantsev@snu.edu.ua

Кардашук В.С. – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, kardashuk1@gmail.com

Бортник К.Я. – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерної інженерії та безпеки Луцького національного технічного університету, katerina.bortnyk@gmail.com

Барбарук В.М. – к.т.н., доцент кафедри інформаційних систем і технологій національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», barbaruk.viktor@gmail.com

Стаття подана 19.12.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-28-34>

УДК 623.1.7

МОДЕРНІЗАЦІЯ АЕРОДРОМНОГО БАГАТОЦІЛЬОВОГО КОНДИЦІОНЕРА АМК-24/56-131 ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ СПЕЦІАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

Долінський М.П.

MODERNIZATION OF THE AIRFIELD MULTI-PURPOSE AIR CONDITIONING UNIT AMK-24/56-131 BY APPLYING AN ELECTRIC DRIVE FOR SPECIAL EQUIPMENT

Dolinskyi M.P.

У статті наведено результати дослідження шляхів та можливостей модернізації механічних приводів контуру обладнання та кабіни багатоцільового кондиціонера АМК-24/56-131 шляхом заміни їх на електропривід (ЕП), для покращення експлуатаційних характеристик. Вибір технічного рішення вдосконалення конструкції аеродромного багатоцільового кондиціонера (АБК) з розрахунком електроприводу контуру обладнання та контуру кабіни виконувалось з допомогою аналізу типорозмірного ряду електромашин, які підходять для заміни енергетичної установки (ЕУ) на ЕП в АМК-24/56-131, диференційного методу оцінки шляхом співставлення показників електромашин типорозмірного ряду із показниками базового зразка, метод аналізу, метод синтезу. Показано, що застосування вказаних методів розрахунку, конструювання, виготовлення, експлуатації АБК сприяє суттєвому підвищенню їх надійності і коефіцієнта технічної готовності при мінімальних показниках металомісткості та енергоємності, що є актуальним в даний час. Практичне значення одержаних результатів роботи полягає в покращенні експлуатаційних характеристик АБК АМК-24/56-131, а саме переходу на електропривід контурів АБК для підвищення якості їх приводу. Актуальність - підвищення показників надійності АБК для забезпечення стабільної роботи, безаварійної експлуатації та покращення економічної ефективності.

Досягнення високої надійності можливе завдяки зниженню впливу навантаження на вузли та агрегати АБК, вдосконаленню конструктивних рішень, підвищенню міцності й зносостійкості деталей, розширенню можливостей діагностики, здійсненню прискорених випробувань на всіх стадіях

розробки та вдосконаленню технічного обслуговування.

Об'єктом дослідження є процес експлуатації приводної системи спеціального обладнання аеродромного багатоцільового кондиціонера.

Предметом дослідження є визначення технічних рішень та конструктивних особливостей електроприводу спеціального обладнання АБК.

Мета: розробка шляхів модернізації приводів контуру обладнання та кабіни АБК АМК-24/56-131 шляхом заміни енергетичних установок на електропривід, для покращення експлуатаційних характеристик.

Ключові слова: електропривід, коефіцієнт корисної дії, асинхронний генератор, електродвигун

Вступ. Сучасне аеродромно-технічне забезпечення (АТЗ) авіації Повітряних Сил Збройних Сил України відзначається високою інтенсивністю, частими змінами місць базування, значним споживанням матеріальних ресурсів та виконанням завдань у різні пори року й часи доби. Незалежно від обставин, експлуатація засобів аеродромно-технічного забезпечення польотів (ЗАТЗП), зокрема АБК, повинна забезпечувати обслуговування повітряних суден (ПС) під час бойового чергування, планових польотів, підготовки до польотів і регламентних робіт. При цьому важливо дотримуватись раціонального використання моторесурсів, пального та гарантувати безаварійну експлуатацію техніки. Підвищення показників надійності АБК для забезпечення стабільної роботи, безаварійної

експлуатації та покращення економічної ефективності залишається актуальним завданням.

Досягнення високої надійності можливе завдяки зниженню впливу навантаження на компоненти АБК, вдосконаленню конструктивних рішень, підвищенню міцності й зносостійкості деталей, розширенню можливостей діагностики, проведенню прискорених випробувань на всіх етапах створення та вдосконаленню технічного обслуговування.

Аналіз останніх досягнень у публікаціях

В дослідженні [2] проведено аналіз технічних рішень щодо вдосконалення конструкції АБК з метою покращення технічних характеристик шляхом заміни додаткової енергетичної установки (ЕУ) [1]. Показано, що основними шляхами модернізації є:

- заміни двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) на електродвигун;
- заміни ДВЗ на гібридну силову установку;
- заміни механічного приводу контурів на гідрооб'ємний привід (ГОП) [3, 4];
- заміни в ЕУ карбюраторного ДВЗ на дизельний [5];

Розглянуті способи модернізації АБК мають ряд недоліків [2].

ГОП не в змозі розкрити весь потенціал енергоефективності АБК, а можливий розрив гідравлічних рукавів високого тиску при обслуговуванні ПС впливає на безпеку польотів.

При заміні в ЕУ одного типу ДВЗ на інший, не вирішується проблема використання двох ДВЗ в АБК.

Альтернативою приводу контурів кабіни та обладнання може бути електропривід (ЕП). ЕП має ряд переваг в порівнянні з механічним: дає можливість регулювати робочі швидкості в більш широких межах, дозволяє поєднувати робочі операції, має високий коефіцієнт корисної дії (ККД), може працювати від зовнішньої електричної мережі.

Мета і постановка завдань дослідження.

Метою дослідження є модернізація АБК АМК-24/56-131 шляхом заміни механічного приводу спеціального обладнання контурів обладнання та кабіни на ЕП для підвищення ефективності, надійності та енергоефективності його роботи, покращення експлуатаційних характеристик [6].

Для досягнення поставленої мети необхідно визначити параметри ЕП контурів кабіни та обладнання АБК АМК-24/56 та виконати розрахунки його складових частин.

Виклад основного матеріалу.

Електропривід – це електромеханічний пристрій, що здійснює кероване перетворення електричної енергії в механічну і призначений для приведення в рух робочих машин і механізмів. ЕП є ланкою, яка пов'язує енергосистему з технологічними установками. Електропривід приводиться в дію електродвигуном (ЕД), а регулювання сили та обертів ЕП виконується за допомогою системи керування (СК).

ЕП взаємодіє з системою електропостачання (генератор) або джерелом електричної енергії (електромережа аеродрому), з одного боку, та з технологічною установкою АБК, з іншого за допомогою системою керування та оператором. Найбільш поширені ЕП змінного струму з асинхронними електродвигунами (ЕД).

Електрична система ЕП складається з генератора, електродвигунів, СК (трансформаторів, апаратури керування, апаратури захисту, контрольно-вимірювальних приладів, допоміжних приладів) електро-силових дротів (ЕСД) (рис.1).

Механічна система складається з роздавальної коробки (РК), коробка відбору потужності (ВПП), приводних валів, запобіжно-обмежувальної системи).

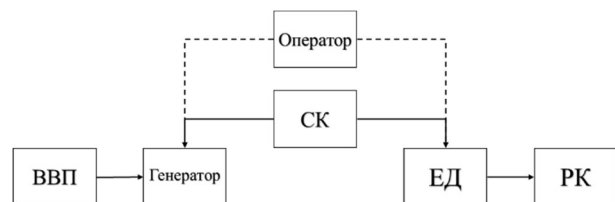


Рис. 1. Структурна схема електроприводу

Електропривод є ефективним засобом перетворення електричної енергії в механічну з можливістю гнучкого та точного керування режимами роботи виконавчих механізмів, сучасні генератори здатні забезпечувати стабільне електроживлення електроприводів у різних режимах експлуатації, у тому числі при автономній роботі та підключенні до зовнішніх електромереж [7].

Найбільш доцільними для застосування у складі електроприводів спеціального обладнання є ЕД змінного струму, зокрема асинхронні, які відрізняються простотою конструкції, високою надійністю, довговічністю та невибагливістю в експлуатації.

Сучасні СК дозволяють реалізувати автоматизовані режими роботи АБК, захист від

перевантажень і аварійних ситуацій, а також інтеграцію електроприводів у загальні системи керування обладнанням АБК. Сучасний рівень розвитку ЕП створює необхідні передумови для її впровадження, застосування ЕП є технічно обґрунтованим та перспективним напрямом модернізації АБК, спрямованим на підвищення енергоефективності, надійності та покращення експлуатаційних характеристик [8].

Крутний момент від коробки відбору потужності автомобіля ЗІЛ – 131Н передається на генератор. З генератора напруга по електросиловим дротам передається на ЕД №1. З ЕД №1 крутний момент передається на роздавальну коробку контуру кабіни. З генератора напруга по електросиловим дротам також передається на ЕД №2, від нього крутний момент передається на коробку передач контуру обладнання. Розглянемо кінематичну схему розподілу потужності в АМК-24/56-131 з ЕП контурів обладнання та кабіни (рис. 2).

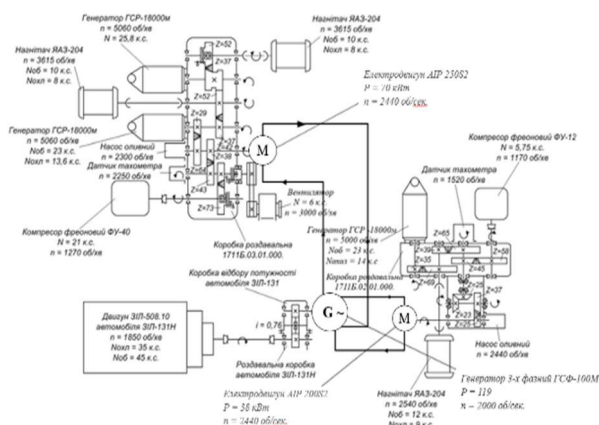


Рис. 2. Кінематична схема розподілу потужності в АМК-24/56-131 з ЕП контурів обладнання та кабіни

Залежно від умов експлуатації АМК 24/56-131:

- застосовується привід кабіни;
- застосовується привід обладнання;
- застосовуються приводи кабіни та обладнання одночасно.

Необхідна потужність для контуру кабіни складає 30 кВт в режимі охолодження, 38 кВт в режимі обігріву при робочих обертах 1850 хв⁻¹ на виході з ЕД №1.

Необхідна потужність для контуру обладнання складає 55 кВт в режимі охолодження і 66 кВт в режимі обігріву при робочих обертах 2300 хв⁻¹ на виході з ЕД №2.

Розрахунок потужності генератора і ЕД-1 і ЕД-2 здійснюється на основі таких параметрів, як необхідна потужність, крутний момент і

швидкість обертання валів роздавальних коробок контурів АБК.

Значення крутного моменту, що видається ЕД №1 і ЕД №2 розраховується по формулі [9]:

$$P = M \cdot \omega = \frac{M \cdot 2\pi \cdot n}{60} = \frac{M \cdot n}{9,550} = \frac{M \cdot n}{9550}, \text{ Вт} \quad (1)$$

Для контуру кабіни:

$$M \cdot n = P \cdot 9550 = 38 \cdot 9550 = 362900, \text{ Нм};$$

Для контуру обладнання:

$$M \cdot n = P \cdot 9550 = 66 \cdot 9550 = 63030, \text{ Нм};$$

$$M_{KK} = \frac{362900}{1850} = 196, \text{ Нм};$$

$$M_{KO} = \frac{63030}{2300} = 274, \text{ Нм};$$

Для необхідного ЕД-1 контуру кабіни маємо наступні вихідні дані:

1. Крутний момент, що видається ЕД-1 для контуру кабіни складає 196 Нм;

2. Частота обертання ЕД-1 ($n_{\max}$) для контуру кабіни = 1850 хв⁻¹;

3. Частота обертання валу коробки відбору потужності двигуна ($n_{\text{де}}$) яка передається на генератор: 1850 хв⁻¹;

4. Потужність ЕП контуру кабіни: 38 кВт.

Для необхідного ЕД-2 контуру обладнання маємо наступні вихідні дані:

1. Крутний момент, що видається ЕД-2 для контуру обладнання: 274 Нм;

2. Максимальна частота обертання ЕД-2 ($n_{\max}$) для контуру обладнання: 2300 хв⁻¹;

3. Частота обертання валу коробки відбору потужності двигуна ($n_{\text{де}}$) яка передається на генератор: 2300 хв⁻¹;

4. Потужність ЕП-2 складає 66 кВт.

Приведені вище дані систематизовані в таблицях 1 та 2.

Таблиця 1

Початкові дані для розрахунку ЕП-1 контуру кабіни

M_M , Нм	$n_{\max}$, хв ⁻¹	$n_{\text{де}}$, хв ⁻¹	L , м	S , мм
196	1850	1850	12	70

Таблиця 2
Початкові дані для розрахунку ЕП-2 контуру обладнання

M_M , Нм	$n_{\max}$, хв ⁻¹	$n_{\partial\partial}$, хв ⁻¹	L , м	S , мм
274	2300	2300	12	70

Примітка: M_M – крутний момент ЕД; L – довжина електросилових дротів; S – значення перерізу електросилового дроту.

Розрахунок проводимо асинхронних електродвигунів серії АІР (ЕД-1 і ЕД-2) інженерно-виробничого центру СКВ Укрелектромаш (м. Харків), частина якого релаксована у західні регіони України. Визначення потужності ЕД проводимо у два етапи [10].

Попереднє визначення потужності та числа обертів виконується з урахуванням заданого крутного моменту зовнішнього статичного навантаження та вибраного типу ЕД. При цьому враховуються його конструкція, технічні характеристики, зокрема номінальна частота обертання, потужність і коефіцієнт корисної дії (ККД).

Основними характеристиками ЕД є крутний момент і потужність.

Крутний момент електродвигуна: це значення зусилля, з яким обертається приводний вал.

$$P = M \cdot \omega \quad (2)$$

де P – потужність ЕД (Вт), M – крутний момент ЕД (Н·м), ω – кутова швидкість (рад/с).

Цей момент на валу ЕД має значення, оскільки характеризує можливості ЕД. Він вимірюється в Ньютон-метрах (Н·м) і залежить від потужності ЕД, напруги, сила струму та конструкція ЕД.

Потужність залежить від частоти, з якою обертається приводний вал: що швидше він обертається, то більшу потужність демонструє ЕД.

Таким чином, крутний момент важливий для сили, а потужність для швидкості виконання роботи.

Формула максимального моменту асинхронного ЕД передбачає граничне значення, у якому навантаження врівноважує і зупиняє його.

Формула крутного моменту виглядає так:

$$M = P \cdot n \quad (3)$$

де P – потужність ЕД (кВт), n – кількість обертів за хвилину (хв⁻¹).

Беремо до уваги коефіцієнт ковзання в асинхронних ЕД.

Ще одна формула для розрахунку крутного моменту (M) електричного двигуна враховує його потужність (P) та швидкість обертання валу (n):

$$M = \frac{P \cdot 60}{2\pi \cdot n} \quad (4)$$

де M – крутний момент (Н·м), P – потужність ЕД (кВт), n – швидкість обертання валу (хв⁻¹).

Ця формула дозволяє визначити крутний момент, який ЕД може передавати на приводний вал, при заданій потужності та швидкості обертання.

Для асинхронних установок доцільно використовувати трифазний інвертор або частотний перетворювач. Він знижує частоту та збільшує кількість обертів [11–13].

У каталозі інженерно-виробничого центру СКВ Укрелектромаш підбрали ЕД марки АІР для забезпечення максимальних необхідних технічних характеристик [14].

$\eta_{e\partial}$ – ККД ЕД, це відношення корисної потужності (механічної) до споживаної ЕД (електричної).

$$\eta_{e\partial} = \frac{A_{\text{мех}}}{A_{\text{ел}}} \quad (5)$$

де $A_{\text{мех}}$ – корисна механічна потужність, що віддається на вал ЕД; $A_{\text{ел}}$ – споживана електрична потужність, що підводиться до ЕД.

$$\eta_{e\partial} = \frac{109,5}{119} = 0,92$$

Визначаємо електричну потужність генератора для приводу ЕД АБК при номінальних режимах роботи [15].

Електрична потужність генератора визначається за формулою:

$$P = U \cdot I \quad (6)$$

де P – потужність генератора, (кВт); U – напруга на виході генератора, (В); I – струм, що віддає генератор, (А).

Для ЕД-1 контуру кабіни:

Номінальна напруга: $U = 380$ В;

Номінальний струм: $I = 100$ А.

Потужність 38 кВт.

$$P = U \cdot I = 380 \cdot 100 = 38000 \text{ Вт} = 38 \text{ кВт}$$

Для ЕД-2 контуру обладнання:

Номинальна напруга: $U = 380 \text{ В}$;

Номинальний струм: $I = 174 \text{ А}$.

Потужність 66 кВт.

$$P = U \cdot I = 380 \cdot 174 = 66000 \text{ Вт} = 66 \text{ кВт}$$

Генератор повинен забезпечити для роботи контуру кабіни потужність 38 кВт, для роботи контуру обладнання 66 кВт, а для одночасної роботи контурів кабіни та обладнання необхідна потужність становити 104 кВт що достатньо для живлення обладнання АБК електроприводів, системи керування, освітлення, та заряджання акумуляторних батарей.

Потужність, споживана АБК, не повинна перевищувати потужність генератора. З умови, що запас потужність вибраного генератора повинен становити 15%: це становить 120 кВт.

Для розрахунку діаметру багатожильного дроту необхідно виміряти діаметр кожного окремого дроту і знайти їх середнє значення. Розрахунок здійснюється за формулою:

$$S = 0,785 \cdot n \cdot D^2 \quad (7)$$

де n – кількість жил, D – середній діаметр, S – площа поперечного перерізу. Виміряємо діаметр одного дроту і множимо на їх кількість.

Для ЕСД існує певний набір перерізів, зазначений в нормах. Знаючи необхідний переріз, знаходимо діаметр дроту в таблиці підбору перетину кабелю і проводу по потужності і силі струму (S_u) [16].

Переріз дротів знаходимо 70 мм² (для струму 180 А і потужності 118,8 кВт).

Знаходимо діаметр жили:

$$D^2 = \frac{S}{0,785 \cdot n} \quad (8)$$

$$D^2 = \frac{70}{0,785 \cdot 120} = \sqrt{0,74}$$

$$D = 0,86 \text{ мм};$$

Кабель силовий 3 – фазний з нейтраллю з 120 жилами та нейтраллю 25 жил та діаметром 0,86 мм.

Довжину ЕСД було виміряно за допомогою вимірювальних приладів, необхідна довжина з урахуванням комутації та запасу становить 12 метрів.

Висновки. Розрахункові показники генератора та ЕД відповідають технічним характеристикам ЕД типу АІР, це означає що вибір ЕД по потужності, ККД, крутному моменту проведений коректно. Це сприяє зменшенню навантажень на елементи системи ЕП, зниженню зношування та продовженню ресурсу електроагрегатів, збереженню необхідної ефективності і надійності роботи технологічного обладнання АБК. По результатам розрахунків ЕП проведений вибір асинхронних ЕД: моделі АІР 250 та АІР 200 та генератора ГСФ-100М. Корисна потужність генератора складає 120 кВт, що задовольняє вимогам завдання (66 кВт контур обладнання та 38 кВт контур кабіни).

Потужність КВП роздавальної коробки автомобіля ЗІЛ-131Н достатньо для забезпечення роботи генератора (119 кВт), потреби розробки завдання на проектування нової роздавальної коробки немає.

В якості системи керування та захисту ЕП вибрані частотні перетворювачі які забезпечать безперебійну і надійну роботу АБК.

Проведений розрахунок перерізу і довжини ЕСД живлення ЕД показав що їх необхідна довжина 12 м та перерізом 70 мм² з діаметром жили 0,86 мм.

Визначена доцільність проведення модернізації приводу АМК-24/56-131, яка відповідає сучасним вимогам аеродромно-технічного забезпечення бойових дій авіації.

Наступним етапом модернізації АБК може бути заміна шасі ЗІЛ-131Н на КраЗ-5233НЕ підвищеної прохідності.

Література

1. Техніка аеропортів. Аеродромні багатоцільові кондиціонери. Частина 3 : підручник / В. В. Кав'юк, та ін. Харків : ХНУПС, 2025. 254 с.
2. Звіт про НДР (остаточний) (шифр "Кондиціонер") / ХНУПС; № 0123U104062; Інв. № 19911. Харків : ХНУПС, 2023. 187 с.
3. Краснокутський В. М., Кав'юк В. В., Вахнюк С. А., Долінський М. П. Модернізація аеродромного багатоцільового кондиціонера АМК-24/56-131 шляхом заміни енергетичної установки приводу контуру обладнання та

- кабіни на гідрооб'ємний привід. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР*. Харків 2025. № 2. С. 64-73.
4. Краснокутський В. М., Долінський М. П., Будир В. В. Modernization of the drive system of multi-purpose airfield conditioner AMK-24/56-131 through replacement of the auxiliary power unit with a hydrostatic drive. *Актуальні проблеми військово-технічної політики та напрямки озброювання Збройних Сил України в умовах воєнного стану* : матеріали Міжнар. наук.-техн. Конф. Центрального науково-дослідницького інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України., м. Київ, 2024. С. 279.
 5. Кашканов А. А., Краснокутський В. М., Кав'юк В. В., Матющенко С. Я. Обґрунтування тактико-технічних характеристик додаткової енергетичної установки при модернізації аеродромного багатоцільового кондиціонера AMK-24/56-131. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Автомобіле- та тракторобудування*. Харків 2023. № 2. С. 3-17.
 6. Краснокутський В. М., Кав'юк В. В., Вахнюк С. А., Долінський М. П. Аналіз шляхів підвищення технічних показників енергетичної установки блоку приводу контуру обладнання аеродромного багатоцільового кондиціонера AMK-24/56-131. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Автомобіле- та тракторобудування*. Харків 2025. № 2 С. 28-36.
 7. Закладний О. М., Прокопенко В. В., Закладний О.О. Електропривод : навч. посіб. Київ : НТУУ "КПІ", 2008. 316 с.
 8. Електричні машини і апарати : навч. посіб. / Ю.М. Куценко та ін. Київ : НТУУ "КПІ", 2013. 449 с.
 9. Гайденок Ю. А. Електричні машини : навч. посіб. Київ : НТУУ "КПІ", 2024. 211 с.
 10. ТМ "Мотор" : веб-сайт. URL: <https://tmmotor.ua/ua/news/typy-elektrodrigatelej-i-ih-ispolzovanie> (дата звернення: 25.01.2026)
 11. Теряев В. І. Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність : навч. посіб. Київ : НТУУ "КПІ", 2022. 204 с.
 12. Сенько В. І., Трубіцин К. В., Чибеліс В. І. Інвертори і перетворювачі частоти : навч. посіб. Київ : Видавництво Ліра-К, 2020. 300 с.
 13. Dolinskyi M. Development of a remote control system for switching ON/OFF hydraulic pumps in the cabin and equipment hydraulic circuits of the AMK-24/56-131 aerodrome multi-purpose air condition unit. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXIII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2025*, 14-17 травня 2025 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. Харків : НТУ "ХПІ". 1882 с.
 14. "Specialist" : веб-сайт. URL: <https://spc.com.ua/products/nietz-splc-nl1000-75g-4-frequency-inverter-75kw-3phase-380v-ip20/> (дата звернення: 24.01.2026)
 15. "Провент" : веб-сайт. URL: <https://provent.ua/ua/statti/metodiki-rozrakhunku-krutnogo-momentu-elektrodriguna/> (дата звернення: 21.01.2026)
 16. "Італ-техно" : веб-сайт. URL: <https://ital-tecno.com.ua/kak-opredelit-diametr-provoda-po-secheniu> (дата звернення: 29.01.2026)

References

1. Airport Equipment. Airfield Multi-Purpose Air Conditioners. Part 3: textbook / V. V. Kaviuk, and other. Kharkiv : KhNAFU, 2025. 254 p.
2. R&D Report (Final) (code "Air Conditioner") / KhNUPS; No. 0123U104062; Inv. No. 19911. Kharkiv : KhNAFU, 2023.187 p.
3. Krasnokutskyi V. M., Kaviuk V. V., Vakhniuk S. A., Dolinskyi M. P. Modernization of the aerodrome multi-purpose air conditioner AMK-24/56-131 by replacing the power unit of the equipment and cabin circuit drive with a hydrostatic drive. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Engineering and CAD (collection of scientific papers)*. Kharkiv 2025. No. 2. pp. 64–73.
4. Krasnokutskyi V. M., Dolinskyi M. P., Budyr V. V. Modernization of the drive system of multi-purpose airfield conditioner AMK-24/56-131 through replacement of the auxiliary power unit with a hydrostatic drive. *Actual Problems of Military-Technical Policy and Directions of Armament of the Armed Forces of Ukraine under Martial Law* : materials of the International Scientific and Technical Conference of the Central Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine., Kyiv, 2024. p. 279.
5. Kashkanov A. A., Krasnokutskyi V. M., Kaviuk V. V., Matiushchenko S. Ya. Substantiation of the tactical and technical characteristics of an auxiliary power unit during modernization of the aerodrome multi-purpose air conditioner AMK-24/56-131. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Automobile and Tractor Engineering (collection of scientific papers)*. Kharkiv : 2023. No. 2. pp. 3–17.
6. Krasnokutskyi V. M., Kaviuk V. V., Vakhniuk S. A., Dolinskyi M. P. Analysis of ways to improve the performance indicators of the power unit of the equipment circuit drive block of the aerodrome multi-purpose air conditioner AMK-24/56-131. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automobile and Tractor Engineering*. Kharkiv 2025. № 2 pp. 28–36.

7. Zakladnyi O. M., Prokopenko V. V., Zakladnyi O. O. Electric Drive : Study Guide. Kyiv : NTUU “KPI”, 2008. 316 p.
8. Electrical Machines and Apparatus: Study Guide. / Kutsenko Yu. M. and other. Kyiv : NTUU “KPI”, 2013. 449 p.
9. Haidenko Yu. A. Electrical Machines: Study Guide. Kyiv: NTUU “KPI”, 2024. 211 p.
10. TM “Motor” : website. URL : <https://tmmotor.ua/ua/news/typy-elektroprivodiv-i-ih-ispolzovanie> (accessed: 25 Jan 2026).
11. Teryaiev V. I. Electromechanical Automation Systems, Electric Drive and Electromobility. Study Guide. Kyiv : NTUU “KPI”, 2022. 204 p.
12. Senko V. I., Trubitsyn K. V., Chybelis V. I. Inverters and Frequency Converters : Study Guide. Kyiv : Lira-K Publishing House, 2020. 300 p.
13. Dolinskyi M. Development of a remote control system for switching ON/OFF hydraulic pumps in the cabin and equipment hydraulic circuits of the AMK-24/56-131 aerodrome multi-purpose air condition unit. *Information technologies: science, engineering, technology, education, health: abstracts of reports of the XXIII International Scientific and Practical Conference MicroCAD-2025*, May 14-17, 2025 / edited by Prof. Sokol E.I. Kharkiv : NTU “KhPI”. 1882 p.
14. “Specialist” : website. URL : <https://spc.com.ua/products/nietz-splc-nl1000-75g-4-frequency-inverter-75kw-3phase-380v-ip20/> (accessed : 24 Jan 2026).
15. “Provent” : website. URL : <https://provent.ua/ua/statti/metodiki-rozrakhunku-kрутного-momentu-elektroprivoda/> (accessed: 21 Jan 2026).
16. “Ital-tecno” : website. URL : <https://ital-tecno.com.ua/kak-opredelit-diametr-provoda-po-secheniu> (accessed : 29 Jan 2026).

Dolinskyi M.P. Modernization of the airfield multi-purpose air conditioning unit AMK-24/56-131 by applying an electric drive for special equipment

The article presents the results of a study on the ways and possibilities of modernizing the mechanical drives of the equipment loop and cabin loop of the AMK-24/56-131 multi-purpose air conditioner by replacing them with an electric drive (ED) to improve operational characteristics. The selection of a technical solution for improving the design of the airport multi-purpose air conditioner (AMAC), including the calculation of the electric drive for the equipment loop and the cabin loop, was carried out using an analysis of the standard size range of electric machines suitable for replacing the power plant (PP) with an ED in the AMK-24/56-131, a differential evaluation method by comparing the indicators of the standard size range of electric machines with those of the reference model, as well as methods of analysis and synthesis. It is shown that the application of these methods for the calculation, design, manufacture, and operation of AMAC contributes to a significant increase in their reliability and technical readiness coefficient with minimal indicators of metal intensity and energy intensity, which is currently relevant. The practical significance of the obtained results lies in improving the operational characteristics of the AMAC AMK-24/56-131, specifically the transition to an electric drive for the AMAC loops to enhance the quality of their drive. The relevance lies in increasing the reliability indicators of the AMAC to ensure stable operation, trouble-free service, and improved economic efficiency. Achieving high reliability is possible by reducing the impact of load on the AMAC components and assemblies, improving design solutions, increasing the strength and wear resistance of parts, expanding diagnostic capabilities, conducting accelerated tests at all stages of development, and improving maintenance. The object of the study is the operation process of the drive system of the special equipment of the airport multi-purpose air conditioner. The subject of the study is the determination of technical solutions and design features of the electric drive of the AMAC special equipment. Purpose: to develop ways to modernize the drives of the equipment loop and cabin loop of the AMAC AMK-24/56-131 by replacing the power plants with an electric drive to improve operational characteristics.

Keywords: electric drive, efficiency, asynchronous generator, electric motor

Долінський Михайло Петрович – Харківський національний університет Повітряних Сил, викладач кафедри аеродромно-технічного забезпечення авіації; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5260-7245>; e-mail: makenzzyzz@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-35-40>

УДК 629.017

ВПЛИВ ВІДКЛЮЧЕННЯ ЧАСТИНИ ЦИЛІНДРІВ НА НЕРІВНОМІРНІСТЬ КРУТНОГО МОМЕНТУ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Подригало М.А., Вахнюк С.А.

THE EFFECT OF CYLINDER DEACTIVATION ON THE UNEVENNESS OF THE TORQUE OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Podrygalo M.A., Vakhniuk S.A.

Одним з напрямлень в підвищенні енергоефективності роботи автомобілів при часткових навантаженнях є відключення частини циліндрів їх двигунів внутрішнього згоряння. Нерівномірність крутного моменту впливає на динамічні властивості автомобіля і його енергоефективність. В роботі було проведено дослідження впливу відключення частини циліндрів на нерівномірність індикаторного крутного моменту двигунів внутрішнього згоряння. В багатьох роботах для оцінки енергоефективності моторно-трансмісійних установок було запропоновано цикловий пружно-динамічний коефіцієнт корисної дії. Однак в цих роботах не визначався вплив на нерівномірність індикаторного крутного моменту відключення частини циліндрів при зниженні зовнішнього навантаження на двигун внутрішнього згоряння. З метою оцінки впливу відключення частини циліндрів на нерівномірність індикаторного крутного моменту двигуна внутрішнього згоряння встановленого на автомобіль необхідно провести дослідження та вирішити такі завдання як: визначити зміну коефіцієнта нерівномірності індикаторного крутного моменту при відключенні частини циліндрів двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) та максимальну кількість циліндрів, яку можливо відключити при виконанні умови забезпечення руху автомобіля. Проведені дослідження вказують на те, що незалежно від кількості відключених циліндрів, коефіцієнт нерівномірності індикаторного крутного моменту не змінюється. При цьому зменшуються як амплітуда коливань індикаторного крутного моменту, так і його середнє значення. Показано, що при реалізації максимальної ефективної потужності двигуна N_{emax} та середньої ефективної потужності двигуна під час експлуатації N_e можливе відключення до половини

циліндрів. При відключенні частини циліндрів двигуна внутрішнього згоряння можливий випадок коли може збільшитися зовнішній опір руху автомобіля. За рахунок реалізації максимальної потужності в циліндрах, які залишилися працюючими, проведена оцінка можливості подолання цього опору. Для проведення в подальшому досліджень виникає питання о доцільності реалізації в кожному відключеному циліндрі двигуна внутрішнього згоряння максимальної індикаторної потужності. Для вирішення цього питання більш раціональним може бути економічно доцільним варіант підключення частини відключених циліндрів. Результати проведеного дослідження в подальшому можуть бути використані при оцінці енергоефективності автомобілів.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, індикаторний крутний момент, колінчастий вал, автомобіль, відключення частини циліндрів, цикл коливань.

Вступ. Відключення частини циліндрів двигуна внутрішнього згоряння при часткових навантаженнях є одним з напрямлень в підвищенні енергоефективності автомобілів [5 – 8].

В цій статті досліджено вплив відключення частини циліндрів на нерівномірність індикаторного крутного моменту ДВЗ. Визначено, що незалежно від кількості відключених циліндрів, коефіцієнт нерівномірності індикаторного крутного моменту не змінюється. Показано, що при реалізації максимальної ефективної потужності двигуна N_{emax} та середньої ефективної потужності двигуна під час експлуатації N_e

можливе відключення до половини циліндрів. Результати проведеного дослідження в подальшому можуть бути використані при оцінці енергоефективності автомобілів.

Аналіз останніх досягнень та публікацій.

Нерівномірність крутного моменту впливає на динамічні властивості автомобіля і його енергоефективність. Для оцінки енергоефективності моторно-трансмісійних установок в роботах [1 – 3] запропоновано цикловий пружно-динамічний коефіцієнт корисної дії.

$$(\eta_{mp}^{np})_{цикл} = 1 - \frac{A_M \left(1 - \frac{A_M}{2M_i}\right)}{\pi J_{зв} \overline{\omega_e} \omega_M \left(\frac{k^2}{\omega_M^2} - 1\right)}, \quad (1)$$

де A_M – амплітуда коливань індикаторного крутного моменту,

$$A_M = 0,5k_1 \overline{M_i}, \quad (2)$$

де $\overline{M_i}$ – середнє за цикл коливань значення індикаторного крутного моменту роботи ДВЗ,

$$\overline{M_i} = \frac{M_{i\max} + M_{i\min}}{2}, \quad (3)$$

де $M_{i\max}$; $M_{i\min}$ – максимальне і мінімальне значення індикаторного крутного моменту за цикл його коливань;

$J_{зв}$ – приведений до колінчастого валу ДВЗ момент інерції мас, що обертаються, трансмісії і поступально рухомою масою автомобіля;

$\overline{\omega_e}$ – середнє за цикл коливань значення кутової швидкості;

ω_M – кругова частота коливань індикаторного крутного моменту ДВЗ,

$$\omega_M = 0,5\overline{\omega_e} i_u, \quad (4)$$

де i_u – число циліндрів ДВЗ;

k – кругова частота власних (вільних) коливань вхідного кінця валу трансмісії,

$$k = \sqrt{\frac{C_{зв}}{J_{зв}}}, \quad (5)$$

де $C_{зв}$ – кутова жорсткість трансмісії, приведена до колінчастого валу ДВЗ;

k_1 – коефіцієнт нерівномірності індикаторного крутного моменту ДВЗ,

$$k_1 = \frac{M_{i\max} - M_{i\min}}{\overline{M_i}}. \quad (6)$$

Для оцінки нерівномірності індикаторного крутного моменту ДВЗ використовується також ступінь нерівномірності індикаторного крутного моменту

$$k = \frac{M_{i\max}}{\overline{M_i}} = k_1 + \frac{M_{i\min}}{\overline{M_i}}. \quad (7)$$

Однак у відомих дослідженнях [1-4] не визначено вплив на нерівномірність індикаторного крутного моменту відключення частини циліндрів при зниженні зовнішнього навантаження на ДВЗ.

Мета і постановка завдань дослідження.

Метою дослідження є оцінка впливу відключення частини циліндрів на нерівномірність індикаторного крутного моменту двигуна внутрішнього згоряння встановленого на автомобіль.

Для досягнення мети, яку поставлено, необхідно вирішити наступні завдання:

– визначити зміну коефіцієнта нерівномірності індикаторного крутного моменту при відключенні частини циліндрів ДВЗ;

– визначити максимальну кількість циліндрів, яку можливо відключити при виконанні умови забезпечення руху автомобіля.

Виклад основного матеріалу. Для багатциліндрового двигуна індикаторний крутний момент можна визначити як

$$M_{i\Sigma} = i_u \cdot \sum_{j=1}^{i_u} M_{ij}, \quad (8)$$

де $M_{i\Sigma}$ – сумарний індикаторний момент двигуна;

M_{ij} – індикаторний крутний момент, що утворюється одним ДВЗ.

При абсолютній рівномірності індикаторних крутних моментів по циліндрам можна прийняти

$$M_{i1} = M_{i2} = \dots = M_{ij} = \frac{M_{i\Sigma}}{i_u}, \quad (9)$$

де M_{i1} ; M_{i2} ; M_{ij} – індикаторні крутні моменти, що утворюються в першому, другому та в j – тому циліндрах.

Якщо розглядати зміни індикаторного крутного моменту по гармонійному закону [1, 2], та він має вигляд

$$M_i = \overline{M_{i\Sigma}} \left[1 + \frac{k_1}{2} \sin \left(\frac{\omega_e}{2} i_u t \right) \right], \quad (10)$$

де $\overline{M_{i\Sigma}}$ – середнє за цикл коливань значення сумарного індикаторного крутного моменту, що утворюється всіма циліндрами ДВЗ;
 t – час.

Амплітуда коливань індикаторного крутного моменту в цьому випадку буде рівна

$$A_{Mi} = \overline{M_{i\Sigma}} \cdot \frac{k_1}{2}. \quad (11)$$

Приймаємо припущення того, що кут φ_B повороту колінчастого валу можливо визначити по середній кутовій швидкості колінчастого валу $\overline{\omega_e}$, отримаємо [1, 2]

$$\varphi_B = \overline{\omega_e} t, \quad (12)$$

Рівняння (10) з урахуванням (12) набуде вигляду

$$M_i = \overline{M_{i\Sigma}} \left[1 + \frac{k_1}{2} \sin \left(\frac{\varphi_B}{2} i_u \right) \right] = \overline{M_{i\Sigma}} + A_{Mi} \sin \left(\frac{\varphi_B}{2} i_u \right). \quad (13)$$

Максимальне і мінімальне значення індикаторного крутного моменту (рис.).

$$M_{i \max} = \overline{M_{i\Sigma}} + A_{Mi}, \quad (14)$$

$$M_{i \min} = \overline{M_{i\Sigma}} - A_{Mi}. \quad (15)$$

При відключенні m циліндрів

$$M'_{i\Sigma} = M_{i1}(i_u - m). \quad (16)$$

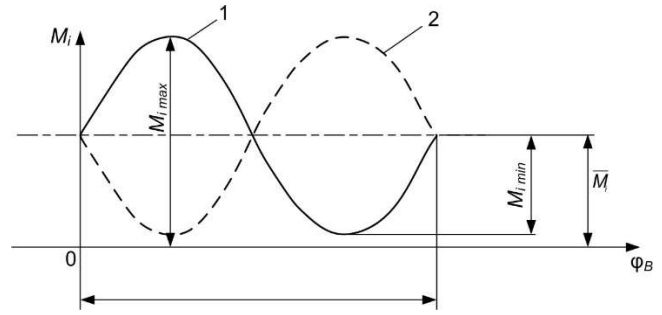


Рис. Графіки залежності $M_i(\varphi_B)$ для двоциліндрового ДВЗ [1, 2]

Амплітуда коливань індикаторного крутного моменту в цьому випадку

$$A'_{Mi} = \overline{M_{i1}}(i_u - m) \cdot \frac{k_1}{2}. \quad (17)$$

Максимальний і мінімальний індикаторні моменти при відключенні частини циліндрів ДВЗ будуть мати вигляд

$$M'_{i \max} = \overline{M_{i1}}(i_u - m) + \overline{M_{i1}}(i_u - m) \cdot \frac{k_1}{2} = M_{i1}(i_u - m) \cdot \left(1 + \frac{k_1}{2} \right), \quad (18)$$

$$M'_{i \min} = \overline{M_{i1}}(i_u - m) - \overline{M_{i1}}(i_u - m) \cdot \frac{k_1}{2} = M_{i1}(i_u - m) \cdot \left(1 - \frac{k_1}{2} \right). \quad (19)$$

Середній індикаторний момент ДВЗ за один цикл його коливань

$$\overline{M'_{i\Sigma}} = \frac{M'_{i \max} + M'_{i \min}}{2} = \overline{M_{i1}}(i_u - m). \quad (20)$$

Коефіцієнт нерівномірності індикаторного крутного моменту ДВЗ при відключенні частини циліндрів

$$k'_1 = \frac{\overline{M_{i1}}(i_u - m) \cdot \left(1 + \frac{k_1}{2} \right) - \overline{M_{i1}}(i_u - m) \cdot \left(1 - \frac{k_1}{2} \right)}{\overline{M_{i1}}(i_u - m)} = k_1. \quad (21)$$

Таким чином при відключенні m циліндрів ДВЗ коефіцієнт нерівномірності індикаторного крутного моменту не змінюється. При цьому зменшуються як амплітуда коливань індикаторного крутного моменту, так і його середнє значення.

При відключенні частини циліндрів ДВЗ можливий випадок коли може збільшитися

зовнішній опір руху автомобіля. Зробимо оцінку можливості подолання цього опору за рахунок реалізації максимальної потужності в циліндрах, які залишилися працюючими.

З відомих статистичних даних середнє значення індикаторної потужності двигуна складає

$$\overline{N_i} \cong 0,5 N_{i \max}. \quad (22)$$

де $N_{i \max}$ – максимальна індикаторна потужність;

$\overline{N_i}$ – середнє значення (математичне очікування) реалізованої індикаторної потужності двигуна автомобіля.

Якщо запас потужності у невідключених циліндрах $(i_u - m)$ дозволить, за рахунок збільшення подачі палива, отримати

$$\overline{M'_{i\Sigma}} = \overline{M_{i\Sigma}}. \quad (23)$$

то в цьому випадку будемо мати

$$\overline{M'_{il}}(i_u - m) = \overline{M_{il}} i_u. \quad (24)$$

Враховуючи, що

$$\left(\frac{\overline{M'_{il}}}{\overline{M_{il}}} \right)_{\max} = \frac{N_{i \max}}{N_i} \cong 2, \quad (25)$$

Приводимо (24) до вигляду

$$\frac{\overline{M'_{il}}}{\overline{M_{il}}} = \frac{i_u}{i_u - m} = \frac{1}{1 - \frac{m}{i_u}} \leq 2. \quad (26)$$

Звідти знаходимо

$$m \leq i_u. \quad (27)$$

В таблиці приведені значення максимальної кількості $m_{\max}$ відключених циліндрів в залежності від загальної кількості $i_{\text{ц}}$ циліндрів ДВЗ при збереженні умов реалізації рівня середньої індикаторної потужності

$$\overline{N_i} \leq N_{i \max}. \quad (28)$$

Таблиця

Розрахунок максимальної кількості $m_{\max}$ відключених циліндрів для ДВЗ з різною кількістю циліндрів

$i_{\text{ц}}$	2	3	4	6	8	12
$m_{\max}$	1	1	2	3	4	6

Для проведення в подальшому досліджень виникає питання о доцільності реалізації в кожному відключеному циліндрі ДВЗ максимальної індикаторної потужності (при повній подачі палива). Може бути більш економічно доцільним варіант підключення частини відключених циліндрів.

Висновки.

1. В результаті проведеного дослідження визначено, що відключення частини циліндрів ДВЗ при зниженні навантаження на двигун автомобіля не тягне за собою збільшення коефіцієнта нерівномірності індикаторного крутного моменту.

2. Враховуючи наявність запасу потужності в циліндрах, що не відключаються, визначено максимально допущена кількість циліндрів, яку можна відключити без нанесення шкоди для реалізації необхідної для руху автомобіля індикаторної потужності двигуна.

3. В процесі наступних досліджень необхідно вирішити питання в тім, що є більш економічно вигідним варіантом – збільшення індикаторної потужності в циліндрах що не відключаються або підключення в роботу частини відключених циліндрів.

Література

1. Динаміка машин з пружними ланками. На прикладі автомобілів і тракторів. Монографія [текст] / за ред. М.А. Подригало та О.С. Полянського. Харків: Естет Прінт, 2024. 272 с.
2. Подригало Н.М. Концепція забезпечення ефективності та контролю функціональної стабільності моторно-трансмісійних установок транспортно-тягових засобів: автореферат дис. на отримання наукового ступеня доктора технічних наук: спец. 05.22.20 Експлуатація та ремонт засобів транспорту. / Н.М. Подригало. Харків, 2016. 36 с.
3. Подригало М.А., Подригало Н.М., Вахнюк С.А., Біша В.М. Цикловий механічний коефіцієнт корисної дії моторно-трансмісійних установок транспортно-тягових машин // Автомобільний транспорт. Харків : ХНАДУ. 2024. №55(2024).

- C. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2024.55.0>.
4. Молодан А.О. Наукові основи забезпечення надійності і функціональної стабільності колісних машин в режимі відключення частини циліндрів: автореферат дис. на отримання наукового ступеня доктора технічних наук: спец. 05.22.20 Експлуатація та ремонт засобів транспорту. / А.О. Молодан. Харків, 2021. 40 с.
 5. Андрусенко С. І., Будниченко І. В., Дембіцький В. М. Застосовність показників оцінювання енергоефективності транспортних засобів // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2023. № 1. С. 60–70.
 6. Малащенко В.В., Ніколайчук В.В. Обґрунтування раціональних параметрів пружних елементів машин // 10-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. Львів. 2011. 174 с.
 7. Редзюк А. М., Клименко О. А. Впровадження технічного регулювання ефективності використання енергії дорожніми транспортними засобами в Україні // Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології 169 і методи підготовки фахівців : наук. пр. міжнар. наук.- практ. конф. Харків : ХНАДУ. 2017. С. 41–42.
 8. Литвин В. В., Таран І. О. Вплив режимів руху міських автобусів на паливну економічність та екологічну безпеку // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Луцьк : ЛНТУ. 2019. №1 (12). С. 92–97.

References

1. Dynamics of machines with elastic links. Using the example of cars and tractors. Monograph [text] / edited by M.A. Podrygalo and O.S. Polyansky. Kharkiv: Estet Print, 2024. 272 p.
2. Podrygalo N.M. Concept of ensuring the efficiency and control of the functional stability of motor-transmission units of transport and traction vehicles: abstract of dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences: specialty 05.22.20 Operation and repair of transport vehicles. / N.M. Podrygalo. Kharkiv, 2016. 36 p.
3. Podrygalo M.A., Podrygalo N.M., Vakhniuk S.A., Bisha V.M. Cyclic mechanical efficiency of motor-transmission units of transport and traction vehicles // Automobile Transport. Kharkiv: KNUCA. 2024. No. 55(2024). P. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2024.55.0>.
4. Molodan, A.O. Scientific foundations for ensuring the reliability and functional stability of wheeled vehicles in cylinder deactivation mode: abstract of dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences: specialty 05.22.20 Operation and repair of transport vehicles. / A.O. Molodan. Kharkiv, 2021. 40 p.
5. Andrusenko S.I., Budnichenko I.V., Dembitsky V.M. Applicability of indicators for assessing the energy efficiency of vehicles // Modern technologies in mechanical engineering and transport. 2023. No. 1. P. 60–70.

6. Malashchenko V.V., Nikolaychuk V.V. Justification of rational parameters of elastic machine elements // 10th International Symposium of Ukrainian Mechanical Engineers in Lviv. Lviv. 2011. 174 p.
7. Redziuk, A. M., Klymenko, O. A. Introduction of technical regulation of energy efficiency in road vehicles in Ukraine // Automobile transport and automotive engineering. Latest technologies and methods of training specialists: scientific proceedings of the international scientific and practical conference. Kharkiv: KNUCA. 2017. Pp. 41–42.
8. Lytvyn V. V., Taran I. O. The impact of urban bus traffic modes on fuel efficiency and environmental safety // Modern technologies in mechanical engineering and transport. Lutsk: LNTU. 2019. No. 1 (12). Pp. 92–97.

Podrygalo M.A, Vakhniuk S.A. The effect of cylinder deactivation on the unevenness of the torque of an internal combustion engine

One way to improve the energy efficiency of cars under partial loads is to deactivate some of the cylinders in their internal combustion engines. Torque unevenness affects the dynamic properties of a car and its energy efficiency. This study investigated the effect of disabling some of the cylinders on the unevenness of the indicator torque of internal combustion engines. Many studies have proposed a cyclic elastic-dynamic efficiency coefficient to assess the energy efficiency of engine-transmission systems. However, these studies did not determine the effect of disabling some of the cylinders on the unevenness of the indicator torque when the external load on the internal combustion engine is reduced. In order to assess the effect of cylinder deactivation on the unevenness of the indicator torque of an internal combustion engine installed on a car, it is necessary to conduct research and solve the following tasks: determine the change in the coefficient of unevenness of the indicator torque when deactivating part of the cylinders of an internal combustion engine and the maximum number of cylinders that can be deactivated while ensuring the movement of the vehicle. Studies show that regardless of the number of cylinders shut down, the coefficient of unevenness of the indicator torque does not change. At the same time, both the amplitude of the indicator torque fluctuations and its average value decrease. It has been shown that when the maximum effective power of the Nemax engine and the average effective power of the Ne engine are achieved during operation, up to half of the cylinders can be disabled. When some of the cylinders of an internal combustion engine are deactivated, the external resistance to the movement of the vehicle may increase. By utilizing the maximum power in the cylinders that remain operational, an assessment was made of the possibility of overcoming this resistance. For further research, the question arises as to the feasibility of achieving maximum indicated power in each disabled cylinder of the internal combustion engine. To resolve this issue, it may be more rational and economically feasible to connect some of the disabled cylinders. The results of this study can be used in the future to assess the energy efficiency of vehicles.

Key words: *internal combustion engine, torque indicator, crankshaft, automobile, cylinder deactivation, oscillation cycle.*

Подригало Михайло Абович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри технології машинобудування та ремонту машин, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>; e-mail: pmikhab@gmail.com.

Вахнюк Сергій Анатолійович – аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, кафедра технології машинобудування та ремонту машин, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3584-7730>; e-mail: vakhniuk.ser@gmail.com.

Стаття подана 19.12.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-41-52>

УДК 620.91:338.45

АНАЛІЗ СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЗЕЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ НА ПРИКЛАДІ США

Мелконова І.В., Рейс Франсіско Гюго

ANALYSIS OF THE STATUS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF GREEN GENERATION USING THE EXAMPLE OF THE USA

Melkonova I.V., Francisco Hugo Reyes

Ефективність функціонування фотоелектричних станцій може бути збільшена за допомогою використання різних систем, зокрема систем накопичення енергії (BESS). Такі системи в останній час широко використовуються в різних країнах світу, зокрема Німеччина, США, Велика Британія та інші. Істотна залежність обсягу сонячного випромінювання, що досягає поверхні сонячних батарей, від розташування електростанції та погодних умов визначає значні відмінності в характеристиках сонячної радіації в залежності від регіону розташування та кліматичних умов. Отже, параметри систем стеження, що забезпечують максимальну продуктивність сонячної електростанції, можуть значно відрізнятися особливо в різні пори року. Досвід практичного використання сонячних трекерів на промислових підприємствах в Україні поки невеликий, що робить актуальною задачу вибору параметрів системи стеження, що забезпечує максимальну техніко-економічну ефективність фотоелектричної станції для різних видів підприємств в залежності від їх розташування. Щоб успішно розвиватися в напрямку впровадження систем накопичення енергії проведено всебічний аналіз найбільш успішно розвинутою країни в цьому напрямку, а саме США її конкурентоспроможності та лідерства в енергетичному секторі, приділивши увагу структурі енергетичного балансу країни, яка характеризується переважанням традиційних джерел енергії. Саме на ринку електроенергії США можна дослідити успішність впровадження та функціонування фотоелектричних станцій, та дослідити динаміку успішного використання за певний час. Також у роботі проведено ґрунтовний аналіз глобального рейтингу енергетичної безпеки, який підтвердив провідні позиції США у цьому напрямку. З'ясовано, що високе місце країни у світовому рейтингу зумовлене поєднанням кількох

стратегічно важливих чинників, зокрема значним рівнем диверсифікації джерел енергопостачання, потужною ресурсною базою, розвинутою енергетичною інфраструктурою та активним упровадженням інноваційних технологій у сфері видобутку й використання енергії. Окрему роль відіграє ефективна державна політика, спрямована на підвищення енергетичної незалежності та зниження залежності від імпортованих енергоносіїв. У ході дослідження також визначено ключові чинники, що забезпечують глобальне енергетичне лідерство США, серед яких слід виокремити розвиток відновлюваної енергетики, зростання обсягів видобутку сланцевого газу та нафти, а також активну участь країни у формуванні світових енергетичних ринків. Водночас виявлено низку проблем і викликів, з якими може стикнутися енергетична галузь США до кінця 2025 року. До них належать зношеність окремих елементів інфраструктури, зростання екологічних вимог, необхідність модернізації електромереж, а також ризики, пов'язані з коливаннями світових цін на енергоресурси та геополітичною нестабільністю.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, енергетична безпека, світовий ринок енергоресурсів, енергетична політика.

Вступ. Згідно з базовим сценарієм економічного переходу (Economic Transition Scenario), до 2050 року світове споживання електроенергії зросте на 75%. Цей стрибок буде обумовлений стрімким економічним розвитком, збільшенням кількості електромобілів і дата-центрів, а також дедалі більшою електрифікацією побуту й промисловості [1]. Світове електроспоживання, яке у 2023 році становило 29 471 ТВт-год, до середини століття

зросте майже вдвічі. Найбільше зростання очікується у країнах Азії, Близького Сходу та Африки. Це стане поштовхом до масштабних інвестицій в енергетичну інфраструктуру, включно з генерацією, мережами та накопичувачами енергії.

Одним із головних чинників росту стають дата-центри, чия енергетична вага невпинно зростає. До 2035 року вони можуть споживати 4,5% усієї електроенергії планети, а до 2050 — вже 8,7%. Щоб задовольнити такий попит, людству знадобиться додаткові 362 ГВт нових генерувальних потужностей лише протягом наступного десятиліття [2].

Як нам відомо, що сонячна енергія є альтернативним джерелом електричної енергії, яке має особливі переваги пов'язані з екологією, а сама чистота та доступність у великих обсягах майже по всій нашій планеті для забезпечення теплом, світлом та електрикою. З огляду на тривожну швидкість вичерпання основних традиційних енергоресурсів, таких як нафта, вугілля та природний газ, а також екологічні проблеми, спричинені використанням цих джерел енергії, інвестування у відновлювані джерела енергії стало нагальною потребою, особливо для промисловості. Вони можуть забезпечити достатнє живлення для майбутнього. Енергетичний потенціал сонця надзвичайний тому необхідно максимально використовувати, особливо для підприємств які споживають велику кількість електроенергії. Однак, незважаючи на безмежний ресурс, його використання ускладнюються обмеженою ефективністю елементів сонячного масиву, також існує багато проблем пов'язаних з використанням систем накопичення енергії в промислових підприємствах.

Попри загальний курс на декарбонізацію, попит на нафту, згідно з ETS, досягне піку у 2032 році, після чого поступово знижуватиметься — до 88 млн барелів на добу в 2050 році. Водночас попит на авіаційне паливо та нафтохімію зростатиме [3].

Використання вугілля скоротиться найрадикальніше, тоді як споживання природного газу зросте на 25%. Проте в генерації електроенергії викопні джерела до 2050 року забезпечуватимуть лише 25% світового виробництва, позаяк у 2024 році цей показник становив 58%.

Найвища ефективність більшості комерційно доступних сонячних елементів становить від 10% до 20 %. Це свідчить про те, що ще є можливості для вдосконалення та

підвищення ефективності використання систем накопичення енергії, це особливо є актуальним в сонячних регіонах. В роботі розглядається спосіб підвищення ефективності систем накопичення енергії за допомогою впровадження нових методів і технологій, що є актуальними сьогодні [4].

Коли йдеться про розвиток будь-якої країни, енергія є ключовим рушійним чинником, що сприяє в першу чергу енергетичної незалежності. Щодня у світовому співтоваристві видобувається, розподіляється, перетворюється та споживається величезна кількість енергії. Викопне паливо складає близько 85% виробленої енергії. Ресурси викопного палива обмежені, і відомо, що їх використання викликає глобальне потепління через викиди парникових газів, і вже багато років передові країни світу відмовляються від використання такого виду енергії. Зростає потреба в енергії з альтернативних джерел, як сонячна, вітрова, океанічні припливні хвилі та геотермальна енергія, для забезпечення сталого виробництва електроенергії, а також забезпечення екологічного споживання енергії та збереження світових ресурсів.

Використання BESS, або системи накопичення енергії на основі акумуляторів (Battery Energy Storage System), це технологія, що дозволяє зберігати електроенергію для подальшого використання. Вона стає все більш актуальною в контексті зростання частки відновлюваних джерел енергії та потреби в стабільному електропостачанні [5].

Сонячні панелі безпосередньо перетворюють сонячне випромінювання в електричну енергію. Панелі в основному виготовляються з напівпровідникових матеріалів, зокрема кремнію. Їхня ефективність становить 24,5% або більше. Три способи підвищення ефективності сонячних панелей — це покращення ефективності елементів, максимізація вихідної потужності та застосування системи відстеження.

Відстеження точки максимальної потужності (MPPT) — це процес максимізації вихідної потужності сонячної панелі шляхом підтримання її роботи в оптимальній точці на кривій напруги (P-V). Технологія MPPT забезпечить лише максимальну потужність, яку можна отримати від стаціонарних масивів сонячних панелей у будь-який конкретний момент часу. Однак ця технологія не може збільшити виробництво електроенергії, коли сонце не співпадає з системою.

Сонячне відстеження – це система, яка механічно відстежує положення сонця, щоб збільшити вихідну потужність на 30–60 % порівняно зі стаціонарними системами. Це економічно ефективніше, ніж купівля сонячних панелей.

Також існують різні типи трекерів, які можна використовувати для збільшення кількості енергії, яку можна отримати за допомогою сонячних панелей. Двовісні трекери є одними з найефективніших, хоча це пов'язано зі збільшенням складності. Подвійні трекери відстежують сонячне світло від прямокутних осей. Вони є найкращим варіантом для місцевостей, де положення сонця постійно змінюється протягом року в різні пори року. Одноосові трекери краще підходять для регіонів поблизу екватора, де немає значних змін у видимому положенні сонця.

Рівень підвищення ефективності залежатиме від ефективності системи відстеження та погодних умов. Високоєфективні трекери пропонуватимуть більшу ефективність, оскільки вони здатні точніше відстежувати сонце. Більше підвищення ефективності спостерігатиметься у випадках, коли погода сонячна та, отже, сприятлива для системи відстеження. Кілька робіт, що обговорюють систему відстеження сонячної енергії, можна знайти в [1-3].

В останній час виробниками альтеративних джерел енергії пропонується застосування диспетчеризованих відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) з системою накопичення енергії (BESS). Диспетчеризовані відновлювані джерела енергії (ВДЕ) з системою накопичення енергії - це інтегровані системи, які дозволяють більш ефективно використовувати енергію сонця, вітру та інших відновлюваних джерел, а

також забезпечують стабільність енергопостачання. BESS (Battery Energy Storage System) допомагає вирішити проблему непередбачуваності та переривчастості ВДЕ, накопичуючи надлишок енергії, виробленої в періоди пікової генерації, та віддаючи її в мережу, коли генерація падає.

Сонячна енергія стала ключовим джерелом у глобальному нарощуванні потужностей, забезпечивши додавання 182 ГВт, що становить половину всього світового приросту. Генерація сонячними електростанціями вперше перевищила позначку в 1000 ТВт·год. У майже половині країн, які моніторить BNEF, сонячні панелі зайняли лідируючу позицію як найефективніший вибір за обсягами встановленої потужності. Станом на зараз щонайменше 112 країн мають інфраструктуру, що включає хоча б 1 МВт сучасної сонячної енергетики. Найпоширеніші технології генерації електроенергії, що отримали широке застосування протягом 2015–2024 років, представлені в таблиці 1.

Як видно з таблиці, що в останні роки сонячна енергетика має стрімкий розвиток в різних країнах світу, але лідерів в використанні саме сонячної електроенергії залишається США, саме вони встановили рекорд із розвитку сонячної енергетики у 2024 році. За рік у країні з'явилося 50 ГВт нових сонячних потужностей — це найбільший показник для будь-якої енергетичної технології за останні два десятиліття. Темпи зростання склали 21% порівняно з 2023 роком, а сонячна енергетика забезпечила 66% усіх нових потужностей, доданих до енергосистеми [6].

Лідером за встановленими сонячними станціями вдруге став Техас — у 2024 році тут додали 11,6 ГВт.

Таблиця 1

Найрозповсюдженіші технології генерації електроенергії в різних країнах світу, які отримали активний розвиток у період з 2015 по 2024 роки

Рік/ Країна	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Україна	Сонце	Вугілля	Сонце	Вугілля	Сонце	Сонце	Сонце	Вітер	Сонце	Сонце
Польща	Вітер	Вітер	Газ	Газ	Вугілля	Сонце	Сонце	Сонце	Сонце	Сонце
Німеччина	Вітер	Вітер	Вітер	Сонце	Сонце	Сонце	Вітер	Сонце	Сонце	Сонце
США	Вітер	Вітер	Вітер	Газ	Сонце	Сонце	Сонце	Сонце	Сонце	Сонце
Туреччина	Гідро	Вугілля	Газ	Вітер	Вітер	Гідро	Вітер	Вітер	Гідро	Вітер
Велика Британія	Сонце	Сонце	Вітер	Вітер	Вітер	Газ	Вітер	Вітер	Газ	Сонце
Франція	Вітер	Вітер	Вітер	Вітер	Вітер	Сонце	Сонце	Вітер	Сонце	Вітер

Прогнози свідчать, що до 2035 року загальна сонячна потужність США може перевищити 739 ГВт, утричі перевищивши нинішні показники. Водночас на темпи розвитку можуть вплинути зміни в політиці та зростання витрат.

Завдання та мета роботи. Провести аналіз стану та перспектив розвитку зеленої генерації в США, оцінивши техніко-економічні та організаційні чинники, що сприяють ефективному розвитку сонячної генерації. Визначити ключові елементи для забезпечення оптимального функціонування електроенергетичних систем на основі сонячних електростанцій для подальшого впровадження на підприємствах інших країн, які не так стрімко розвиваються в сонячній енергетиці, наприклад в Україні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження, які стосуються ролі енергетичного сектору у зміцненні конкурентоспроможності національної економіки, оптимізації використання доступних енергетичних ресурсів, альтернативних джерел енергії, та вирішенню питань формування енергетичного балансу країни, є предметом роботи численних науковців як із-за кордону, так і з України, серед яких варто відзначити: Едмон А., Фрідман Д., Гелетути Г., Столярчук Я., Сидорової Д., Касича А., Сотник І., Димитрова А.9, Бусарева Д. [7-8]

Також в останні роки багато позитивний досвід зарубіжних країн світу в галузі енерговикористання та енергоефективності викликав особливий інтерес таких науковців як С.Я. Дробишинець, Н.Г. Романюк [9]. Питанням впровадження інтелектуальних енергосистем досліджуються у роботах Ю.Т. Матвеевої, С.І. Колосок, І.А. Вакуленко, В.І. Колашникова, В.В. Каплун, О.В. Левшова, В.Е. Лір [10] та ін.

Багато зарубіжних вчених і дослідників також вивчають енергоефективність економіки: Аморі Ловінс – американський фізик і відомий пропагандист енергоефективності. Він спеціалізується на енергетичних проблемах і активно досліджує питання сталого розвитку та зазначає, що «енергії майбутнього є ключовим кроком для початку перебудови України» [11]. Daniel Kammen – професор енергетики в Каліфорнійському університеті в Берклі. Він досліджує енергетичні системи та політику, зокрема зосереджується на розвитку енергоефективності та відновлювальних джерел енергії, досліджує варіанти створення стійких енергетичних систем шляхом зменшення

споживання енергії, особливо в будівлях і транспортних секторах, а також забезпечуючи надійні, децентралізовані та відновлювані джерела енергії [12].

Результати дослідження. Аналітичний огляд структури фотоелектричних станцій з системами накопичення енергії.

В умовах стрімких трансформацій в енергетичній галузі, який ми зараз з вами бачимо, одним з перспективніших напрямів в виробництві електроенергії набувають ключового значення для підтримки збалансованого прогресу та збереження екології світу. Сучасні розробки сприяють збільшенню продуктивності, а головне зменшенню вуглецевих виділень та забезпеченню ширшої адаптивності у використанні енергетичних запасів. Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) та нові концепції, скажімо, віртуальні електростанції (Virtual Power Plant, VPP), такі як Powerwall від Tesla, дають змогу споживачам електроенергії, особливо промисловим, залучаються до енергетичних операцій. Споживачі нині можуть реалізовувати надлишки згенерованої ними енергії іншим споживачам, формуючи таким чином взаємодію споживач-споживач, зараз ця тенденція активно впроваджується в Україні і вже декілька років успішно працює в США, Німеччині, Норвегії та інших країнах [13].

Існує декілька типів організацій, що здійснюють операції та управління енергетичними мережами. Їх можна поділити на декілька типів:

- управління незалежними системними операторами (Independent System Operator, ISO) та регіональними організаціями передачі електроенергії (Regional Transmission Organization, RTO);
- традиційні оператори мережі (Traditional Network Operator, TNO).

ISO – це самостійна організація, функція якої – керування енергетичними системами в конкретних географічних межах. ISO відповідає за координацію та підтримку рівноваги між потребою та пропозицією на ринку електроенергії, контролює розподіл електроенергії між різними учасниками ринку, а також дбає про стабільність та безперебійну роботу енергетичної системи. [13]

RTO – це підтип ISO, але з розширеними функціями, пов'язаними з керуванням масштабними регіональними енергетичними мережами. Подібно до ISO, RTO відповідає за стабільну роботу у енергосистемі та координацію

взаємодії між учасниками ринку. Але крім цього, на RTO лежить обов'язок більш детального контролю функціонування енергосистем на територіях, які охоплюють кілька штатів або цілі регіони [13-15].

TNO – це організація, що володіє і керує системою передачі електроенергії у визначеній області, в якій немає ISO або RTO.

Головне завдання TNO – підтримувати стабільність і надійність енергетичної інфраструктури, управляючи і використовуючи лінії електропередач, підстанції та інші відповідні об'єкти. TNO відповідає за оперативне управління електромережами, гарантуючи їх безперебійну роботу, здійснюючи моніторинг та контроль за потоками електрики, а також плануючи та реалізуючи технічне обслуговування мережі.

Для стабільного функціонування та можливості економічно ефективно використовувати систем накопичення енергії (BESS) необхідно враховувати дуже багато чинників, по перше це якість систем накопичення енергії, їх екологічність, систему передачі електроенергії та втрати при передачі, кількісна можливість забезпечення споживачів в безперебійному режимі енергією. Всі ці фактори формують ціноутворення на ринку електроенергії.

Оптова торгівля електроенергією функціонує через низку моделей визначення вартості. Вона має вплив як на роздільників електроенергії, котрі реалізують енергію, так і на її споживачів. Локальне маржинальне ціноутворення (LMP) або вузлове ціноутворення – це комплексна система визначення вартості електроенергії. У цій моделі ціни встановлюються в конкретних

вузлах електромережі, тобто у чітко визначених точках. Зазвичай, в цих вузлах здійснюється введення або споживання електроенергії. Витрати, пов'язані з перевантаженням електричних мереж, та потреба у передавальних шляхах всередині мережі є ключовими чинниками, що призводять до різниці в цінах між різними вузлами. Тому з огляду на поставленні задачі, пропонується використання моделі вузлового ціноутворення. Така модель має ряд переваг, для стабільного функціонування альтернативної енергії, а саме сонячної (табл.2).

Але не дивлячись на суттєві переваги, є один основний недолік, а саме те, що ціни на енергоносії здатні стрімко коливатися впродовж коротких періодів часу через зміни в місцевому співвідношенні попиту та пропозиції. Для постачальників та споживачів такі коливання породжують невизначеність та ускладнюють процес планування витрат.

У разі виникнення проблем таких коливань попиту перевищує пропозицію, при роботі систем накопичення енергії (BESS), це може зумовити падіння частоти в енергетичній системі, що несе ризик ушкодження обладнання. В цій ситуації, коли зниження частоти триває, чимало генераторів відключаються автоматично, тим самим ускладнюючи стан усієї системи.

Для уникнути аварій та відключень, пропонується вжити різноманітні заходи, зокрема відключення навантаження чи заклик до споживачів заощаджувати енергію. У разі недостатності цих заходів, може бути оголошено надзвичайний стан в енергетиці задля зменшення навантаження та стабілізації ситуації.

Таблиця 2

Преваги використання моделі вузлового ціноутворення

Деталізація	Модель з точністю віддзеркалює реальні витрати на доставку електрики до кожної конкретної точки. Вона дає змогу визначити витрати, що пов'язані з перевантаженням та втратами в мережі.
Ефективність	Відтворюючи реалії попиту та пропозиції на кожній ділянці мережі, сприяє ефективному виробництву та споживанню електроенергії. Це спонукає генераторів виробляти електроенергію саме там, де вона найбільше потрібна, а споживачів – адаптувати споживання відповідно до локальних цінових сигналів.
Прозорість	Маючи чітку та зрозумілу інформацію про ціни, учасники ринку мають змогу приймати обґрунтовані рішення.

Тому при виникненні таких аварійних ситуацій, які суттєво можуть вплинути на енергоефективність роботи усієї системи, якість електроенергії та відповідно на ціну послуг, пропонується використання ринку допоміжних послуг (Ancillary services) який надає спеціалізовані послуги для підтримки стабільності енергосистеми. Кожен енергетичний ринок вирізняється власним унікальним набором допоміжних сервісів та послуг, до цих послуг належать регулювання частоти, резервування потужності, відновлення після збоїв та інші механізми, що забезпечують стабільну роботу мережі. Регулювання частоти та несинхронізовані резерви, можуть бути активовані для швидкого реагування на зміни у навантаженні, що допомагає уникнути відключень та зменшити ризики для обладнання. Додатково, резерви реагування на попит, що передбачають скорочення енергоспоживання з боку споживачів, можуть бути ефективним інструментом для балансування навантаження в критичних ситуаціях, зменшуючи необхідність у додаткових генеруючих потужностях.

Стан енергоефективності промисловості в США. Альтернативна енергетика як частина енергетичної стратегії США.

Політика енергоефективності спрямовується федеральними, штатними та місцевими органами влади в США, і в деяких випадках перекриваються між собою. Важливо, що енергоефективність користується значним ступенем двосторонньої підтримки, заснованої на перевагах щодо зменшення викидів, зниження рахунків за енергію та підвищення енергетичної безпеки. На федеральному рівні політика енергоефективності в основному здійснюється Міністерством енергетики (DOE).

З 2015 року спостерігається уповільнення глобального покращення енергоефективності, що оцінюється за інтенсивністю використання первинної енергії. У 2020 році ситуація погіршилась через наслідки кризи Covid-19 і тривалий період низьких цін на енергоносії, в результаті чого енергоемність знизилася лише на 0,8%. Це майже у два рази менше порівняно з показниками 2019 року (1,6%) та 2018 року (1,5%). Такий рівень є значно недостатнім для досягнення світових цілей кліматичної стабільності та стійкого розвитку. Особливе занепокоєння викликає той факт, що підвищення енергоефективності потенційно

може забезпечити понад 40% скорочення викидів парникових газів у секторі енергетики протягом наступних двох десятиліть. Це ключовий елемент сценарію сталого розвитку ІЕА, який демонструє, як досягти міжнародних цілей у сфері клімату та енергетики. [14]

Сучасні тенденції вказують на те, що промисловість, ймовірно, стане більш енергоємною через зростання попиту на обробні галузі, які характеризуються високим споживанням енергії та функціонують на більш інтенсивному рівні. У США виробництво автомобілів – це відносно менш енергоємний процес – у першій половині 2023 року було на 30% нижчим порівняно з аналогічним періодом попереднього року. У той же час виробництво основних металів, яке відзначається високою енергоемністю, скоротилося приблизно на 15%.

США у 2024 році споживали приблизно 94 квадрильйони британських теплових одиниць енергії, що становить збільшення на 1% порівняно з 2023 роком. [16]

Викопне паливо, включаючи нафту, природний газ та вугілля, становило 82% від загального енергоспоживання США у 2024 році. Невикопні джерела енергії, зокрема відновлювальні та ядерна енергія, склали решту 18 %. Нафта залишається найбільш споживаним паливом у США протягом останніх 75 років, а споживання ядерної енергії вперше в історії перевищило споживання вугілля.

Щоб наочно побачити позитивні тенденції стану розвитку енергоефективності промисловості в США в цілому, керуючись використанням альтернативних джерел енергії, а саме сонячної, було проведено аналіз за період з 2023 року по 2025 рік (табл. 3). У 2023 році в США спостерігалось активне впровадження заходів з енергоефективності в промисловості, що підтверджується зростанням безвуглецевої енергетики та інвестиціями в цей сектор.

У 2024 році енергоефективність промисловості в США характеризувалася значним зростанням частки відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної та вітрової енергетики, які вперше обійшли вугільну генерацію за виробітком електроенергії. Це зумовлено загальним трендом на декарбонізацію та розвиток систем зберігання енергії, що сприяє інтеграції великої кількості сонячних та вітрових потужностей у національну енергосистему США, особливо в таких штатах, як Техас та Каліфорнія.

Таблиця 3

Стан енергоефективності промисловості в США з 2023 року по 2025 рік

Показники	2023 рік	2024 рік	2025 рік
Інвестиції в енергоефективність	Оголошені урядом США витрати на стимулювання енергоефективності створюють значний економічний ефект, включаючи створення нових робочих місць у промисловості	Для інтеграції великої кількості сонячних та вітрових потужностей у мережу значно збільшилися інвестиції у системи накопичення енергії.	У 2025 році очікується значне зростання потужностей СНЕ, що дозволить промисловості краще керувати енергоспоживанням, зменшуючи залежність від пікових навантажень та підвищуючи надійність енергопостачання.
Створення стимулів	Впровадження державних та приватних ініціатив спрямовано на підвищення енергоефективності та впровадження нових, більш екологічних рішень у промисловому виробництві.	-	Державна політика та ринкові умови стимулюють промисловість інвестувати в енергоефективні технології та впроваджувати найкращі практики, що сприяє зростанню загальної енергоефективності.
Впровадження альтернативних джерел енергії	Загальна частка безвуглецевої енергії в США досягла 41% у 2023 році, що значно покращує показники енергоефективності промисловості.	У 2024 році сонячна та вітрова енергетика стали основними рушіями енергетичної системи США. Вперше сонячні та вітрові станції разом виробили більше електроенергії, ніж вугільні потужності, що свідчить про значний прогрес у переході до чистіших джерел енергії. Сонячна енергетика показала найвищі темпи зростання у 2024 році, її виробіток перевищив 300 ТВт*год, що перевищило показники гідроенергетики.	Заплановано значне розширення потужностей сонячної енергетики, що сприятиме переходу на чистіші джерела енергії в промисловості та зниженню її вуглецевого сліду. До кінця 2025 року загальна потужність сонячної енергетики в США досягне 153 ГВт, а до кінця 2026 року – 182 ГВт

У 2025 році енергоефективність промисловості США демонструє помітне зростання завдяки активному впровадженню передових технологій. Серед ключових досягнень варто відзначити розширення можливостей систем зберігання енергії та збільшення обсягів електроенергії, отриманої з відновлюваних джерел, зокрема сонячної енергії. Як уряд, так і промислові компанії здійснюють значні інвестиції в розвиток "зелених" технологій і інтеграцію систем накопичення енергії, що дозволяє оптимізувати енергоспоживання та скоротити рівень викидів.

Альтернативні джерела енергії виробили 834 мільярди кіловат-годин (кВт·год) електроенергії, це близько 21% всієї електроенергії, виробленої в США в 2020 році

[16]. Це включає вітер, гідроелектростанцію, сонячну енергію, біомасу та геотермальні явища. Природний газ (1,617 млрд кВт·год) виробляв більше електроенергії, ніж альтернативна енергія в США в 2020 році.

Саме 2020 рік став першим роком, коли більше електроенергії було вироблено альтернативною та ядерною енергією, ніж вугіллям. У 2024 році виробництво електроенергії з вугілля в США зменшилося на 40% порівняно з 2020 роком, тоді як використання відновлюваних джерел енергії, включаючи дрібну сонячну генерацію, збільшилося на 29%. Вітер, який залишається провідним джерелом відновлюваної електроенергії у країні, продемонстрував приріст на 14%. Сонячна генерація від

масштабних проєктів потужністю понад 1 мегават зросла на 46%, а дрібна сонячна енергія, що включає мережеві панелі на дахах будинків, на 29%.

Згідно з даними Управління енергетичної інформації США (EIA), у квітні 2025 року частка сонячної енергії у виробництві електроенергії становила 10,7%. Великі сонячні станції збільшили виробіток на 39,3%, а невеликі розподілені системи показали зростання в 11,8%, що загалом забезпечило збільшення сонячної генерації на 31,3% за місяць [18].

За перші чотири місяці 2025 року сонячна енергія зайняла 7,7% у структурі виробництва електроенергії, перевищивши результат аналогічного періоду минулого року (6,1%) та обігнавши гідроенергетику з показником 6,0%.

Вітроенергетика продовжує лідувати серед відновлюваних джерел енергії в США, займаючи частку 12,6% за перші чотири місяці 2025 року — зростання склало 5,9% порівняно з минулим роком. У квітні вітрова генерація забезпечила 13,9% електроенергії країни.

Спільно сонячна та вітрова енергетика за січень-квітень 2025 року виробили 20,3% електроенергії, обігнавши вугільні електростанції (20,2%) та атомні станції (13,8%).

Частка всіх відновлюваних джерел енергії, включаючи вітер, сонце, гідроенергію, біомасу та геотермальні установки, досягла 32,8% у квітні 2025 року. За перші чотири місяці року їх загальний внесок склав 27,7%, що на 10,3% вище за показник за аналогічний період 2024 року.

Проаналізувавши статистичні данні можна припустити, що приріст сонячних потужностей на 26 ГВт у 2025 році та ще 22 ГВт у 2026 році, що призведе до збільшення виробництва сонячної електроенергії на 34% та 17% відповідно. В результаті загальна потужність сонячної енергетики у США досягне 153 ГВт до кінця 2025 року та зросте до 182 ГВт до кінця 2026 року.

Для досягнення стабільного функціонування та економічно ефективної сонячної генерації, в США активно впроваджуються BESS системи. Основні сфери застосування BESS у США:

1. Підтримка відновлюваних джерел енергії: BESS накопичують надлишки енергії від сонячних та вітрових електростанцій, а потім віддають її, коли генерація знижується або попит зростає.

2. Мікромережі та автономні системи: BESS створюють незалежні енергетичні

системи для віддалених громад, військових баз та для подолання наслідків стихійних лих.

3. Зменшення пікових навантажень: системи можуть заряджатися в періоди низького попиту та вивільняти енергію під час відключень. Сонячна генерація максимально велика опівдні, коли споживання може бути відносно низьким, зате ввечері попит на електрику зростає (люди повертаються додому, вмикають техніку), але сонця вже немає. Акумуляторна система, підключена до СЕС, вирішує цю проблему: денне сонце працює на вечірній пік. Зарядившись вдень, батарея віддає енергію у мережу в години найбільшого навантаження, покриваючи вечірній стрибок споживання. Це знижує потребу включати маневрові газові чи вугільні блоки, заощаджуючи паливе і гроші. Така модель – гібрид «solar plus storage» – стрімко набирає популярність у світі. Наприклад, у Каліфорнії сонячні станції з батареями вже конкурують із газовими піковими електростанціями за вартістю генерації. За прогнозами MEA, до 2030 року сонячні станції з накопичувачами стануть одними з найдешевших джерел електроенергії, обійшовши навіть традиційні вугільні та газові установки.

Якщо подивитися кількість використання BESS в світі, то США є лідером. В таблиці 4 представлені причини такого попиту до систем BESS

Таблиця 4

Розповсюдженість BESS в США

Причина	Пояснення
Надійність	В умовах частих екстремальних погодних явищ, BESS забезпечують надійне живлення, що критично важливо для багатьох секторів економіки та населення.
Зростання відновлюваної енергетики	Поширення сонячних та вітрових станцій вимагає ефективних рішень для зберігання енергії, щоб забезпечити стабільність.
Політична підтримка	Урядові ініціативи та стимули сприяють розвитку відновлюваної енергетики та енергозберігаючих технологій, включаючи BESS.

BESS використовуються в США на підприємствах для накопичення та стабілізації

енергії, підвищення ефективності мережі, забезпечення резервного живлення, інтеграції відновлюваних джерел та створення незалежних мікромереж. Ці технології дозволяють знизити залежність від традиційних пікових електростанцій, підвищити коефіцієнт використання наявних ресурсів та гарантувати надійне енергопостачання для критично важливих об'єктів, таких як військові бази або райони ліквідації наслідків стихійних лих. Досвід США свідчить, що BESS, встановлені при великих ВДЕ-фермах, скорочують вимушені відключення ВДЕ і підвищують коефіцієнт використання ліній електропередач. За оцінками NREL, спільна робота вітропарку та батареї дозволяє краще завантажити мережу: вдень, коли споживання менше, частина вітрової електрики йде на зарядку, а ввечері – віддається, розвантажуючи лінії.

Найбільш успішним та масштабним прикладом використання BESS технологій є проект Edwards & Sanborn з виробництва та зберігання сонячної енергії в Каліфорнії.

Система Edwards & Sanborn займає площу 1,8 кв. км, розташований в окрузі Керн. До її складу входять 1,9 млн. фотоелектричних модулів від компаній First Solar та система зберігання енергії BESS від LG Chem, Samsung та BYD загальною потужністю 3287 МВт.

Потужність системи збирання сонячної енергії становить 1300 МВт. Вона обслуговує об'єкти міста Сан-Хосе, комунальні підприємства Southern California Edison та Pacific Gas & Electric, агрегатор Clean Power Alliance та мережу кафе Starbucks.

Більшість каліфорнійських проектів BESS розраховані на 4 години, що відповідає критеріям достатності ресурсів оператора мережі CAISO. Ця система, за потреби, зможе пропрацювати довше, але реальних статистичних даних ще не має.

Сучасні проблеми сонячній генерації США.

Незважаючи на те, що США є лідером в сонячній генерації, на даний час вже існує реальна проблема, з якою можуть зіткнутися північноамериканські електромережі вже наприкінці 2025 року. [19]. Причиною цього є значне перевищення темпів зростання споживання електроенергії над поступовим збільшенням потужностей генерації в регіоні. Останнім часом попит на електроенергію суттєво зріс через активний розвиток штучного інтелекту, стрімке збільшення кількості центрів обробки даних і зростаючу популярність електромобілів у США та Канаді. Одночасно

ситуацію ускладнює поступове закриття вугільних електростанцій по всій Північній Америці, що створює ризик періодичних відключень електроенергії в години найвищого навантаження.

За прогнозами, протягом наступного десятиліття літній піковий попит на електроенергію зросте до 132 ГВт, що на 15% перевищує попередні очікування. Водночас зимовий максимум споживання досягне 149 ГВт, показавши приріст на 18% порівняно з попередніми прогнозами. Таке стрімке зростання попиту значно посилить навантаження на вже перенапружені електричні мережі, особливо в умовах закриття вугільних електростанцій у рамках переходу до екологічніших джерел енергії. За планами, у Північній Америці протягом наступних 10 років буде виведено з експлуатації близько 115 ГВт генеруючих потужностей. Енергетичний сектор континенту перебуває на межі суттєвих перетворень. Зростання попиту на електроенергію досягає безпрецедентних масштабів, які не спостерігалися в попередні десятиліття. Додатковим фактором для збільшення навантаження на мережі стане активний розвиток центрів обробки даних для штучного інтелекту та криптовалютних операцій, а також стрімке поширення електромобілів і теплових насосів у США та Канаді. У зв'язку з цим є критична необхідність прискорення впровадження альтернативних джерел енергії. Особливу увагу варто приділяти будівництву нових сонячних і вітрових електростанцій, а також активному застосуванню енергозберігаючих технологій для ефективного зберігання енергії. [20-23].

Висновки. Підсумовуючи викладене, можна відзначити кілька ключових висновків:

1. Сполучені Штати представляють країну, де енергетичний сектор відображає потужність технологій та гнучкість економіки. З річним обсягом виробництва в 4,243 ТВт·год, США утримують друге місце у світі за цим показником. Відмінною рисою американської енергетики є її диверсифікована структура, яка включає природний газ (40%), вугілля (20%), атомну енергію (19%) та відновлювані джерела (21%). Наприклад, штат Техас очолює розвиток вітрової енергетики, забезпечуючи близько чверті загального виробництва в країні. США активно зосереджуються на інвестиціях у "зелену" енергетику, підтримуючи проекти, зокрема морські вітрові ферми, як-от Nordsee One Offshore. Попри це, країна залишається

важливим учасником у галузі атомної енергетики, маючи 93 функціонуючі реактори. Такий збалансований підхід дозволяє Сполученим Штатам не лише задовольняти власний попит на енергію, але й експортувати технології та ресурси на міжнародному рівні.

2. Альтернативна енергетика наразі є найдинамічнішим сегментом світового ринку енергоресурсів, який виконує компенсаторну функцію в умовах глобальних викликів в енергоспоживанні. Основними факторами її розвитку є поступове зниження вартості технологій для виробництва відновлюваної енергії, зростання цін на традиційні джерела енергії, ужорсткнення екологічних стандартів та посилення державної підтримки проєктів з енергоефективності.

3. США займають провідні позиції за рівнем енергетичної безпеки у світовому рейтингу, який останнім часом демонструє позитивну динаміку. Водночас, Індекс енергетичної безпеки країни характеризується спадним трендом. Основними причинами цього явища є значні обсяги імпорту енергоресурсів, високий рівень їхнього споживання та недосконалість методики розрахунку Індeksu енергетичної безпеки.

4. У Сполучених Штатах існують значні передумови для розвитку альтернативної енергетики, зокрема геотермальної. Західні регіони країни вирізняються великим потенціалом у реалізації проєктів, пов'язаних із використанням енергії вітру, води та сонця. Згідно з прогнозами експертів, урядові ініціативи щодо створення пільгових умов для таких проєктів, а також підтримка з боку місцевої влади можуть сприяти майже повному переходу США на відновлювані джерела енергії до 2050 року. Таким чином, у контексті обмежених ресурсів, проведення ефективної енергетичної політики з акцентом на підтримку розвитку альтернативної енергетики допоможе США не лише зберегти енергетичну незалежність, але й зміцнити енергетичну безпеку та утримати провідні позиції у світі.

Література

1. Energy Transition Investment Trends 2022: Tracking global investment in the low-carbon energy transition. BloombergNEF, 2022.
2. Medina L., Schneider F. Shadow Economies Around the World: What Did We Learn Over the Last 20 Years? IMF Working Paper. 2024. № 17/18. URL: <https://www.imf.org/~media/Files/Publications/WP/2024/wp1817.ashx> (accessed 01.12.2025).
3. Vos R., Jager D. World Energy Outlook hides the real potential of renewables. Energy Post. URL: <http://www.energypost.eu/world-energy-outlook-hides-realpotential-renewables> (accessed 01.12.2025).
4. Cryogenic energy storage. Wikipedia. URL: https://buildwiki.en/wiki/Cryogenic_energy_storage (accessed 01.12.2025).
5. Solar Market Insight Report Q4 2024. Solar Energy Industries Association (SEIA). December 4, 2024. URL: <https://seia.org/research-resources/solar-market-insight-report-q4-2024/> (accessed 01.12.2025).
6. Renewable energy sources / ed. by S.O. Kudria. Kyiv: Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2020.
7. State policy: analysis and implementation mechanisms / V.P. Sadkovyj, S.M. Dombrovska, I.M. Lopatchenko, A.V. Antonov. Kyiv: National University of Civil Defense of Ukraine, 2019.
8. Дробишинець С. Я., Романюк Н. Г. Закордонний досвід в галузі енергозбереження та енергоефективності. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2015. Вип. 4. С. 48-55.
9. Vakulenko I., Myroshnychenko I. Approaches to the organisation of the energyefficient activity at the regional level in the context of limited budget resources during the transformation of energy market paradigm. Environmental and climate technologies. 2015. № 15(1). P. 59-76. URL: <https://doi.org/10.1515/rtuct-2015-0006> (accessed 01.12.2025).
10. Відбудова України як ключова ланка декарбонізації світу. Dnipropetrovsk Investment Agency. URL: <https://dia.dp.gov.ua/> (дата звернення 01.12.2025).
11. Kammen D.M., Sunter D.A. City-integrated renewable energy for urban sustainability. Science. 2016. Vol 352, Issue 6288. P. 922-928. DOI: 10.1126/science.aad9302 (accessed 01.12.2025).
12. E. von Weizsacker, Lovins A.B., Lovins L.H. Фактор четвертий: подвоєння багатства, зменшення використання ресурсів вдвічі [Factor four: doubling wealth, halving resource use]. London: Earthscan, 1997.
13. Pavlyk V. Assessment of green investment impact on the energy efficiency gap of the national economy. Financial Markets, Institutions and Risks. 2020. № 4(1). P. 117-123. URL: [http://doi.org/10.21272/fmir.4\(1\).117-123.2020](http://doi.org/10.21272/fmir.4(1).117-123.2020) (accessed 01.12.2025).
14. Байдала В.В., Нагорний В. В. Економічна ефективність розвитку сонячної енергетики: аналіз світового досвіду. Український журнал прикладної економіки та техніки. Західноукраїнський національний університет, 2023. № 4. С. 30-37.

15. Skrypnyk A., Namiasenko Y., Sabishchenko O. Renewable energy as an alternative of the decentralization energy supply in Ukraine. *International Journal of Innovative Technologies in Economy*. 2018. №1 (13). P. 121-127.
16. Budget and Performance. U.S. Energy Information Administration (EIA). Last updated: July 1, 2024. URL: https://www.eia.gov/about/budget_performance.php (accessed 01.12.2025).
17. Турлікьян Т. Данія стала світовим рекордсменом з вітряної електроенергетики. *EcoTown*. 17.01.2016. URL: [http://ecotown.com.ua/news/U-2015-rotsi-42-vsikh-enerhopotreb-Daniyibuly-zabezpecheni-enerhiyeyu-vitru-/](http://ecotown.com.ua/news/U-2015-rotsi-42-vsikh-enerhopotreb-Daniyibuly-zabezpecheni-enerhiyeyu-vitru/) (дата звернення 01.12.2025).
18. Підвищення енергоефективності національної економіки – концепція нової цільової програми на 2022-2026 роки. Урядовий портал. 18 грудня 2020. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/pidvishchennya-energoefektivnosti-nacionalnoyi-ekonomiki-konceptiya-novoyi-cilovoyi-programi-na-2022-2026-roki> (дата звернення 01.12.2025).
19. A revised approach to productivity convergence in long-term scenarios. Economics department working papers № 1385 / Y. Guillemette, A. Kopoin, D. Turner, A. De Mauro. ECO/WKP(2017)17. Paris: OECD Publishing, 2017. URL: <https://doi.org/10.1787/0b8947e3-en> (accessed 01.12.2025).
20. Green transformations in the healthcare system: the COVID19 impact/ Us Ya., Pimonenko T., Tambovceva T., Segers J.-P. *Health Economics and Management Review*. 2020. № 1(1). P. 48- 59. URL: <https://doi.org/10.21272/hem.2020.1-04> (accessed 01.12.2025).
21. market-insight-report-q4-2024/ (accessed: 01.12.2025).
6. Renewable energy sources / ed. S. O. Kudria. Kyiv : Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2020.
7. Sadkovy V. P., Dombrovska S. M., Lopatchenko I. M., Antonov A. V. State policy: analysis and implementation mechanisms. Kyiv : National University of Civil Defense of Ukraine, 2019.
8. Drobishynets S. Ya., Romanyuk N. H. Zakordonnyi dosvid v haluzi enerhozbezrehennia ta enerhoefektyvnosti // *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*. 2015. Vyp. 4. P. 48–55.
9. Vakulenko I., Myroshnychenko I. Approaches to the organisation of the energy-efficient activity at the regional level in the context of limited budget resources during the transformation of energy market paradigm // *Environmental and Climate Technologies*. 2015. № 15(1). P. 59–76. URL: <https://doi.org/10.1515/rtuect-2015-0006> (accessed: 01.12.2025).
10. Vidbudova Ukrainy yak kliuchova lanka dekarbonizatsii svitu / Dnipropetrovsk Investment Agency. 2025. URL: <https://dia.dp.gov.ua/> (accessed: 01.12.2025).
11. Kammen D. M., Sunter D. A. City-integrated renewable energy for urban sustainability // *Science*. 2016. Vol. 352, Issue 6288. P. 922–928. DOI: 10.1126/science.aad9302 (accessed: 01.12.2025).
12. Weizsäcker E. von, Lovins A. B., Lovins L. H. Factor four: doubling wealth, halving resource use. London : Earthscan, 1997.
13. Pavlyk V. Assessment of green investment impact on the energy efficiency gap of the national economy // *Financial Markets, Institutions and Risks*. 2020. № 4(1). P. 117–123. URL: [http://doi.org/10.21272/fmir.4\(1\).117-123.2020](http://doi.org/10.21272/fmir.4(1).117-123.2020) (accessed: 01.12.2025).
14. Baidala V. V., Nahorny V. V. Ekonomichna efektyvnist rozvytku sontsianoï enerhetyky: analiz svitovoho dosvidu // *Ukrainskyi zhurnal prykladnoi ekonomiky ta tekhniky*. 2023. № 4. P. 30–37.
15. Skrypnyk A., Namiasenko Y., Sabishchenko O. Renewable energy as an alternative of the decentralization energy supply in Ukraine // *International Journal of Innovative Technologies in Economy*. 2018. № 1(13). P. 121–127.
16. Budget and Performance / U.S. Energy Information Administration (EIA). 2024. URL: https://www.eia.gov/about/budget_performance.php (accessed: 01.12.2025).
17. Turlikyan T. Daniia stala svitovym rekordsemenom z vitrianoi elektroenerhetyky // *EcoTown*. 17.01.2016. URL: [http://ecotown.com.ua/news/U-2015-rotsi-42-vsikh-enerhopotreb-Daniyibuly-zabezpecheni-enerhiyeyu-vitru-/](http://ecotown.com.ua/news/U-2015-rotsi-42-vsikh-enerhopotreb-Daniyibuly-zabezpecheni-enerhiyeyu-vitru/) (accessed: 01.12.2025).

References

1. BloombergNEF. Energy Transition Investment Trends 2022: Tracking global investment in the low-carbon energy transition. 2022.
2. Medina L., Schneider F. Shadow Economies Around the World: What Did We Learn Over the Last 20 Years? IMF Working Paper. 2024. № 17/18. URL: <https://www.imf.org/~media/Files/Publications/WP/2024/wp1817.ashx> (accessed 01.12.2025).
3. Vos R., Jager D. World Energy Outlook hides the real potential of renewables. *Energy Post*. 2025. URL: <http://www.energypost.eu/world-energy-outlook-hides-real-potential-renewables> (accessed: 01.12.2025).
4. Cryogenic energy storage // Wikipedia. 2025. URL: https://buildwiki.en/wiki/Cryogenic_energy_storage (accessed 01.12.2025).
5. Solar Market Insight Report Q4 2024 / Solar Energy Industries Association (SEIA). December 4, 2024. URL: <https://seia.org/research-resources/solar->

18. Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti natsionalnoi ekonomiky – kontseptsiiia novoi tsilovoi prohramy na 2022–2026 roky // Uriadovyi portal. 18.12.2020. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/pidvishchennya-energoefektivnosti-nacionalnoyi-ekonomiki-koncepciya-novoyi-cilovoyi-programi-na-2022-2026-roki> (accessed: 01.12.2025).
19. Guillemette Y., Kopoin A., Turner D., De Mauro A. A revised approach to productivity convergence in long-term scenarios. Economics Department Working Papers. 2017. № 1385. Paris : OECD Publishing. URL: <https://doi.org/10.1787/0b8947e3-en> (accessed: 01.12.2025).
20. Us Y., Pimonenko T., Tambovceva T., Segers J.-P. Green transformations in the healthcare system: the COVID-19 impact // Health Economics and Management Review. 2020. № 1(1). P. 48–59. URL: <https://doi.org/10.21272/hem.2020.1-04> (accessed: 01.12.2025).

Melkonova I.V. Francisco Hugo Reyes Analysis of the status and prospects for the development of green generation using the example of the usa

The efficiency of photovoltaic (PV) plants, which refers to the percentage of sunlight converted into electricity, currently averages around 20% for most commercially available panels, with high-efficiency panels reaching up to 23%. Efficiency is affected by panel technology (like monocrystalline vs. polycrystalline silicon), design (e.g., angle and tracking systems), environmental factors (e.g., temperature, soiling, and cloud cover), and the quality of installation and maintenance. Advanced technologies such as bifacial panels, solar tracking systems, and concentrated photovoltaics (CPV) can further increase output. Key words: renewable energy sources, energy security, global energy market, energy policy.

Regions with limited space for constructing renewable power generation systems need to maximize electricity generation by optimizing the operational efficiency of existing plants and selecting an optimal location for the new construction of PV power plants with favorable weather conditions and surrounding environment.

The status of U.S. green generation is characterized by rapid growth in renewable capacity, particularly wind

and solar, which accounted for nearly 90% of new capacity in 2024 and 25% of total renewable generation. Prospects for development are strong, with projections showing a need for significant, sustained acceleration to meet 2035 decarbonization goals, which will likely be met by large-scale wind and solar installations, supported by storage, and potentially nuclear, hydropower, and geothermal energy.

Renewable energy resources have historically played a small role for electricity generation in the US. However, concerns such as security of energy supply, limitations and price fluctuations of fossil fuels, and threats of climate changes have encouraged US policy makers to think and debate about diversification strategy in the energy supply and promotion of renewables. The current paper discusses the role of renewable portfolio in the US energy action plan. Results show that while renewables will create a market with near 10 billion.

For successful development in the field of energy storage systems implementation, we conducted a comprehensive analysis of the most successfully developed country in this field, namely the USA. The competitiveness and leadership in the energy sector of the USA are undeniable, so we pay attention to the structure of the energy balance of the country, which has an advantage in the use of renewable energy sources. Thus, in the US electricity market, it is possible to study the success of the implementation and operation of photovoltaic installations, as well as to study the dynamics of successful use over a certain period of time. The work also conducted a thorough analysis of the global energy security rating, which confirmed the leading position of the USA in this sphere.

Keywords: *renewable energy sources, energy security, global energy market, energy policy.*

Мелконова Інна Вікторівна – к.т.н., доц., завідувачка кафедрою електричної інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ), melkonova@snu.edu.ua
Рейс Франсіско Гюго – магістр наук з кількісного менеджменту, бізнес-аналітики. Університет Дьюка - Школа бізнесу Фукуа (США)

Стаття подана 18.12.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-53-60>

УДК 621.33:629.4

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА МОТОР-ВЕНТИЛЯТОРА ОХОЛОДЖЕННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВУ

Рябов Є.С., Юр'єва О.Ю., Іванов С.В., Жуков А.Ю.

DETERMINATION OF THE RATIONAL VOLTAGE FOR THE INDUCTION MOTOR OF A BLOWER USED FOR COOLING OF LOCOMOTIVE TRACTION MOTORS

Riabov Ye.S., Yurieva O.Yu., Ivanov S.V., Zhukov A.Yu.

Удосконалення допоміжних систем рухомого складу, які забезпечують охолодження тягового електрообладнання, є важливим напрямом підвищення тягово-енергетичних показників рухомого складу магістральних і промислових залізниць. Це визначає актуальність роботи. На сучасному рухомому складі для охолодження тягового електрообладнання використовують мотор-вентилятори з асинхронними двигунами. Регулювання витрати повітря у таких системах здійснюється зміною частоти обертання електродвигуна. При цьому змінювання лінійної напруги може здійснюватися за багатьма закономірностями, внаслідок чого виникає необхідність визначення раціональної величини напруги електродвигуна при фіксованій частоті живлення для забезпечення найвищої енергетичної ефективності електроприводу. У роботі розглянуто трифазний шестиполосний короткозамкнений асинхронний електродвигун потужністю 35 кВт, номінальною лінійною напругою 400 В, номінальною частотою живлення 100 Гц для приводу вентилятора охолодження тягових електродвигунів. Показано, що внаслідок зміни атмосферних умов – температури та атмосферного тиску – потужність електродвигуна може змінюватися у діапазоні від 23 кВт до 33 кВт. Виконані розрахунки характеристик електродвигуна при зміні потужності дозволили визначити, що при зменшенні потужності доцільно зменшувати лінійну напругу, оскільки це підвищує коефіцієнт корисної дії електродвигуна, найбільше збільшення якого становить 0,31 %. Лінійна напруга електродвигуна при номінальній частоті живлення може змінюватися у діапазоні 360–400 В. Досліджено роботу електродвигуна при частоті обертання ротора 2/3 від номінальної, що забезпечує відповідну

витрату охолодного повітря. Виконано розрахунки параметрів електродвигуна та визначено, що найбільші значення ККД відповідають режимам роботи з лінійною напругою 199–234 В для діапазону потужності 6,8–9,8 кВт. Для вказаного діапазону лінійної напруги зростання ККД становить 1,17–2,76 %. При роботі електродвигуна з частотою обертання 1/3 від номінальної найбільше підвищення ККД дорівнює 14,1 % та 19,82 %, досягається при лінійній напрузі 61 В та 44 В при потужності 1,2 кВт та 0,85 кВт відповідно. Для більш точного визначення лінійної напруги з урахуванням втрат у перетворювачі, додаткових втрат у електродвигуні від вищих гармонік струму та напруги, відхилень параметрів електродвигуна та вентиляційного тракту доцільно використання research controller, який оцінює потужність, яка споживається електроприводом мотор-вентилятора.

Ключові слова: енергоефективність, енергозбереження, електропривод, асинхронний двигун, мотор-вентилятор, рухомий склад, локомотив

Вступ. Підвищення енергоефективності тягового рухомого складу є важливим фактором для стабільного функціонування та подальшого розвитку вітчизняного залізничного магістрального та промислового транспорту. Перш за все, це стосується наявного рухомого складу, при ремонті та модернізації якого необхідно впровадження енергоресурсозбережних технологій.

Споживання електроенергії допоміжними системами рухомого складу сягає 20 % від загальної кількості електроенергії, що

витрачається на тягу поїздів. При цьому частка, що припадає на нерегульовані приводи вентиляторів охолодження силового електроустаткування, становить не менше 80 % від загальних енерговитрат на власні потреби [1, 2]. На наявному рухомому складі регулювання продуктивності мотор-вентиляторів не передбачене, хоча у більшості випадків продуктивність мотор-вентиляторів перевищує необхідну. Це призводить до неефективного споживання енергії. Наприклад, на магістральних електровозах робота з повною продуктивністю складає лише 25 % часу, а решту часу робота може здійснюватися з витратою, яка становить третину від номінальної [3]. При цьому споживання енергії у такому режимі зменшується приблизно у 10 разів.

Регулювання частоти обертання мотор-вентиляторів передбачає зміну параметрів живлення асинхронного двигуна залежно від навантаження тягових електричних машин, охолодження яких забезпечується мотор-вентилятором [3]. Аналіз сучасних систем живлення мотор-вентиляторів показує, що для найпоширенішим для живлення та керування асинхронними двигунами мотор-вентиляторів локомотивів є використання автономних інверторів напруги [4, 5]. Керування електродвигунами здійснюється зміною напруги та частоти [6]. Оскільки для мотор-вентиляторів не має вимог до високої точності, швидкодії тощо, то раціональним є використання скалярних систем керування.

Для частотно-керованих асинхронних двигунів регулювання напруги здійснюють залежно від частоти обертання. Найуживанішим способом є пропорційний закон зміни напруги та частоти, який описується виразом $U/f = \text{const}$. Для вентиляторного навантаження закон зміни напруги та частоти описується виразом $U/f^2 = \text{const}$. Регулювання за цими законами забезпечує зміну магнітного потоку для підтримання номінального значення кратності максимального моменту, що важливо для забезпечення стійкої роботи механізмів. Однак наведені закони регулювання не дають відповіді про показники енергоефективності електродвигуна та електроприводу в цілому.

Для забезпечення роботи електроприводу з високими показниками енергетичної ефективності використовуються різні стратегії, які мінімізують втрати у електродвигунах [7, 8]. Перший підхід базується на системі керування на основі моделі втрат – Loss Model Controller

(LMC), яка використовується у системі керування частотним перетворювачем [9, 10]. Другий підхід використовує контролер, який визначає та оцінює параметри системи, research controller. Алгоритм керування, реалізований у цьому контролері, працює таким чином: для заданого крутного моменту та частоти обертання вимірюється вхідна потужність, потім змінюється керована координата доти, доки не буде знайдена найменша вхідна потужність [11, 12]. Втім, для мотор-вентиляторів охолодження тягового електрообладнання, режими роботи яких можуть бути визначені наперед, можливо визначити раціональні параметри живлення електродвигуна.

Метою роботи є визначення раціональної напруги асинхронного двигуна для приводу мотор-вентилятора охолодження тягових двигунів локомотивів при зміні режиму роботи мотор-вентилятора.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для зменшення споживання енергії мотор-вентиляторами охолодження тягових електродвигунів локомотивів використовують регулювання витрати охолодного повітря [2, 3]. Зазвичай, використовується три ступені: перший – з витратою повітря, що дорівнює 1/3 номінальної, другий – витратою 2/3 від номінальної, третій – з номінальною витратою. Вибір ступеня регулювання витрати охолодного повітря залежить від навантаження тягового електродвигуна.

Витрата охолодного повітря визначає потужність вентилятора, яка, в свою чергу, впливає на споживану потужність електродвигуна мотор-вентилятора.

Потужність вентилятора залежить від густини повітря ρ згідно виразу

$$N = N_0 \cdot \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (1)$$

де N_0 , ρ_0 – потужність вентилятора та густина повітря в початковому стані.

Втім, відомо, що аеродинамічні характеристики вентилятора та вентиляційного тракту залежать від густини повітря, яка визначається температурою та атмосферним тиском за виразом

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T}, \quad (2)$$

де p_0, T_0 – атмосферний тиск та температура повітря при початковому стані;

p, T – атмосферний тиск та температура, для яких розраховується густина повітря ρ .

При змінюванні витрати охолодного повітря пропорційно змінюється частота обертання асинхронного двигуна. При цьому відбувається зміна потужності мотор-вентилятора, яка визначається згідно закону подібності вентиляторів,

$$N = N_{\text{ном}} \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^3, \quad (3)$$

де $N_{\text{ном}}$ – потужність вентилятора при частоті обертання $n_{\text{ном}}$, яка відповідає номінальній витраті повітря;

n – частота обертання, для якої визначається потужність N .

З (1)–(3) виходить, що при незмінності частоти обертання потужність вентилятора змінюватиметься.

Повна потужність, яка споживається асинхронним електродвигуном при заданій частоті обертання і потужності вентилятора, можна виразити через вхідну потужність, знаючи лінійну напругу U , фазний струм I , коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ та ККД асинхронного двигуна η :

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \eta. \quad (4)$$

Регулювання лінійної напруги U при незмінній частоті обертання призводить до зміни струму, ККД, коефіцієнту потужності електродвигуна. Тому регулюючи лінійну напругу можна досягнути режиму роботи, у якому повна потужність, визначена за (4) буде мінімальною. Однак більш зручним є мінімізація активної потужності, яка споживається від джерела живлення. Це потребує визначення величини лінійної напруги, при якій досягається найвищих ККД електродвигуна. Цей підхід використано у статті.

Для дослідження обрано мотор-вентилятор, який застосовується для охолодження тягових електродвигунів магістральних та маневрових тепловозів. З технічної документації випливає, що потужність вентилятора, який використовується для охолодження трьох тягових електродвигунів одного візка,

становить 26 кВт при частоті обертання 1980 об/хв. Прийmemo, що потужність вказана для температури 20 °С та тиску 101,325 кПа. При цих умовах густина повітря становить 1,205 кг/м³.

За вимогами нормативної документації на рухомий склад для кліматичних умов, в яких знаходиться територія України, обладнання має виконуватися при роботі з температурою у діапазоні від мінус 40°С до плюс 40°С. Згідно даних кліматичних спостережень атмосферний тиск може змінюватися від 94,65 кПа до 103,21 кПа.

Тоді густина повітря згідно з (2) при найнижчій температурі та підвищеному тиску становитиме 1,541 кг/м³, а при найвищій температурі та найнижчому тиску – 1,052 кг/м³. Тобто зміна густини повітря змінюється майже у 1,5 рази. Обчислена за (1) потужність становитиме 33 кВт при найнижчій температурі та 23 кВт при найвищій температурі при номінальній частоті обертання мотор-вентилятора. Зміна потужності асинхронного двигуна в такому діапазоні суттєво вплине на енергетичні показники допоміжного електроприводу.

Для дослідження обрано трифазний шестиполосний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, який може бути використаний із серійними вентиляторами, які застосовуються для охолодження тягових електродвигунів. Розрахунки асинхронного двигуна та його характеристик виконано авторами відповідно до [13, 14] при живленні синусоїдною напругою. Температура обмоток приймалася такою, що дорівнює 150°С. Технічні параметри електродвигуна наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Номінальні параметри електродвигуна

Параметр	Значення
Потужність, кВт	35
Напруга лінійна, В	400
Частота живлення, Гц	100
Струм фазний, А	70,4
Частота обертання, об/хв	1980
ККД, %	92,2
Коефіцієнт потужності	0,78

У табл. 2 наведено розрахункові параметри досліджуваного електродвигуна при зміні потужності від 33 кВт до 23 кВт, що відповідає зміні потужності при коливанні температури охолодного повітря. Розрахунки виконано для лінійної напруги 400 В та частоти живлення 100 Гц.

Таблиця 2

Розрахункові параметри електродвигуна
при зміні потужності

Параметр	Значення			
Потужність, кВт	33	30	26	23
Напруга лінійна, В	400	400	400	400
Частота живлення, Гц	100	100	100	100
Струм фазний, А	66,9	61,7	55,4	50,7
Частота обертання, об/хв	1981	1982	1985	1987
ККД, %	92,3	92,3	92,12	91,88
Коефіцієнт потужності	0,771	0,759	0,736	0,712

З даних табл. 2 слідує, що при зміні потужності електродвигуна при незмінній напрузі та частоті живлення частота обертання ротора практично не змінюється (збільшення становить 6 об/хв, що становить 0,3 %). Через зменшення потужності зменшується коефіцієнт потужності, оскільки зменшується активна (моментна) складова струму. Фазний струм зменшується не пропорційно зменшенню потужності, оскільки водночас змінюється коефіцієнт потужності (4). Водночас ККД знижується з 92,3 % до 91,88 % при зміні потужності від 33 кВт до 23 кВт.

Оскільки при зменшенні потужності на валу мотор-вентилятора можливо зниження напруги живлення, розглянемо вплив зміни напруги на енергетичні показники електродвигуна. У табл. 3–6 наведені результати розрахунків параметрів асинхронного двигуна. Найнижча напруга відповідає номінальній кратності максимального моменту.

У табл. 3–6 жирним виділені максимальні значення ККД асинхронного двигуна. Саме при цих значеннях параметрів асинхронного двигуна його нагрів буде мінімальним.

Таблиця 3

Параметри електродвигуна
при потужності 33 кВт

Параметр	Значення		
Потужність, кВт	33	33	33
Напруга лінійна, В	400	380	365
Частота живлення, В	100	100	100
Струм фазний, А	66,9	68,7	71
Частота обертання, об/хв	1981	1978	1975
ККД, %	92,3	92,2	92,0
Коефіцієнт потужності	0,771	0,789	0,8

Як видно з табл. 3–6, зміна напруги електродвигуна викликає зміну ККД. Для потужностей 33 кВт та 30 кВт ККД дещо зменшується при зниженні лінійної напруги. Для потужності 23 кВт та 26 кВт ККД зростає при зниженні напруги, хоча при цьому фазний струм підвищується. Це пояснюється тим, що

магнітні втрати в магнітопроводі асинхронного двигуна зменшуються більшою мірою, ніж зростають електричні втрати в обмотках. Частота обертання ротора змінюється на незначну величину. Коефіцієнт потужності збільшується в усіх варіантах, оскільки при зменшенні напруги зменшується магнітний потік.

Таблиця 4

Параметри електродвигуна
при потужності 30 кВт

Параметр	Значення		
Потужність, кВт	30	30	30
Напруга лінійна, В	400	380	365
Частота живлення, В	100	100	100
Струм фазний, А	61,7	63,2	65,1
Частота обертання, об/хв	1982	1981	1979
ККД, %	92,3	92,3	92,2
Коефіцієнт потужності	0,759	0,779	0,794

Таблиця 5

Параметри електродвигуна
при потужності 26 кВт

Параметр	Значення			
Потужність, кВт	26	26	26	26
Напруга лінійна, В	400	380	365	345
Частота живлення, В	100	100	100	100
Струм фазний, А	55,4	56,2	57,5	59,2
Частота обертання, об/хв	1985	1984	1982	1978
ККД, %	92,12	92,21	92,24	92,19
Коефіцієнт потужності	0,736	0,76	0,779	0,793

Таблиця 6

Параметри електродвигуна
при потужності 23 кВт

Параметр	Значення				
Потужність, кВт	23	23	23	23	23
Напруга лінійна, В	400	380	365	345	330
Частота живлення, В	100	100	100	100	100
Струм фазний, А	50,7	51,6	52,0	53,3	55,1
Частота обертання, об/хв	1987	1986	1984	1982	1980
ККД, %	91,88	92,06	92,16	92,19	92,15
Коефіцієнт потужності	0,712	0,734	0,761	0,779	0,794

Таким чином, для режимів роботи зі зменшеною потужністю зниження лінійної напруги змінює ККД асинхронного двигуна. Найбільше підвищення ККД становить 0,31 % при потужності 23 кВт і лінійній напрузі 345 В. Виходячи з даних табл. 3–6 можна рекомендувати зміну лінійної напруги асинхронного двигуна у діапазоні 400–360 В при зміні його потужності.

Розглянемо режими роботи електродвигуна при частоті обертання 1320 об/хв, яка відповідає другому ступеню регулювання – 2/3 витрати повітря. Згідно з (3) найбільша потужність становитиме 9,8 кВт, найменша – 6,8 кВт.

Згідно з законами частотного регулювання при зниженні частоти живлення необхідно зниження напруги, якою живиться асинхронний двигун. У табл. 7–9 наведено результати розрахунків параметрів електродвигуна при різних потужностях. У табл. 7–9 значення лінійної напруги 267 В можна отримати для пропорційного закону частотного регулювання ($U/f = \text{const}$); значення 178 В – для квадратичного ($U/f^2 = \text{const}$).

Таблиця 7

**Параметри електродвигуна
при потужності 9,8 кВт**

Параметр	Значення					
Потужність, кВт	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8
Напруга лінійна, В	267	251	234	217	199	178
Частота живлення, Гц	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7
Струм фазний, А	39,4	38,6	38,4	39,5	40,2	42,4
Частота обертання, об/хв	1326	1325	1324	1321	1320	1316
ККД, %	89,65	90,15	90,55	90,82	90,81	90,59
Коефіцієнт потужності	0,6	0,648	0,697	0,759	0,777	0,810

Таблиця 8

**Параметри електродвигуна
при потужності 8,3 кВт**

Параметр	Значення					
Потужність, кВт	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
Напруга лінійна, В	267	251	234	217	199	178
Частота живлення, Гц	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7
Струм фазний, А	36,8	35,6	34,9	35,3	36,3	37,1
Частота обертання, об/хв	1327	1326	1325	1323	1321	1319
ККД, %	88,77	89,42	90,0	90,56	90,69	90,67
Коефіцієнт потужності	0,55	0,6	0,652	0,722	0,765	0,784

Таблиця 9

**Параметри електродвигуна
при потужності 6,8 кВт**

Параметр	Значення					
Потужність, кВт	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
Напруга лінійна, В	267	251	234	217	199	178
Частота живлення, Гц	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7
Струм фазний, А	34,4	32,9	31,8	31,3	31,4	32,1
Частота обертання, об/хв	1328	1327	1326	1325	1324	1322
ККД, %	87,4	88,2	89,0	89,9	90,16	90,1
Коефіцієнт потужності	0,489	0,539	0,593	0,671	0,696	0,744

Аналіз табл. 7–9 показує, що зміна лінійної напруги супроводжується зміною фазного струму, ККД та коефіцієнту потужності. При цьому найменші значення ККД відповідають найбільшому значенні напруги 267 В. Це є наслідком роботи при значному магнітному потоці, що призводить до збільшення магнітних втрат.

При зниженні лінійної напруги спочатку спостерігається спадання фазного струму, а потім йде його зростання. При цьому найбільший ККД не відповідає режиму з

мінімальним струмом. Найбільші значення ККД відповідають роботі з лінійною напругою 199–234 В для різних значень потужності. На цей діапазон напруги припадають мінімальні значення струмів. Для розглянутих режимів зростання ККД становить 1,17–2,76 %.

Таким чином, при роботі електродвигуна з частотою 2/3 від номінальної при зміні лінійної напруги змінюється ККД електродвигуна. Найвищі значення ККД досягаються при лінійній напрузі 199–234 В, найнижчі – при лінійній напрузі 267 В. Змінювання лінійної напруги відповідає пропорційному закону частотного регулювання.

Розглянемо роботу електродвигуна при частоті обертання 660 об/хв, яка відповідає 1/3 витрати повітря. Найбільша потужність у цьому режимі складе становитиме 1,2 кВт, найменша – 0,85 кВт.

У табл. 10 та 11 наведено результати розрахунків параметрів електродвигуна при роботі з частотою обертання 660 об/хв. Лінійна напруга 133 В відповідає зміні напруги за пропорційним законом частотного регулювання, напруга 44 В – за квадратичним законом.

Таблиця 10

**Параметри електродвигуна
при потужності 1,2 кВт**

Параметр	Значення					
Потужність, кВт	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Напруга лінійна, В	133	113	95	78	61	44
Частота живлення, Гц	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3
Струм фазний, А	29,9	24,4	21,2	19,0	18,3	20,5
Частота обертання, об/хв	664	663	662	660	657	650
ККД, %	71,57	77,45	81,3	84,2	85,67	84,46
Коефіцієнт потужності	0,243	0,326	0,423	0,556	0,728	0,89

Таблиця 11

**Параметри електродвигуна
при потужності 0,85 кВт**

Параметр	Значення					
Потужність, кВт	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Напруга лінійна, В	133	113	95	78	61	44
Частота живлення, Гц	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3
Струм фазний, А	29,4	23,7	20,2	17,4	15,5	15,8
Частота обертання, об/хв	665	664	663	662	660	654
ККД, %	64,63	71,69	76,67	80,88	83,84	84,45
Коефіцієнт потужності	0,194	0,256	0,332	0,448	0,621	0,815

Результати табл. 10–11 свідчать, що зміна лінійної напруги приводить до зміни ККД. Найбільші значення ККД досягаються при лінійній напрузі 61 В та 44 В при потужності 1,2 кВт та 0,85 кВт відповідно. Зростання ККД становить 14,1 % та 19,82 %. При цьому найбільшим значенням ККД не відповідають

мінімуми струму. Найменші значення ККД досягаються при напрузі 133 В, яка відповідає пропорційному закону частотного регулювання.

На підставі проведених розрахунків та аналізу результатів отримано, що підвищення енергоефективності асинхронного двигуна може бути досягнуто зміною напруги живлення. Найбільше цей ефект проявляється при роботі зі зменшеною частотою обертання. Це пояснюється тим, що активні частини електродвигуна оптимально спроектовані для роботи при номінальних значеннях частоти та потужності. При зміні режимів розміри магнітопроводу та обмоток є «надлишковими», внаслідок чого виникають підвищені втрати.

Отримані результати показують, що для кожного режиму з фіксованою частотою живлення можна наперед визначити діапазон значень лінійної напруги асинхронного двигуна, у якому він буде працювати з найбільшим ККД при зміні потужності електродвигуна. Це є важливим, оскільки визначення потужності асинхронного двигуна безпосередньо під час роботи мотор-вентилятора неможливе. Це пов'язано з постійною зміною температури повітря та можливими відхиленнями параметрів вентиляційного тракту (наприклад, при забрудненні вентиляційних каналів).

Втім варто відзначити, що при живленні асинхронного електродвигуна при від інвертора напруги необхідно враховувати втрати в інверторі та втрати в електродвигуні від вищих гармонік струму та напруги. Визначення цих втрат потребує великого обсягу розрахунків та детальної інформації про параметри перетворювача та електродвигуна для вищих гармонік. Крім того, вказані втрати залежать від параметрів широтно-імпульсної модуляції, теплового стану обмоток електродвигуна та напівпровідникових приладів інвертора тощо. Іншим аспектом є те, що електродвигуни мають певний розкид параметрів, що є неминучим при його виготовленні. Для врахування цих факторів пропонується використання research controller, який оцінює потужність, яка споживається електроприводом при зміні лінійної напруги електродвигуна, та визначає у такий спосіб оптимальну напругу живлення електродвигуна для поточного режиму роботи мотор-вентилятора.

Висновки. Для підвищення енергетичної ефективності рухомого складу доцільним є регулювання продуктивності мотор-вентиляторів охолодження тягового електрообладнання. При використанні

електричного приводу мотор-вентиляторів це здійснюється регулюванням частоти обертання електродвигуна.

Особливістю роботи мотор-вентиляторів є зміна потужності при зміні параметрів атмосферного повітря. Це потребує оптимізації живлення електродвигунів для зменшення споживання енергії електроприводом вентиляторів.

В роботі досліджено вплив зміни напруги живлення електродвигуна на енергетичні показники при зміні його потужності при зміні температури та атмосферного тиску навколишнього середовища. Визначено, при номінальній частоті живлення раціональним є живлення з лінійною напругою 360–400 В при зміні потужності у діапазоні 23–33 кВт.

При частоті живлення, якій відповідає витрата охолодного повітря 2/3 від номінальної витрати, найвищі значення ККД досягаються при роботі з лінійною напругою 199–234 В при зміні потужності у діапазоні 6,8–9,8 кВт. При частоті живлення, якій відповідає витрата охолодного повітря 1/3 від номінальної витрати, найбільші значення ККД досягаються при роботі з лінійною напругою 44–61 В при зміні потужності у діапазоні 0,85–1,2 кВт. Для точного визначення оптимального значення лінійної напруги для поточного режиму роботи доцільно використання research controller, який оцінює потужність, яка споживається електроприводом мотор-вентилятора. Подальші дослідження будуть спрямовані розробку та дослідження роботи research controller для електроприводу мотор-вентиляторів охолодження рухомого складу.

Література

1. Конструкція та динаміка електричного рухомого складу : підручник : у 2 ч. / С. В. Панченко, М. М. Бабаєв, В. С. Блиндюк та ін. Харків : УкрДУЗТ, 2018. Ч. 1. 280 с.
2. Гулак С. О. Підвищення енергетичних показників електровозів змінного струму за рахунок адаптованої до системи електропостачання компенсації реактивної потужності [Електронний ресурс] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.09 / С. О. Гулак ; наук. керівник В. П. Ткаченко ; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків, 2020. 23 с. Режим доступу : <https://nbuv.gov.ua/>
3. Варченко Е. В., Чумак В. В., Оливсон В. М. Модернизация системы вентиляции электровозов переменного тока ВЛ80. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені

- академіка В. Лазаряна. 2008. Вип. 22. С. 10–12. Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2008_22_4
4. Steimel A. Electric traction — Motion Power and Energy Supply. 2nd ed. München : Deutscher Industrieverlag, 2014.
 5. Ilončiak J., Struharnanský L., Kuchta J. Modular Concept of Auxiliary Converters for Diesel Electric Locomotives. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 192. P. 359–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.062>
 6. Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода : навч. посібник / М. В. Загірняк, Т. В. Коренькова, А. П. Калінов, А. І. Гладир, В. Г. Ковальчук. 2-ге вид., переробл. і доповн. Харків : Точка, 2017. 206 с.
 7. Waheedabeevi M., Sukeshkumar A., Nair N. S. New online loss-minimization-based control of scalar and vector-controlled induction motor drives. 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). Bengaluru, India, 2012. P. 1–7. DOI: 10.1109/PEDES.2012.6484347
 8. Khoury G., Ghosn R., Khatounian F., Fadel M., Tientcheu M. An energy-efficient scalar control taking core losses into account. *COMPEL*. 2018. Vol. 37, No. 2. P. 849–867. DOI: 10.1108/COMPEL-08-2017-0324
 9. Attaianese C., Monaco M. D., Tomasso G. Maximum Torque Per Watt (MTPW) field-oriented control of induction motor. *Electrical Engineering*. 2021. Vol. 103. P. 2611–2623. DOI: 10.1007/s00202-021-01238-0
 10. Graciola C. L., Goedtel A., Castoldi M. F., Souza W. A., Nunes E. A., Santos T. H., da Silva L. C. P. Comparison between predictive and scalar control strategies for minimizing losses in induction motors. *Systems Science & Control Engineering*. 2025. Vol. 13, No. 1. Article 2481942. DOI: 10.1080/21642583.2025.2481942
 11. Kirschen D., Novotny D., Lipo T. On-line efficiency optimization of a variable frequency induction motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1985. Vol. 21. P. 610–615. DOI: 10.1109/TIA.1985.349717
 12. Kioskeridis I., Margaris N. Loss minimization in scalar-controlled induction motor drives with search controllers. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1996. Vol. 11, No. 2. P. 213–220. DOI: 10.1109/63.486168
 13. Міліх В. І. Проектування трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненою обмоткою ротора : навч. посібник. Харків : ФОП Панов А. М., 2023. 112 с.
 14. Осташевський М. О., Петренко О. М., Юр'єва О. Ю. Теплові розрахунки електричних машин : навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 450 с.

References

1. Konstruktsiia ta dynamika elektrychnoho rukhomoho skladu : pidruchnyk : u 2 ch. / S. V. Panchenko, M. M. Babaiev, V. S. Blyndiuk ta in. Kharkiv : UkrDUZT, 2018. Ch. 1. 280 p.
2. Hulak S. O. Pidvyshchennia enerhetychnykh pokaznykiv elektrovoziv zminnoho strumu za rakhunok adaptovanoi do systemy elektropostachannia kompensatsii reaktyvnoi potuzhnosti [Elektronnyi resurs] : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.22.09 / S. O. Hulak ; nauk. kerivnyk V. P. Tkachenko ; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t". Kharkiv, 2020. 23 p. URL : <https://nbuv.gov.ua/>
3. Varchenko E. V., Chumak V. V., Olyvson V. M. Modernyzatsiia systemy ventyliatsii elektrovozov peremennoho toka VL80. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana. 2008. Vyp. 22. S. 10–12. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2008_22_4
4. Steimel A. Electric traction — Motion Power and Energy Supply. 2nd ed. München : Deutscher Industrieverlag, 2014.
5. Ilončiak J., Struharnanský L., Kuchta J. Modular Concept of Auxiliary Converters for Diesel Electric Locomotives. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 192. P. 359–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.062>
6. Suchasni peretvoriuvachi chastoty v systemakh elektropryvida : navch. posibnyk / M. V. Zahirniak, T. V. Korenkova, A. P. Kalinov, A. I. Hladyr, V. H. Kovalchuk. 2-he vyd., pererobl. i dopovn. Kharkiv : Tochka, 2017. 206 p.
7. Waheedabeevi M., Sukeshkumar A., Nair N. S. New online loss-minimization-based control of scalar and vector-controlled induction motor drives. 2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). Bengaluru, India, 2012. P. 1–7. DOI: 10.1109/PEDES.2012.6484347
8. Khoury G., Ghosn R., Khatounian F., Fadel M., Tientcheu M. An energy-efficient scalar control taking core losses into account. *COMPEL*. 2018. Vol. 37, No. 2. P. 849–867. DOI: 10.1108/COMPEL-08-2017-0324
9. Attaianese C., Monaco M. D., Tomasso G. Maximum Torque Per Watt (MTPW) field-oriented control of induction motor. *Electrical Engineering*. 2021. Vol. 103. P. 2611–2623. DOI: 10.1007/s00202-021-01238-0
10. Graciola C. L., Goedtel A., Castoldi M. F., Souza W. A., Nunes E. A., Santos T. H., da Silva L. C. P. Comparison between predictive and scalar control strategies for minimizing losses in induction motors. *Systems Science & Control Engineering*. 2025. Vol. 13, No. 1. Article 2481942. DOI: 10.1080/21642583.2025.2481942
11. Kirschen D., Novotny D., Lipo T. On-line efficiency optimization of a variable frequency

- induction motor drive. IEEE Transactions on Industry Applications. 1985. Vol. 21. P. 610–615. DOI: 10.1109/TIA.1985.349717
12. Kioskeridis I., Margaritis N. Loss minimization in scalar-controlled induction motor drives with search controllers. IEEE Transactions on Energy Conversion. 1996. Vol. 11, No. 2. P. 213–220. DOI: 10.1109/63.486168
 13. Milykh V. I. Proiektuvannia tryfaznykh asynkhronnykh dvyhunyv z korotkozamknenoiu obmotkoioi rotora : navch. posibnyk. Kharkiv : FOP Panov A. M., 2023. 112 p.
 14. Ostashevskyi M. O., Petrenko O. M., Yurieva O. Yu. Teplovi rozrakhunky elektrychnykh mashyn : navch. posibnyk. Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, 2020. 450 p.

Riabov Ye. S., Yurieva O. Yu., Ivanov S. V., Zhukov A. Yu. Determination of the Rational Voltage for the Induction Motor of a Blower Used for Cooling of Locomotive Traction Motors

Improving the auxiliary systems of rolling stock responsible for cooling traction electrical equipment is an important direction for enhancing the traction-energy performance of mainline and industrial railway vehicles. This substantiates the relevance of the present study. Modern rolling stock employs motor-fan units equipped with induction motors to provide cooling for traction electrical equipment. Regulation of the airflow rate in such systems is achieved by varying the rotational speed of the electric motor. At the same time, the line voltage can be modified according to various control laws, which creates the need to determine the rational value of the motor supply voltage at a fixed supply frequency to ensure the highest energy efficiency of the electric drive.

The study considers a three-phase, six-pole, squirrel-cage induction motor rated at 35 kW, with a nominal line voltage of 400 V and a nominal supply frequency of 100 Hz, used to drive the cooling fan of traction motors. It is shown that due to variations in ambient conditions—namely temperature and atmospheric pressure—the motor power may vary in the range from 23 kW to 33 kW. Calculations of motor characteristics under changing power levels indicate that, when the power decreases, reducing the line voltage is advisable because it increases the motor efficiency,

with the maximum improvement reaching 0.31%. Under nominal supply frequency, the motor's line voltage may vary within the range of 360–400 V.

The operation of the motor at a rotor speed equal to two-thirds of the nominal value was investigated, corresponding to the required cooling airflow rate. Motor parameter calculations show that the highest efficiency values correspond to operation with a line voltage of 199–234 V for a power range of 6.8–9.8 kW. Within this voltage range, the efficiency improvement lies between 1.17 % and 2.76 %. When the motor operates at one-third of the nominal rotational speed, the maximum efficiency increase reaches 14.1% and 19.82%, achieved at line voltages of 61 V and 44 V for power levels of 1.2 kW and 0.85 kW, respectively.

For more accurate determination of the optimal line voltage—considering converter losses, additional losses in the motor caused by higher current and voltage harmonics, as well as deviations in motor and ventilation-duct parameters—the use of a research controller is recommended. Such a controller evaluates the power consumed by the motor-fan electric drive.

Keywords: energy efficiency, energy saving, electric drive, induction motor, blower, rolling stock, locomotive

Рябов Євген Сергійович – канд. техн. наук, ст. наук. співроб., доцент, доцент кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», YEVHEN.RIABOV@khpi.edu.ua

Юр'єва Олена Юрійвна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Електричні машини», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Olena.Yurieva@khpi.edu.ua

Іванов Станіслав Вікторович – аспірант кафедри «Електричний транспорт та тепловозобудування», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Stanislav.V.Ivanov@ieec.khpi.edu.ua

Жуков Антон Юрійович – ТОВ «Харківський електромашинобудівний завод», zukan83@gmail.com

Стаття подана 10.01.2026.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-61-65>

УДК 621.314.5

УТОЧНЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ЧАСТОТИ КОМУТАЦІЇ ІНВЕРТОРА НАПРУГИ З ФІЛЬТРОМ

Стрункін Г.М.

REFINEMENT OF THE OPTIMAL SWITCHING FREQUENCY OF A VOLTAGE-SOURCE INVERTER WITH A FILTER

Strunkin H.M.

У статті зазначено про необхідність підвищення частоти комутації автономних інверторів напруги для мінімізації його сукупної маси разом з низькочастотним вихідним фільтром. Зменшення маси пасивних компонентів фільтра зі зростанням частоти комутації інвертора супроводжується зростанням потужності втрат у його транзисторах. Два взаємопротилежні напрями формують мінімум цільової функції залежності маси системи автономний інвертор напруги – фільтр від частоти комутації. Розглянуто попередні роботи по знаходженню маси системи інвертор – фільтр при використанні тиристорів, кремнієвих транзисторів, транзисторів на основі карбіду кремнію та нітриду галію, фільтрів з осердям з електротехнічної сталі, аморфного заліза, пермалою та фериту. Обґрунтовано узагальнити попередні дослідження, розділивши частотний діапазон на п'ять областей відповідно до використаних матеріалів осердя. Для побудови цільової функції залежності маси елементів системи автономний інвертор напруги – фільтр використано метод вагових коефіцієнтів, які являють собою питомі масові показники, відповідно для охолоджувачів транзисторів, дроселя та конденсатора фільтра. Наведено схему однофазного автономного інвертора напруги з низькочастотним фільтром. Описана цільова функція залежності маси елементів системи інвертор напруги – фільтр від частоти комутації. Використанням вагових коефіцієнтів для дроселів з різним матеріалом осердя вдається здійснити глобальну оптимізацію. Підтверджено раніше отримані показники оптимальної частоти для кремнієвих транзисторів та дроселю з осердям із електротехнічної сталі. Показано, що заміна матеріалу осердя не дозволяє суттєво зменшити масу системи інвертор-фільтр. Використовуючи транзистори на базі карбіду

кремнію та осердя дроселя з аморфного заліза вдається покращити масогабаритні показники інвертора з фільтром в три рази. Використання більш високочастотних матеріалів – пермалою, порошкового заліза та феритів у осерді дроселя не дає переваги за масою, як і використання більш швидких транзисторів на базі нітриду галію. Для більшої частини промислових інверторів оптимальна частота складає 3,2 кГц.

Ключові слова: автономний інвертор напруги, низькочастотний фільтр, частота комутації, цільова функція, вагові коефіцієнти, маса.

Вступ. Проектування сучасних перетворювачів енергії для аерокосмічної галузі, електротранспорту та систем відновлюваної енергетики вимагає максимізації показника питомої потужності. Ключовим параметром оптимізації є частота комутації, яка визначає фундаментальний компроміс: підвищення частоти дозволяє зменшити масу пасивних компонентів фільтра (дроселя та конденсатора), але призводить до зростання динамічних втрат у напівпровідниках та магнітних осердях [1].

Скільки існує теорія автономних інверторів напруги (АІН), стільки часу і розвиваються підходи до їх оптимізації за різними показниками, насамперед масогабаритними [2]. Якщо перші дослідження орієнтувалися головним чином на використання тиристорних інверторів та дроселів із залізним осердям [3], то, з розвитком елементної бази, було розглянуто інвертори на IGBT [4], транзистори з карбіду кремнію [5], нітриду галію [6], ферити

[7], пермалой [8] тощо. За останні роки масогабаритні показники покращилися й у конденсаторів за рахунок використання нової плівкової технології [9]. На цей час для побудови дроселя фільтру використовуються щонайменше 5 матеріалів: електротехнічна сталь, аморфне залізо, пермалой, порошкове залізо та ферити [10]. Практичне використання цих матеріалів призвело до рекомендацій щодо раціональних частот обирання між ними [10]. У зв'язку з чим назріла необхідність провести глобальну оптимізацію з розділенням по регіонам використання матеріалів осердя дроселя та для транзисторів різних типів.

Через неможливість виконання глобальної оцінки маси дроселя від частоти у статті [4] було запропоновано методику вагових коефіцієнтів. На жаль, досить перспективна методика на той час була використана лише для осердь із електротехнічної сталі, що дозволило адекватно оцінити графік цільової функції лише до частот 5-7 кГц. При більших частотах цільова функція мала досить велику похибку, через те, що втрати в осерді ставали вирішуваними. Побудова ж цільової функції маси системи АІН-фільтр з розбиттям її по регіонах використання магнітних матеріалів в літературі не оглянута.

Метою роботи є побудова системної моделі пошуку глобального мінімуму маси автономного інвертора напруги з фільтром з урахуванням п'яти технологічних зон магнітних матеріалів дроселя для транзисторів на базі кремнієвої технології, карбіду кремнію та нітриду галію.

Виклад основного матеріалу дослідження. На рис. 1 представлена схема однофазного дворівневого АІН з вихідним фільтром. Як показано в [4], маса та об'єм елементів перетворювача пропорційні їх установленій потужності. При цьому перехід від встановленої потужності до масогабаритних показників здійснюється за допомогою вагових коефіцієнтів. Відомо також, що маса і габарити реактивних елементів (ємності та індуктивності фільтра) зменшуються зі зростанням робочої частоти, чим і пояснюється тенденція до підвищення частоти комутації в АІН. З іншого боку, при зростанні частоти комутації, збільшується потужність динамічних втрат у напівпровідникових приладах, що в свою чергу призводить до збільшення потужності, що віддається охолоджувачем в навколишній простір і спричиняє збільшення маси та габаритів охолоджувача. Таким чином, функція

сумарної встановленої потужності від частоти повинна спостерігатися мінімум при певній частоті..

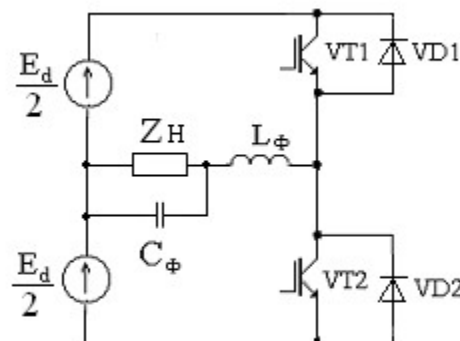


Рис. 1. Схема однофазного АІН

Для оптимізації частоти комутації інвертора напруги з фільтром скористаємось отриманими [4] співвідношеннями для функції залежності маси системи інвертор-фільтр від кутової частоти $M(\omega)$:

$$M(\omega) = 314 \cdot \left(\frac{K_L^M \rho I_{ef}^2}{2} + \frac{K_C^M U_{ef}^2}{\rho} \right) \cdot \frac{1}{0,1\omega} + K_O^M \left(\frac{W}{2\pi} \cdot \omega + P_{cm} \right), \quad (1)$$

де I_{ef} - ефективне значення струму навантаження; U_{ef} - діюче значення напруги на конденсаторі, ρ - хвильовий опір фільтру, W - повна енергія втрат на комутацію напівпровідникового приладу, яка може бути взята з довідкових даних фірм-виробників або розрахована по [11], P_{cm} - потужність статичних втрат у транзисторах інвертора [12], K_L^M , K_C^M , K_O^M - відповідно, питомі маси індуктивності, ємності та охолоджувача [4] (вагові коефіцієнти).

Якщо використати вагові коефіцієнти для дроселей з сучасних магнітних матеріалів [10], то можна побудувати графік цільової функції (1), який зображено на рис. 2. Для зручності виконано заміну вісі з кутової частоти на звичайну f .

Перехід між матеріалами осердя наступний згідно з рекомендаціями [10]: до 5 кГц використано електротехнічну сталь, до 15кГц – аморфне залізо, до 30 кГц – пермалой, до 70 кГц – порошкове залізо і понад 70 кГц – ферити.

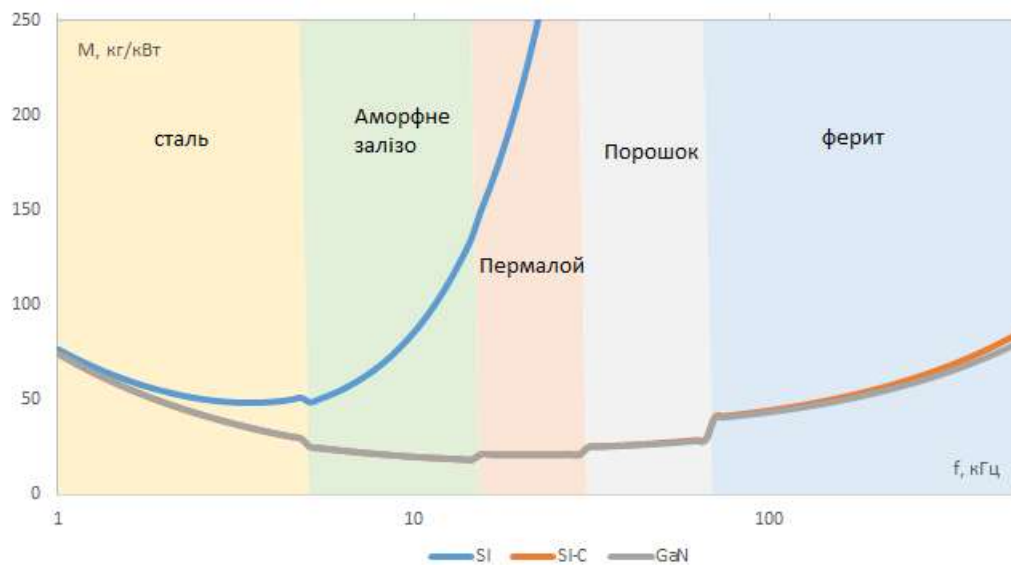


Рис. 2. Графік залежності маси системи АІН-фільтр від частоти

Якщо продиференціювати цільову функцію маси (1) по кутовій частоті, прирівняти вираз до нуля та розв'язати рівняння, можна знайти оптимальну частоту, за якої теоретична маса може бути мінімальною. Отримаємо вираз у такому вигляді:

$$\omega_M^O = \sqrt{\frac{3140\pi \cdot (K_L^M \rho^2 I_{\text{эф}}^2 + 2K_C^M U_{\text{эф}}^2)}{K_O^M W^* \rho}}. \quad (2)$$

Розрахунки оптимальної частоти показують, що при використанні транзисторів з кремнію SI оптимальна частота становить 3,2 кГц, що добре збігається з отриманим раніше результатом 3-5 кГц [4]. Перехід до інших матеріалів виграшу в загальній масі системи АІН-фільтр не дає через суттєвий вклад у масу охолоджувачів транзисторів. Для інверторів на базі карбіду кремнію SI-C та нітриду галію GaN оптимальна частоти знаходиться близько до максимальної межі використання аморфного заліза, тобто 15 кГц. Трохи спадаючий характер функції при цьому показує, що рекомендації [10] щодо переходу до іншого матеріалу можуть бути скореговані до 18-20 кГц. Також використання інших матеріалів для побудови дроселей фільтру не дає виграшу по масі, як це має місце при побудові джерел вторинного електроживлення. Для побудови потужних інверторів не має сенсу використання більш дорогих приладів за нітриду галію, бо різниця з карбідом кремнію проявляється на частотах у сотні кГц, при яких маса системи вже буде

неоптимальною. Тобто при сучасному рівні техніки для побудови системи, в якій є потреба встановлення низькочастотного фільтру, оптимальним є застосування комбінації приладів з карбіду кремнію та дроселя на базі аморфного заліза, що дає вигоду в порівнянні з традиційною архітектурою приблизно в 3 рази за показниками маси.

Висновки. Оптимізація з врахуванням використання сучасних матеріалів для побудови дроселя фільтру дозволяє сформулювати вимоги щодо вибору частоти комутації інвертора. Для традиційної структури на базі кремнієвих приладів попередні оцінювання (3-5 кГц) залишилися без змін. Отримано уточнене значення оптимальної частоти в 3,2 кГц. З використанням сучасної елементної бази оптимальним виявляється комбінація приладів на базі карбіду кремнію та аморфного заліза. Частота комутації при такому випадку лежить близько верхньої межі використання аморфного заліза і складає близько 15-20 кГц, даючи покращення масогабаритних показників системи в 3 рази в порівнянні з класичною компоновкою.

Література

1. Сенько В.І., Трубіцин К.В., Чибеліс В.І. Інвертори і перетворювачі частоти: монографія. Київ. Видавництво Ліра-К, 2020: 300с.
2. S. B. Kjaer, J. K. Pedersen and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 5, pp. 1292-

- 1306, Sept.-Oct. 2005, DOI:https://doi.org/10.1109/TIA.2005.853371.
3. Автономные инверторы / Гончаров Ю.П., Ермуратский Е.В., Заика Э.И. и др., под редакцией Г.В. Чалого. Кишинев, изд. "Штиинца", 1974: 336с.
4. Стрункин Г.Н. Оптимизация частоты коммутации двухуровневого автономного инвертора напряжения. / *Електротехніка та електроенергетика*. 2007, №2, С.19-22. URL: https://ee.zp.edu.ua/article/download/102955/9808/6/217899 (дата звернення 23.02.2026).
5. S. Saridakis, E. Koutroulis and F. Blaabjerg, "Filter optimization of Si and SiC semiconductor-based H5 and Conergy-NPC transformerless PV inverters," 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, 2013, pp. 1-10, DOI:https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6631737.
6. Baek, S., Choi, D., Bu, H., & Cho, Y. Analysis and Design of a Sine Wave Filter for GaN-Based Low-Voltage Variable Frequency Drives. *Electronics*, 2020, 9(2), 345. DOI:https://doi.org/10.3390/electronics9020345.
7. D. Yang, Z. Cheng, H. Li, S. Won, B. Zhou and J. Tian, "PCB Layout Optimization of High-Frequency Inverter for Magnetic Coupled Resonance Wireless Power Transfer System," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 171395-171404, 2019, DOI:https://10.1109/ACCESS.2019.2944972.
8. P. Channegowda and V. John, "Filter Optimization for Grid Interactive Voltage Source Inverters," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 4106-4114, Dec. 2010, DOI:https://10.1109/TIE.2010.2042421.
9. Wang, H. Optimization of LCL Filter Grid-Connected Inverters. *Academic Journal of Science and Technology*, 2023, 6(3), 127-133. DOI:https://doi.org/10.54097/ajst.v6i3.10654.
10. McLyman, C.W.T. *Transformer and Inductor Design Handbook* (4th ed.). CRC Press. 2011. DOI:https://doi.org/10.1201/b10865.
11. Семенов В.В., Стрункин Г.Н., Попов С.А. Потери мощности в инверторах с однополярной и двуполярной широтно-импульсной модуляцией. // *Електротехніка та електроенергетика*. 2007, №1, С.25-28. URL: https://ee.zp.edu.ua/article/download/102914/9803/3/217783 (дата звернення 23.02.2026).
12. Переверзев А.В., Семенов В.В., Стрункин Г.Н. Расчет рабочих режимов силовых приборов в полумостовой схеме инвертора напряжения с однополярной ШИМ. // *Електротехніка та електроенергетика*. 2006, №2, С. 8-12. URL: http://ee.zntu.edu.ua/article/download/102861/97978 (дата звернення 23.02.2026).

References

1. Senko V.I., Trubicin K.V., Chibelis V.I. *Invertori i peretvoryuvachi chastoti: monografiya*. Kiyiv, Vidavnistvo Lira-K, 2020: 300s.
2. S. B. Kjaer, J. K. Pedersen and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 5, pp. 1292-1306, Sept.-Oct. 2005, DOI:https://doi.org/10.1109/TIA.2005.853371.
3. Avtonomnye invertory / Goncharov Yu.P., Ermuratskij E.V., Zaika E.I. i dr. Pod redakciej G.V. Chalogo. Kishinev, izd. "Shtiinca", 1974: 336 s.
4. Strunkin G.N. Optimizaciya chastoty kommutacii dvuhurovnevoogo avtonomnogo invertora napryazheniya. / *Elektrotehnika ta elektroenergetika*. 2007, №2, S.19-22. URL: https://ee.zp.edu.ua/article/download/102955/9808/6/217899 (accessed 23.02.2026).
5. S. Saridakis, E. Koutroulis and F. Blaabjerg, "Filter optimization of Si and SiC semiconductor-based H5 and Conergy-NPC transformerless PV inverters," 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, 2013, pp. 1-10, DOI:https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6631737.
6. Baek, S., Choi, D., Bu, H., & Cho, Y. Analysis and Design of a Sine Wave Filter for GaN-Based Low-Voltage Variable Frequency Drives. *Electronics*, 2020, 9(2), 345. DOI:https://doi.org/10.3390/electronics9020345.
7. D. Yang, Z. Cheng, H. Li, S. Won, B. Zhou and J. Tian, "PCB Layout Optimization of High-Frequency Inverter for Magnetic Coupled Resonance Wireless Power Transfer System," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 171395-171404, 2019, DOI:https://10.1109/ACCESS.2019.2944972.
8. P. Channegowda and V. John, "Filter Optimization for Grid Interactive Voltage Source Inverters," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 4106-4114, Dec. 2010, DOI:https://10.1109/TIE.2010.2042421.
9. Wang, H. Optimization of LCL Filter Grid-Connected Inverters. *Academic Journal of Science and Technology*, 2023, 6(3), 127-133. DOI:https://doi.org/10.54097/ajst.v6i3.10654.
10. McLyman, C.W.T. *Transformer and Inductor Design Handbook* (4th ed.). CRC Press. 2011. DOI:https://doi.org/10.1201/b10865.
11. Semenov V.V., Strunkin G.N., Popov S.A. Poteri moshnosti v invertorah s odnopolyarnoj i dvupolyarnoj shirotno-impulsnoy modul'ya-ciej. // *Elektrotehnika ta elektroenergetika*. 2007, №1, S.25-28. URL: https://ee.zp.edu.ua/article/download/102914/9803/3/217783 (accessed 23.02.2026).
12. Pereverzev A.V., Semenov V.V., Strunkin G.N. Raschet rabochih rezhimov silovyh priborov v polumostovoj sheme invertora napryazheniya s odnopolyarnoj ShIM. // *Elektrotehnika ta ele-*

ktroenergetika. 2006, №2, S. 8-12. URL: <http://ee.zntu.edu.ua/article/download/102861/97978> (accessed 23.02.2026).

Strunkin H.M. refinement of the optimal switching frequency of a voltage-source inverter with a filter

The article states the need to increase the switching frequency of autonomous voltage-source inverters in order to minimize its total mass together with the low-frequency output filter. The reduction in the mass of passive components of the filter with increasing inverter switching frequency is accompanied by an increase in the power losses in its transistors. Two mutually opposite directions form the minimum of the objective function of the dependence of the mass of the autonomous voltage inverter - filter system on the switching frequency. Previous works on finding the mass of the inverter - filter system when using thyristors, silicon transistors, transistors based on silicon carbide and gallium nitride, filters with a core made of electrical steel, amorphous iron, permalloy and ferrite are considered. It is justified to generalize previous studies by dividing the frequency range into five regions according to the core materials used. To construct the objective function of the mass dependence of the elements of the autonomous voltage-source inverter-filter system, the method of weight coefficients was used, which are specific mass indicators, respectively, for transistor coolers, choke, and filter capacitor. A diagram of a single-phase autonomous voltage inverter with a low-frequency filter is presented.

The objective function of the mass dependence of the elements of the voltage inverter-filter system on the switching frequency is described. Using weight coefficients for chokes with different core materials, it is possible to carry out global optimization. The previously obtained indicators of the optimal frequency for silicon transistors and a choke with a core made of electrical steel are confirmed. It is shown that replacing the core material does not allow to significantly reduce the mass of the inverter-filter system. Using transistors based on silicon carbide and a choke core made of amorphous iron, it is possible to improve the mass and dimensions of the inverter with a filter by three times. The use of high-frequency materials such as permalloy, powdered iron, and ferrites in the core of the choke does not provide a weight advantage, nor does the use of faster gallium nitride transistors. For most industrial inverters, the optimal frequency is 3.2 kHz.

Key words: voltage-source inverter, low-pass filter, switching frequency, objective function, weighting factors, mass.

Стрункін Гліб Миколайович – магістр, інженер відділу приводу та перетворювачів ТОВ «Плутон ІС». 79026, Україна, Львівська обл., місто Львів, вулиця Лукаша М., будинок 46 офіс 1, e-mail: strunkingleb@gmail.com.

Стаття подана 15.12.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-66-73>

УДК 519.7

КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА НА ОСНОВІ САМООРГАНІЗАЦІЇ В НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМАХ

Кишенько В.Д., Горпинченко А.С.

CONTROL OF TECHNOLOGICAL OBJECTS OF SUGAR PRODUCTION ON THE BASIS OF SELF-ORGANIZATION IN NONLINEAR SYSTEMS

Kyshenko V.D., Gorpichenko A.S.

Встановлені в результаті досліджень визначальні особливості технологічних об'єктів цукрового виробництва, що відповідають в повній мірі ознакам складної організаційно-технічної системи. Однією із характерних ознак таких об'єктів є наявність intermittanse, тобто виникнення в часі переривчастих режимів: детермінованого, стохастичного та хаотичного із утворенням дисипативних просторово-часових структур. Така властивість забезпечує наявність процесів самоорганізації, що може забезпечити організацію ефективних стратегій ресурсоощадного керування. Таку задачу вирішують системи синергетичного керування. Регулятори із синергетичним керуванням забезпечують асимптотичну стійкість систем керування щодо їх бажаних режимів роботи, інваріантність до зміни різних факторів та робастність. Синтез законів синергетичного керування технологічними об'єктами цукрового виробництва виконаний на основі розробленої авторами методики. Ця методика дозволяє проводити оцінку параметрів нелінійних моделей завдяки експериментальній ідентифікації в різних ситуаційно-значущих зонах, чим забезпечується оперативність і точність керування. Синтезована синергетична система керування показала свою працездатність, стійкість та ефективність.

Таким чином, побудова систем керування на засадах новітньої концепції ресурсоощадної організації керуючих стратегій на базі синергетичної парадигми забезпечує різочі перспективи для підвищення ефективності виробництва цукру. Синтез синергетичних регуляторів дозволяє не лише забезпечити стійкість технологічних процесів в складних та змінних умовах, але також сприяє оптимізації використання енергетичних й матеріальних ресурсів. Це дуже важливо для сучасного цукрового виробництва, де постійно

зростають вимоги щодо енергоефективності, зростання якісних кондицій продукції та забезпечення прибутковості виробництва. За цими результатами навіть під час проєктування автоматизованих систем керування, так і при модернізації існуючих технологічних ліній підприємств цукрової галузі, вда|ся вивести на новий рівень стандарти виготовлення. Так само, стандартні моделі керування можуть встати дорого й застарілі, немає єдиного ефективного алгоритму адаптації.

Ключові слова : цукрове виробництво, технологічний об'єкт, синергетичне керування, самоорганізація.

Вступ. Технологічні комплекси цукрового виробництва мають всі характерні властивості та ознаки складних організаційно-технічних систем [1], тобто новітнього класу об'єктів керування, що вимагають застосування сучасних здобутків теорії та практики керування. До визначальних властивих прикмет таких систем зараховують багатомірність, багатозв'язність та нелінійність [2,3]. Багатомірність, що характеризується значною кількістю різноманітних параметрів, що характеризують різні прояви технологічного характеру такого об'єкта керування [4] і стримує розвиток систем керування, побудованих на відомих сакраментальних підходах.. Заодно з тим, для природних систем такого питання великої розмірності не буває - завдяки їм живим механізмам самоорганізації, гомеостазу [5].

Проблема багатозв'язності подолана в природних системах завдяки ієрархічності

побудови життєвих багаторівневих структур із забезпеченням взаємодії енергоматеріальних та інформаційних підсистем, коли на привілейовані рівні вищого порядку прибуває у агрегована інформація, а на нижніх рівнях інформація деталізується у згоді із принципом “розширення-стиснення” фазового простору [6], при цьому забезпечується здобуття жаданих цілей, які представляються як інваріантні багатообрази-атрактори [7].

Для створення продуктивних систем керування нелінійними системами користуються методами пасифікації [8], бекстеппінгу [9], робастного [10] та синергетичного [11] керування. Між них найбільш далекосяжними для нелегких технологічних об’єктів є методи синергетичного керування [12], які в абсолютній мірі ураховують фізико-хімічні атрибути технологічних процесів, відбивають явища природної самоорганізації, вбезпечують ресурсощадні режими діяльності, відзначаються витривалістю до зовнішніх збурень та структурних і параметричних еволюцій, санкціонують організацію пошуку цільових станів в різноманітних умовах, характеризуються неодмінною гнучкістю при варіації цілей та завдань, забезпечують значну надійність та здібність до відвертання критичних ситуацій [11].

Суть синергетичної концепції в завданнях керування зводиться до у використуванні істинних для складних систем фактів самоорганізації через творіння в терену станів об’єкта інформаційних атракторів та синергетичному взаємодіянні серед них завдяки малопотужному та економному коректуванню фазових траєкторій об’єкта, що дуже додає в ефективності його діяльності.

В обсязі синергетичного керування для технологічних комплексів доцільно застосувати методику розроблювання синергетичних регуляторів, яка дає можливість досягнення оптимальним шляхом цільових атракторів в об’єкті завдяки здійсненні аналітично визначених слабкопотужних керуючих впливів резонансного характеру [12].

Метою досліджень є розробка нелінійних моделей діяльності технологічних процесів цукрового виробництва відділень отримання дифузійного соку та сиропу (випарної станції), які визначають атрактори як інваріантні багатообрази в околі параметрів порядку, і здійсненню на їх базі стратегій керування, що заснують направлений пошук фазових

траєкторій об’єкта оптимальним шляхом між атракторами, вбезпечуючи при сім завдяки самоорганізації велику економію ресурсів підприємства.

Метою роботи є з урахуванням особливостей синергетичного підходу перейти до його практичного використання, що дозволить використати ефективні методи вирішення актуальних задач оптимального керування матеріальними потоками цукрового заводу. Завдання оптимального керування полягають в тому, що необхідно визначити такі методи дії на систему та параметри, які забезпечать найкращий, з точки зору критеріїв, фазовий перехід. Синергетичний принцип керування складними системами дозволяє змінювати структуру системи або переходити на інший рівень самоорганізації шляхом зміни параметрів порядку. Можливість зміни таких параметрів та межі, в яких вони можуть змінюватися, визначаються з допомогою синергетичного регулятора. В інформаційних системах синергетичний регулятор представлений у вигляді програмних засобів [5].

Виклад основного матеріалу дослідження. Метою синергетичного керування складними технологічними комплексами є встановлення та характеристика атракторів, як фокусів утворення дисипативних просторово-часових структур. Така процедура допускає оцінити діяльність складної системи з позицій самоорганізації у моменту різноманітних впливів як зовнішнього, так і внутрішнього характеру. Слід зауважити, що у випадку синергетичного керування складними системами особливу увагу потрібно приділити не силі дії на систему, а саме точності та характеру інформаційного керування, оскільки, саме точне інформаційне керування визначає ефективну організаційно-технічну структуру.

Існує два методи керування об’єктом на основі синергетичного підходу:

1. Керування шляхом зміни параметрів порядку. В результаті такої дії ми спостерігаємо нестійкість, порушення симетрії і границь складної нелінійної системи. Це призводить до можливих декількох сценаріїв поведінки системи після фазового переходу.

2. Керування шляхом зміни початкових умов. В результаті такої дії спостерігається можливість розвитку системи по декільком напрямкам, включаючи і хаотичну поведінку. Складність такого підходу полягає в тому, що не завжди можна змінити початкові умови. Інколи вони жорстко фіксовані.

Кожен із цих методів застосовується тоді, коли інший використати неможна. Так, наприклад, якщо є можливість із множини характеристик і параметрів системи визначити саме множину параметрів порядку і немає можливості змінювати вхідні умови, то використовується перший підхід. Якщо множина параметрів занадто велика, або визначити їх не можна через складні взаємозв'язки в середині системи, то необхідно використати другий підхід.

Отже, алгоритмом синергетичного керування вільно найменувані черговість керуючих дій і оцінку наслідків в ході діяльності, а також шансів зміни параметрів порядку при адаптації.

Якщо розглядається керування дивним атрактором, то його поведінка має хаотичний характер. При переводі системи із одної фазової траєкторії в іншу, необхідно здійснити один або декілька слабких інформаційних змін параметрів порядку. Кожен із них окремо не призводить до кардинальних змінювань системи, проте, якщо це робиться за певною схемою, то вмикається ефект «гойдалки». І досить незначні інформаційні впливи можуть змінити фазову траєкторію системи. Якщо правильно вибирати траєкторію і силу дії таких інформаційних потоків, то можна достатньо ефективно і з малими затратами енергії керувати системою в цілому [12].

Отже, робимо висновки, що в основі синергетичного методу керування складними технічними системами полягає принцип інформаційного впаду на виміри порядку, в гранях якого система чутлива і відтворюються її внутрішні властивості. Резонансний вплив – це вплив не силою дії, а правильно організовані, тобто узгоджені із внутрішніми властивостями, слабо потужні дії, що приводять систему до руху у заданому напрямку.

Оцінивши поведінку системи, робимо висновки, що характеризується нелінійними особливостями. Для розробки таких систем і для організації ефективного керування, належить застосувати методіку опрацювання синергетичних регуляторів [12]. Така методика

дозволяє сформулювати закони керування u_i , що забезпечують ефективне керування технологічними процесами цукрового виробництва. Здійснений синтез систем

синергетичного керування дифузійним відділенням та випарною станцією

Проведені експериментальні дослідження технологічних процесів цукрового виробництва і здійснена на базі часових рядів змінних об'єктів реконструкція атракторів дозволила встановити наявність атрактивних зон в різних виробничих ситуаціях (рис.1), що організовує потрібні обставини для ефективного використання синергетичних регуляторів.

Реконструкцію атрактора проводимо в програмному середовищі MATLAB® (рис. 1).

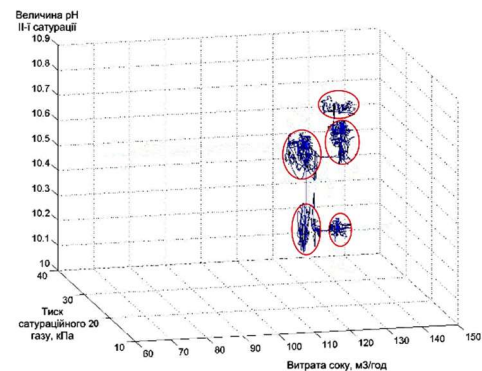


Рис. 1. Реконструйований фазовий портрет об'єкта з областями притягування (атрактор)

Математична модель (1) описує процес екстракції цукру з бурякової стружки:

$$\begin{aligned} \frac{dF_{cm}}{d\tau} &= -a_1 * F_{cm} + a_2 * F_{dc} * R + a_3 * \frac{F_{dc}^2 * B}{D * T} + a_4 * \frac{D * B}{T} + a_5 * T \\ \frac{dF_{dc}}{d\tau} &= -a_6 * \frac{F_{dc}}{T} - a_7 * F_{cm} * R - a_8 * \frac{F_{dc} * F_{cm}}{D * T} - a_9 * D * B * R + a_{10} * T \\ \frac{dD}{d\tau} &= a_{11} * \frac{F_{cm} * B}{T} - a_{12} * \frac{D}{T} \\ \frac{dR}{d\tau} &= a_{13} * \frac{F_{dc} * B * D}{T} - a_{14} \quad (1) \end{aligned}$$

де F_{cm} – витрата бурякової стружки, м³/год; F_{dc} – витрата дифузійного соку, м³/год; R – доброякісність, %; B – дигестія, %; D – втрати цукру з жомом, %; T – температура, °C; $a_1 - a_{14}$ – параметри моделі визначаються шляхом ідентифікації багатомірних часових рядів використовуючи середовища Vector ODE [12]. В таблиці 1 наведені значення параметрів моделі дифузійного апарата в різних умовах та ситуаціях.

Таблиця 1

Значення параметрів моделі дифузійного апарата

Номер зони	a1	a2	a3	a4	a5	a13	a14
S1.1	0.050	1.57	28.33	0.13	1.70	0.09	0.98
S1.2	0.055	1.73	31.16	0.14	1.87	0.11	1.07
S1.3	0.054	1.70	30.60	0.15	1.83	0.10	1.05
S1.4	0.053	1.72	30.88	0.14	1.82	0.10	1.06
S2.1	0.052	1.75	30.03	0.13	1.84	0.11	1.03
S2.2	0.057	1.66	30.31	0.14	1.79	0.12	1.04
S2.3	0.056	1.65	30.46	0.14	1.77	0.10	1.09
S2.4	0.057	1.65	29.44	0.14	1.74	0.10	1.02
S2.5	0.055	1.65	29.75	0.13	1.78	0.13	1.00
S2.6	0.057	1.65	29.18	0.13	1.75	0.09	1.10
S2.7	0.053	1.68	29.35	0.13	1.91	0.98	1.11
S2.9	0.068	1.69	31.55	0.13	1.98	0.95	1.06
S3.1	0.056	1.70	31.55	0.14	1.99	0.97	1.04
S3.2	0.056	1.65	31.78	0.14	1.89	0.93	1.09

В якості керування u_1 вибираємо значення витрати бурякової стружки, F_{ct} , в якості керування u_2 вибираємо значення витрати дифузійного соку F_{dc} . Згідно із методикою закони керування залежать від (2)

$$u_1(R, B, T); u_2(R, D, T) \quad (2)$$

Використавши метод аналітичного конструювання регуляторів, визначені керувальні дії. Для подальшого дослідження необхідно розглянути інваріантні багато образи (3).

$$\begin{aligned} \psi_1(R, B, T) &= 0 \\ \psi_2(R, B, T) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Паралельно послідовний розгляд інваріантних багатообразів дозволяє розглядати інваріанти, як атрактори із зонами протягування при застосуванні законів керування $u_1(R, B, T); u_2(R, D, T)$.

Відбувається рух системи у фазовому просторі до перетину багато образів $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0$. Оскільки доброякісність та температура не можуть безпосередньо впливати на керування u_1 , u_2 , то необхідно забезпечити такий зв'язок через ψ_i (4).

$$\begin{aligned} \psi_1 &= R + T + v(B) \\ \psi_2 &= R + T + v(D) \end{aligned} \quad (4)$$

де V - деяка функція залежності реальних технологічних параметрів.

Виходячи із залежностей (3) та (4) отримаємо (5).

$$\begin{aligned} R + T + v(B) &= 0 \\ R + T + v(D) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Зміна макрозмінних ψ_1 та ψ_2 підпорядковуються функціоналу (6).

$$T_i \psi_i(\tau) + \psi_i(\tau) = 0 \quad (6)$$

На основі рівняння моделі та рівняння (6) отримаємо:

$$\begin{aligned} T_1 \left[\frac{dR}{dt} + \frac{dT}{dt} + \frac{\partial v}{\partial B} * \frac{dB}{dt} \right] + R + T + v(B) &= 0 \\ T_2 \left[\frac{dR}{dt} + \frac{dT}{dt} + \frac{\partial v}{\partial D} * \frac{dD}{dt} \right] + R + T + v(D) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Та закони взаємозв'язного керування (8) технологічними процесами дифузійного відділення цукрового заводу:

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{R+v}{T^*T_1} \frac{T-B^2}{T} * R^*F_{ct} - \frac{T-B^2}{T} \frac{B^2}{T} \frac{F_{ct}^2}{D} + \left(\frac{B+T}{T} \frac{T-B^2}{T} \right) * F_{ct} + \\ &+ \left(\frac{T}{R} - \frac{T}{B} - R^* \frac{B}{T} \left(\frac{B}{T} \right)^2 \right) * D + \frac{T-B^2}{B} \\ u_2 &= \frac{D+v}{T^*T_2} \frac{B}{T} * D^*R^* \frac{T^*B^2}{T} \frac{B^2}{T} \frac{F}{D} + \frac{T^*B^2}{T} * R^*F - \\ &- \left(\frac{B}{T} \right) * \frac{R}{D} + \left(\frac{B^2+T^2}{T} - \frac{T-B^2}{T} \right) * F + \frac{T^*B^2}{T} \frac{F^2}{D} - \\ &- \left(\frac{T-B^2}{T} + \frac{T-B^2}{T} \right) * \frac{F}{B} + \frac{T^*B^2}{T} * D \end{aligned} \quad (8)$$

де T_1 , T_2 – параметри синергетичного регулятора.

Параметрами настроювання законів керування, які впливають на якість динаміки процесів і ефективно викликають самоорганізацію системи, є часові параметри – постійні часу T_1 , T_2 . Проведені дослідження синтезованої системи синергетичного керування дозволили визначити оптимальні значення параметрів T_1 і T_2 за критеріями тривалості і ресурсозатрат (рис.2).

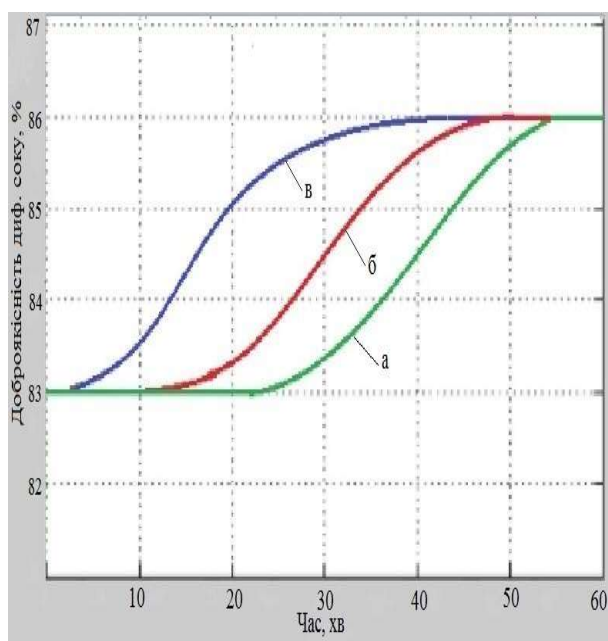


Рис.2. Перехідний процес регулювання доброякісності дифузійного соку:
а – при $T_1=160$ с; $T_2=180$ с; б – при $T_1=80$ с;
 $T_2=100$ с; в – при $T_1=10$ с; $T_2=20$ с

Параметри настройки законів керування регламентують час регулювання T_1 , T_2 . Умовою стійкості системи являються значення: $T_1 > 0$, $T_2 > 0$.

Математична модель (9) описує процес отримання сиропу:

$$\begin{aligned} \frac{dF_c}{dt} &= -p_1 F_{dc} + p_2 F_c R + p_3 \frac{F_c^2 C_{cp}}{h^2 T} + p_4 \frac{h C_{cp}}{T} + p_5 T \\ \frac{dF_{dc}}{dt} &= -p_6 \frac{F_c}{T} - p_7 F_c R - p_8 \frac{F_c F_{dc} C_{cp}}{h^2 T} - p_9 h C_{cp} R + p_{10} T \\ \frac{dh}{dt} &= p_{11} \frac{F_{dc} C_{cp}}{T} - p_{12} \frac{h}{T} \\ \frac{dR}{dt} &= p_{13} \frac{F_c C_{cp} h}{T} - p_{14} \end{aligned} \quad (9)$$

де F_{dc} – витрата соку фільтрованого соку, $m^3/год$; F_c – витрата сиропу, $m^3/год$; R – доброякісність, %; C_{dc} – вміст сухих речовин, %; h – рівень у випарній установці, м; T – температура, $^{\circ}C$; $p_1 - p_{14}$ – шляхом ідентифікації багатомірних часових рядів визначаються параметри моделі використавши програмне середовище Vector ODE [12]. В таблиці 2 наведені значення параметрів моделі випарної станції в різних умовах та ситуаціях.

В якості керування u_1 вибираємо значення витрати бурякової стружки, F_{dc} , в якості керування u_2 вибираємо значення витрати дифузійного соку F_c .

Згідно із методикою побудови синергетичних регуляторів закони керування залежать від [10]:

$$u_1(R, C, T); u_2(R, h, T). \quad (10)$$

Відповідно до методу аналітичного конструювання агрегованих регуляторів, визначені керувальні дії. Для подальшого дослідження необхідно розглянути інваріантні багатообрази [11]:

$$\begin{aligned} \psi_1(R, C, T) &= 0 \\ \psi_2(R, h, T) &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Таблиця 2

Значення параметрів моделі випарної станції

Номер зони	p1	p2	p3	p4	p5	p13	p14
S5.1	0.080	0.57	08.33	1.13	1.74	1.09	2.98
S5.2	0.085	0.73	01.16	1.14	1.88	1.11	2.07
S5.3	0.084	0.70	00.60	1.15	1.89	1.10	2.05
S5.4	0.083	0.72	00.88	1.14	1.72	1.10	2.06
S5.5	0.082	0.75	00.03	1.13	1.64	1.11	2.03
S5.6	0.087	0.66	00.31	1.14	1.59	1.12	2.04
S5.7	0.086	0.65	00.46	1.14	1.57	1.10	2.09

Паралельно послідовний розгляд інваріантних багатообразів дозволяє розглядати інваріанти, як атрактори із зонами протягування при застосуванні законів керування $u_1(R, C, T); u_2(R, h, T)$.

Відбувається рух системи у фазовому просторі до перетину багатообразів, $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0$.. Оскільки (12) доброякісність та температура не можуть безпосередньо впливати на керування, u_1, u_2 , то необхідно забезпечити такий зв'язок через ψ :

$$\begin{aligned}\psi_1 &= R + T + v(C) \\ \psi_2 &= R + T + v(h)\end{aligned}\quad (12)$$

де v - деяка функція залежності реальних технологічних параметрів.

Виходячи із залежностей (11) та (12) отримаємо [12]: (13).

$$\begin{aligned}R + T + v(C) &= 0 \\ R + T + v(h) &= 0\end{aligned}\quad (13)$$

Зміна макрозмінних ψ_1 та ψ_2 підпорядковуються функціоналу (14).

$$T_i \psi_i(\tau) + \psi_i(\tau) = 0 \quad (14)$$

На основі рівняння моделі та рівняння (14) отримаємо (15).

$$\begin{aligned}T_1 \left[\frac{dR}{dt} + \frac{dT}{dt} + \frac{\partial v}{\partial C} * \frac{dC}{dt} \right] + R + T + v(C) &= 0 \\ T_2 \left[\frac{dR}{dt} + \frac{dT}{dt} + \frac{\partial v}{\partial h} * \frac{dh}{dt} \right] + R + T + v(h) &= 0\end{aligned}\quad (15)$$

Та закони взаємозв'язного керування [12] технологічними процесами дифузійного відділення цукрового заводу (16).

$$\begin{aligned}u_1 &= \frac{R+h}{T^*T_1} \frac{T-C^2}{T} * R^*F_{\pm} - \frac{T-C^2}{T} \frac{C}{T} \frac{F_{\pm}^2}{h} + \left(\frac{C+T}{T} \frac{T-C^2}{T} \right) * F_{\pm} + \\ &+ \left(\frac{T}{R} - \frac{T}{C} \right) * R^* \left(\frac{C}{T} \right)^2 * h + \frac{T-C^2}{C} \\ u_2 &= \frac{h+v}{T^*T_2} \frac{C}{T} * R^* \frac{T^*C^2}{T} \frac{C}{T} \frac{F}{h} \frac{T^*C^2}{T} * R^*F - \\ &- \left(\frac{C}{T} + \frac{R}{h} \right) * \left(\frac{C^2+T^2}{T} \frac{T-C^2}{T} \right) * F + \frac{T^*C^2}{T} \frac{F^*R}{h^2} - \\ &- \left(\frac{T-C^2}{T} + \frac{T-C^2}{T} \right) * \frac{F}{h^2} + \frac{T^*C^2}{T} * h\end{aligned}\quad (16)$$

де T_1, T_2 - параметри синергетичного регулятора.

На основі розроблених законів керування (u_1, u_2) можна сформулювати рекомендації у вигляді визначення характеру зміни часу регулювання (T_1, T_2): «збільшити», «зменшити» і т.д. Для використання цих рекомендацій у системі автоматизованого керування необхідно визначити кількісні характеристики цих рекомендацій. В результаті проведених досліджень було виявлено, що система стійка до збурень, а час регулювання залежить лише від величин T_1, T_2 . При чому, характер перехідних процесів не змінюється при зміні часу регулювання, відповідно і не залежить від нього.

Синтезована синергетична система керування показала свою працездатність, стійкість та ефективність.

Висновки. Проведені дослідження підтвердили, що технологічні об'єкти цукрового виробництва належать до складних організаційно-технічних систем, для яких характерні багатовимірність, багатозв'язність, нелінійність та наявність переривчастих режимів функціонування. Такі особливості обумовлюють виникнення процесів самоорганізації та формування дисипативних просторово-часових структур, що створює передумови для застосування синергетичного підходу до керування технологічними процесами.

У роботі обґрунтовано доцільність використання синергетичного керування для підвищення ефективності функціонування технологічних комплексів цукрового заводу. На основі експериментальних досліджень та аналізу часових рядів технологічних параметрів було виконано реконструкцію фазових портретів процесів та виявлено області притягування атракторів, що характеризують різні режими роботи системи. Це дозволило визначити ситуаційно-значущі зони функціонування технологічних об'єктів та провести ідентифікацію параметрів їх нелінійних моделей.

З використанням методики аналітичного конструювання агрегованих регуляторів синтезовано закони синергетичного керування для основних відділень цукрового виробництва — дифузійного та випарного. Отримані закони керування забезпечують спрямований рух системи у фазовому просторі до заданих інваріантних багатообразів-атракторів, що відповідають оптимальним режимам функціонування технологічного процесу.

Проведене моделювання показало, що параметри налаштування синергетичних регуляторів (часові параметри T_1 та T_2 визначають швидкість перехідних процесів та якість регулювання, при цьому система зберігає стійкість за умови $T_1 > 0$ та $T_2 > 0$). Отримані результати підтвердили працездатність синтезованої системи керування, її робастність до зовнішніх збурень та здатність забезпечувати стабільні режими роботи технологічних процесів.

Таким чином, застосування синергетичного підходу до керування технологічними об'єктами цукрового виробництва дозволяє ефективно використовувати властивості самоорганізації складних систем, забезпечувати оптимальні режими роботи обладнання та зменшувати витрати енергетичних і матеріальних ресурсів. Запропоновані методи можуть бути використані як під час проєктування нових автоматизованих систем керування, так і при модернізації існуючих технологічних ліній підприємств цукрової промисловості з метою підвищення їх ефективності, надійності та якості продукції.

Література

- Ladanyuk A., Kyshenko V., Smityuh Y. The biotech complexes control in conditions of situational uncertainty. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*. 2012. No. 60. P. 149–154.
- Смітюх Я., Ладанюк А., Кишенько В. Сценарний підхід при автоматизації технологічних процесів : монографія. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. 184 с.
- Haken H. *Synergetics: Introduction and Advanced Topics*. 3rd ed. Berlin, Heidelberg : Springer, 2004. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-10184-1_2
- Rugh W. J., Shamma J. S. Research on gain scheduling. *Automatica*. 2000. Vol. 36. P. 1401–1425.
- Young D. S., Won H., Santi E., Monti A. Synergetic control approach for induction motor speed control. *Proceedings of the 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2004. P. 1951–1956.
- Kokotovic P., Arcak M. Constructive nonlinear control: A historical perspective. *Automatica*. 2001. Vol. 37. P. 637–662.
- Kokotovic P. V. The joy of feedback: Nonlinear and adaptive. *IEEE Control Systems Magazine*. 1992. Vol. 12. P. 7–17.
- Haken H. *Advanced Synergetics*. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1987.
- Zhou J., Wen C. *Adaptive Backstepping Control of Uncertain Systems with Nonsmooth Nonlinearities, Interactions or Time Variations*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. 241 p.
- Freeman R. A., Kokotovic P. V. *Robust Control of Nonlinear Systems*. Boston : Birkhäuser, 1996. 258 p.
- Kokotovic P. V. Constructive nonlinear control: Progress in the 90's. *Proceedings of the 14th IFAC World Congress*. Beijing, China, 1999. P. 49–77.
- Мірошник В. О., Гачковська М. А., Кишенько В. Д., Грабовська О. В. Оптимізація процесів переробки сільськогосподарської сировини : монографія. Київ : ЦП «Компринт», 2019. 479 с.

References

- Ladanyuk A., Kyshenko V., Smityuh Y. The biotech complexes control in conditions of situational uncertainty. *Annals of Warsaw University of Life Sciences*. 2012. No. 60. P. 149–154.
- Smityukh Ya., Ladanyuk A., Kyshenko V. *Stsenarnyi pidkhd pry avtomatyzatsii tekhnolohichnykh protsesiv: monohrafiia* [Scenario approach in automation of technological processes: monograph]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. 184 p.
- Haken H. *Synergetics: Introduction and Advanced Topics*. 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-10184-1_2
- Rugh W. J., Shamma J. S. Research on gain scheduling. *Automatica*. 2000. Vol. 36. P. 1401–1425.
- Young D. S., Won H., Santi E., Monti A. Synergetic control approach for induction motor speed control. *Proceedings of the 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2004. P. 1951–1956.
- Kokotovic P., Arcak M. Constructive nonlinear control: A historical perspective. *Automatica*. 2001. Vol. 37. P. 637–662.
- Kokotovic P. V. The joy of feedback: Nonlinear and adaptive. *IEEE Control Systems Magazine*. 1992. Vol. 12. P. 7–17.
- Haken H. *Advanced Synergetics*. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1987.
- Zhou J., Wen C. *Adaptive Backstepping Control of Uncertain Systems with Nonsmooth Nonlinearities, Interactions or Time Variations*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. 241 p.
- Freeman R. A., Kokotovic P. V. *Robust Control of Nonlinear Systems*. Boston: Birkhäuser, 1996. 258 p.
- Kokotovic P. V. Constructive nonlinear control: Progress in the 90's. *Proceedings of the 14th IFAC World Congress*. Beijing, China, 1999. P. 49–77.
- Miroshnyk V. O., Hachkovska M. A., Kyshenko V. D., Hrabovska O. V. *Optyimizatsiia protsesiv pererobky silskohospodarskoi syrovyny: monohrafiia* [Optimization of agricultural raw material processing processes: monograph]. Kyiv: TsP "Komprynt", 2019. 479 p.

Kyshenko V. D. Gorpichenko A. S. Control of technological objects of sugar production on the basis of self-organization in nonlinear systems

The research has revealed the defining features of sugar production facilities, which fully correspond to the characteristics of a complex organisational and technical system. One of the characteristic features of such facilities is the presence of intermittance, i.e. the occurrence of intermittent modes over time: deterministic, stochastic and chaotic with the formation of dissipative spatio-temporal structures. This property ensures the presence of self-organisation processes, which can ensure the organisation of effective strategies for

resource-efficient management. This task is solved by synergistic management systems. Synergistic control regulators ensure asymptotic stability of control systems with respect to their desired operating modes, invariance to changes in various factors, and robustness. The synthesis of the laws of synergistic control of technological objects in sugar production is based on the methodology developed by the authors. This methodology allows the evaluation of parameters of nonlinear models through experimental identification in various situationally significant zones, which ensures the efficiency and accuracy of control. The synthesized synergistic control system has demonstrated its performance, stability, and effectiveness.

Thus, the use of a synergistic approach to the management of technological facilities in sugar production opens up new opportunities for improving the efficiency of production systems. The development of synergistic regulators not only ensures the stability of technological processes in complex and changing conditions, but also contributes to the optimisation of energy and material resources. This is very important for modern sugar production, where there are constantly increasing requirements for energy efficiency, reliability, safety and quality of the products they produce.

Based on these results, even during the design of automated control systems, as well as during the modernisation of existing technological lines of sugar industry enterprises, it is possible to bring manufacturing standards to a new level. Similarly, standard control models can be expensive and outdated, and there is no single effective adaptation algorithm.

Keywords: sugar production, technological facility, synergistic control, self-organisation.

Кишенько Василь Дмитрович – професор, кандидат технічних наук кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління Національний університет харчових технологій.
kvd1948@gmail.com

Горпинченко Антон Сергійович – аспірант Національний університет харчових технологій.
ORCID 0009-0005-6190-7348
antongorpinchenkodra@gmail.com

Стаття подана 13.12.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-74-80>

УДК 681.5.015

DEVELOPMENT OF A MODEL-BASED CONTROL ALGORITHM FOR AN AMMONIA SYNTHESIS COLUMN

Kobzarev E.V., Kulikov D.O., Duryshch O.A., Loria M.G.

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ МОДЕЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОГО КЕРУВАННЯ КОЛОНОЮ СИНТЕЗУ АМІАКУ

Кобзарев Є.В., Куліков Д.О., Дуришев О.А., Лорія М.Г.

This paper presents an approach to the development of a model-based control system for a multi-shelf synthesis column used in ammonia production. The proposed approach is based on the application of a combined mathematical model that integrates deterministic and experimental–statistical modeling methods. Such a combination makes it possible to achieve a high level of model adequacy, ensure adaptability to varying operating conditions, and expand the applicability of the model for the analysis and control of complex chemical engineering processes.

Using the proposed approach, a mathematical model of a three-shelf ammonia synthesis column equipped with an internal heat exchanger was developed. Based on this model, an information and logical scheme of the control object was refined, which made it possible to identify the key internal interactions between process variables and to assess their influence on the output parameters of the synthesis column. On this basis, an operating algorithm for a model-based control system was developed.

The obtained mathematical description enabled the formulation of an optimality criterion for column operation and the solution of an optimization problem aimed at determining the optimal flow rates of “cold” bypass streams. This makes it possible to maintain the operating conditions of the column in a region close to the optimal regime and to ensure a rapid transition of the system to this region during operation. The optimal value of ammonia concentration at the outlet of the synthesis column was determined using the Hooke–Jeeves optimization method.

A functional automation scheme was developed, and the set of technical means required for implementing the proposed control system in industrial automatic process control systems was analyzed. The implementation of the developed model-based control system will reduce deviations of technological parameters from their

optimal values and improve the operational efficiency of the ammonia synthesis column.

Keywords: ammonia production, synthesis column, model-based control, combined mathematical model, process optimization.

Introduction. The continuous growth of raw material prices on global markets leads to a significant increase in production costs in the Ukrainian chemical industry. In particular, the share of natural gas in the total production cost at chemical enterprises currently reaches approximately 75%. Under such conditions, improving the efficiency of raw material and energy utilization becomes a key factor in ensuring the competitiveness of domestic products in the global market. Therefore, optimization of technological processes is an urgent task for modern chemical production.

Various approaches are used to improve the efficiency of industrial processes, including the development of new catalysts, modernization of technological equipment, and the implementation of automatic process control systems (APCS). However, for complex technological processes such as ammonia synthesis, where multi-shelf gas reactors are used, the simple replacement of local control systems with APCS does not ensure optimal process control.

At the same time, APCS provide the technological basis for implementing advanced model-based control systems for complex technological units, such as synthesis columns used in ammonia production. The primary objective of

the reactor control system is to achieve the maximum conversion of the initial components of the reversible reaction by maintaining an optimal temperature profile along the reactor height. A characteristic feature of the synthesis process is that it is close to the ideal plug-flow model, which implies the existence of gradients of technological parameters along the spatial coordinate.

During the optimization of continuous large-scale chemical productions, such as ammonia synthesis, particular attention should be paid to the synthesis cycle, especially to the synthesis column. In such production processes, the synthesis column represents a sequence of interconnected gas reactors. Since synthesis reactions are typically exothermic, the heat released from the reaction is used to preheat the synthesis gas entering the column.

The temperature regime within the column is controlled by supplying synthesis gas through “cold” bypass streams that do not pass through the internal heat exchanger. These streams are introduced at the inlets of the corresponding shelves of the column. The main control problem for a multi-shelf synthesis column in ammonia production is the optimal distribution of synthesis gas flow through the physical channels of the column in order to maximize the concentration of the target component (ammonia) at the column outlet.

This problem can be solved by implementing a model-based control system. The development of such a system requires the creation of a mathematical model of the synthesis column and the design of an appropriate control algorithm. The mathematical model should be sufficiently simple to allow real-time implementation, while at the same time adequately reflecting the influence of numerous technological parameters. In addition, the model should be easily invertible, allowing the determination of the optimal flow rates of synthesis gas through the “cold” bypass streams on each column shelf based on the current value of the target component concentration.

However, the models presented in works [1, 2] do not meet these requirements and therefore cannot be directly applied for solving the considered control problem.

Taking into account the above considerations, the development of a mathematical model and an operating algorithm for a model-based control system of a multi-shelf ammonia synthesis column represents an urgent and important applied scientific problem.

Literature Data Analysis and Problem Statement

In paper [1], it was demonstrated that the parameters of a complex technological object such as a synthesis column are interconnected. A change in the synthesis gas flow through any of the “cold” bypass streams leads not only to a change in the temperature on the corresponding shelf but also affects the gas flow distribution through the physical channels of the column. Consequently, a change in the synthesis gas flow in any bypass pipeline influences the overall temperature regime of the column and, as a result, the concentration of the target component at the column outlet. However, the internal interconnections between the parameters were not sufficiently considered in the presented approach.

In study [2], it was shown that achieving maximum production efficiency requires an optimal distribution of synthesis gas flows through the physical channels of the synthesis column in such a way that the concentration of the target component at the column outlet is maximized. At the same time, the temperature at the shelves of the synthesis column must not exceed permissible technological limits. Therefore, the mathematical model must include corresponding constraints, which were not considered in the referenced work.

The specific features of the synthesis process were thoroughly analyzed in paper [3]. In [4], it was shown that the direct solution of the optimization problem is complicated due to the inherent properties of the control object, namely the large number of technological parameters. Variations in any of these parameters can shift the extremum of the concentration function, which significantly complicates the search for optimal operating conditions.

One possible approach to overcoming these difficulties is the use of model-based control systems [5]. A similar approach was proposed in [6], where a deterministic model was developed. In [7], the ideal plug-flow model with parameter gradients along the spatial coordinate was used. However, the practical application of this model is limited due to the complexity of identifying its parameters.

The analysis of studies [8], devoted to the development of static and dynamic models of synthesis columns and their internal heat exchangers, confirms the conclusions obtained. A critical analysis of existing approaches to modeling and control of synthesis columns makes it possible to formulate the research objective and define the main tasks of this study.

The aim of this study is to improve the operational efficiency of an ammonia synthesis column through the development of a model-based control system and an algorithm for searching optimal operating conditions.

To achieve this aim, the following research objectives are formulated:

- to analyze the ammonia synthesis process in a multi-shelf column as a control object;
- to develop static and dynamic mathematical models of the synthesis column;
- to design an algorithm for verifying the adequacy of the developed models and for determining the extreme value of the target component concentration at the outlet of the synthesis column (preliminary optimization stage);
- to implement a model-based control system and to investigate the performance of the proposed optimal control strategy for the synthesis column.

Materials and Methods for Studying the Information-Logical Structure of a Three-Shelf Ammonia Synthesis Column.

In this study, the parameters characterizing the state of the technological system are referred to as output parameters. The main objective of the control system is to maintain these parameters at their optimal values. Control parameters are variables through which the regulation process is carried out, such as material and energy flow rates. Disturbance parameters are variables that affect the output parameters but cannot be directly controlled.

An analysis of the technological process occurring in a three-shelf gas reactor used for ammonia synthesis (Fig. 1) shows that the object has two main output coordinates: the concentration of the target product Q_3 at the column outlet and the gas temperature T_3 at the column outlet after the heat exchanger TO .

For the considered object, the temperature distribution along the height of the ammonia synthesis column uniquely determines the ammonia concentration at the outlet and, consequently, the temperature T_3 , which in turn determines the temperatures T_0 and T'_3 . Since the object can be considered, with sufficient accuracy, as a closed thermodynamic system, the concentration value Q_3 uniquely determines the temperature T_3 and, correspondingly, the temperatures T_0 and T'_3 . Therefore, stabilization of the temperature T'_3 does not have independent practical significance in this case.

A specific feature of the considered object is that control of a single parameter—the concentration of the target component Q_3 —is achieved using three control variables, namely the

circulating gas flow rates supplied to each of the three catalyst shelves through cold bypass streams.

Disturbance parameters include the circulating gas flow rate $F_{c.g.}$, its temperature $T_{c.g.}$, and the concentration of the target component at the reactor inlet Q_0 . The circulating gas pressure P can also be considered a disturbance parameter because it is stabilized by the synthesis gas compressor. Moreover, due to the relatively low conversion of synthesis gas into the final product (approximately 10%), the pressure drop caused by the reaction does not exceed about 5%. Therefore, when the conversion degree varies within the range of 8–12%, the pressure changes within 4–6%, which lies within the measurement error of the pressure control channel [4].

An information-logical analysis of the three-shelf ammonia synthesis column was carried out. Based on this analysis, a generalized information-logical scheme of a three-shelf ammonia synthesis column equipped with an internal recuperative heat exchanger was developed. The resulting scheme is presented in Fig. 1.

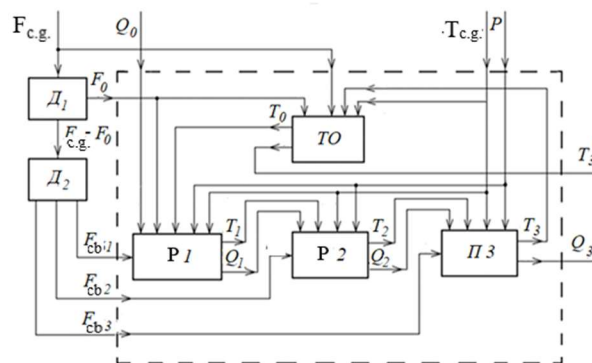


Fig. 1. Information-Logical Scheme of a Three-Shelf Ammonia Synthesis Column

Fig. 1 illustrates the information-logical scheme of a three-shelf ammonia synthesis column, where D_1 and D_2 denote synthesis gas flow dividers, P_1 , P_2 , and P_3 represent the reactor catalyst shelves, and TO denotes the internal heat exchanger.

In the presented scheme, the dashed line outlines the synthesis column itself. The column consists of four main subsystems: three sequentially connected catalyst shelves (P_1 , P_2 , P_3) and a built-in recuperative heat exchanger (TO). In addition, the distribution of synthesis gas flows within the column is controlled by two flow dividers D_1 and D_2 .

From the viewpoint of process control, the ammonia synthesis column represents a complex technological object characterized by a large

number of disturbance parameters and numerous internal interconnections between process variables.

To address the considered control problem, a mathematical model of the synthesis column has been developed. This model enables the formulation of an optimality criterion for solving the corresponding optimization problem. Although the initial deterministic model obtained at the first stage provides only limited accuracy, it allows the evaluation of the general shape of the objective function over a wide range of argument values, taking into account its possible multiextremal nature and enabling the identification of the region of the global extremum [5, 6].

At the second stage, the model must be identified using experimental data obtained from the real control object. Such data can be collected using probabilistic or experimental identification methods, which allow the influence of various disturbance factors to be taken into account. This approach significantly improves the accuracy of the simulated process parameters.

The development of an adequate mathematical model requires consideration of the nonlinear relationships between the input and output parameters of the technological process. This leads to an increase in the order of the equations describing the control object. However, the use of high-order equations considerably complicates the optimization procedure aimed at determining the optimal process parameters. In many cases, approximate methods have to be applied, which may reduce the accuracy of the developed model [7].

The steady-state operation of the ammonia synthesis column is described by a system of equations presented in [5]. The solution of this system can be expressed as

$$Q_3 = f(F_1, F_2, F_3, F_0, F_{uc}, T_{uc}, Q_0, P) \quad (1)$$

Equation (1) represents the mathematical model of the three-shelf ammonia synthesis column with respect to the concentration of the target component at the column outlet.

An analysis of the obtained mathematical model indicates that not all variables can be directly determined. Therefore, additional equations must be introduced. To achieve this, the present study proposes the application of test disturbances to the control object. These disturbances involve changing the flow rate of one of the cold bypass streams by a fixed unknown value [4].

For this procedure to be implemented, it is necessary to ensure stabilization of the flow rates in

the remaining cold bypass streams during the test conditions. Performing such experiments makes it possible to obtain three additional equations:

$$Q_3' = f_1(F_{x\bar{6}1} + \Delta_1, F_{x\bar{6}2}, F_{x\bar{6}3}, (F_0 - \Delta_1), F_{uc}, T_{uc}, Q_0, P) \quad (2)$$

$$Q_3'' = f_2(F_{x\bar{6}1}, (F_{x\bar{6}2} + \Delta_1), F_{x\bar{6}3}, (F_0 - \Delta_1), F_{uc}, T_{uc}, Q_0, P) \quad (3)$$

$$Q_3''' = f_3(F_{x\bar{6}1}, F_{x\bar{6}2}, (F_{x\bar{6}3} + \Delta_1), (F_0 - \Delta_1), F_{uc}, T_{uc}, Q_0, P) \quad (4)$$

The joint solution of equations (2)–(4) can be written in the following form

$$\begin{aligned} & a_4 Q_3^4 + a_3 Q_3^3 + a_2 Q_3^2 + a_1 Q_3 + a_0 = \\ & = \phi_1(F_{x\bar{6}1}) + \phi_2(F_{x\bar{6}2}) + \phi_3(F_{x\bar{6}3}) + \phi_{12}(F_{x\bar{6}1}, F_{x\bar{6}2}) + \phi_{13}(F_{x\bar{6}1}, F_{x\bar{6}3}) + \\ & + \phi_{23}(F_{x\bar{6}2}, F_{x\bar{6}3}) + \phi_{123}(F_{x\bar{6}1}, F_{x\bar{6}2}, F_{x\bar{6}3}) + \Omega(F_{uc}, T_{uc}, Q_0, P). \end{aligned} \quad (5)$$

Equation (5) represents a refined mathematical model of the three-shelf ammonia synthesis column equipped with an internal heat exchanger. In this model, the value of the objective function depends on disturbance parameters. Since these parameters can be measured, their values can be substituted directly into equation (5). Moreover, due to the relatively high inertia of the object, disturbance parameters remain nearly constant over relatively long time intervals.

As a result, two values of the target component concentration at the column outlet can be obtained: the measured value and the value calculated by the model. If the calculated value deviates from the measured value beyond a predefined tolerance, the mathematical model must be corrected by recalculating the coefficients a_4, a_3, a_2, a_1 , and a_0 .

Solving equation (5) with respect to the concentration of ammonia at the outlet of the synthesis column yields a refined mathematical model describing the column operation. The derivative (or the sum of derivatives) of the concentration with respect to the flow rates of the cold bypass streams equal to zero represents the optimality criterion:

$$\frac{\partial Q}{\partial F_1} + \frac{\partial Q}{\partial F_2} + \frac{\partial Q}{\partial F_3} = 0 \quad (6)$$

Thus, the considered control problem is reduced to the mathematical problem of determining the maximum of a function.

The deterministic modeling approach makes it possible to perform structural identification and determine the general form of the mathematical model of the ammonia synthesis column. In this study, the model is represented by a fourth-order equation with respect to the concentration of the target component. This model forms the basis for the model-based control system of the ammonia synthesis column.

The selected model structure is relatively simple: the unknown variable in the fourth-order equation can be expressed through its coefficients. Therefore, during model adaptation, the functional form of the dependencies remains unchanged, while only the numerical values of the coefficients are updated [4].

During operation of the synthesis column, technological parameters may change under the influence of uncontrolled disturbances that are not included in the model. These disturbances may include variations in the concentration of inert gases in the synthesis gas, catalyst activity degradation, and changes in hydrodynamic regimes inside the column.

Such disturbances may lead to discrepancies between the measured and calculated values of the target component concentration. In this case, it becomes necessary to adjust the coefficients of the left-hand side of the mathematical model (a_4, a_3, a_2, a_1, a_0). In this work, this problem is solved using the recursive least squares method [6].

After updating the coefficients of the left-hand side of the model, the equality between the left and right sides of the equation is violated. Therefore, the next stage of the adaptation procedure involves adjusting the coefficients of the right-hand side of the model.

Following this procedure, the deterministic model gradually transforms into an experimental-statistical model that reflects the actual operating conditions of the synthesis column.

The obtained mathematical model is subsequently used within the control algorithm to solve the optimization problem.

One of the key process parameters affecting the operation of the synthesis column is the synthesis gas flow rate (unit load). Changes in this parameter lead to a transition of the column to a new steady operating state, which requires additional adaptation of the mathematical model according to the previously described algorithm.

Thus, the proposed approach provides a mechanism for adaptive updating of the mathematical model of the ammonia synthesis

column based on a combined deterministic and experimental-statistical modeling framework.

The main task of the control system is to update the model coefficients, solve the optimization problem, and stabilize the flow rates of the cold bypass streams at the calculated optimal values. The solution of the optimization problem involves determining the bypass flow rates that ensure the maximum conversion of synthesis gas into the target product under the current operating conditions.

Due to the complexity of equation (6), the analysis in this work is limited to its general representation. To determine the maximum ammonia concentration at the outlet of the synthesis column for a fixed synthesis gas load $F_{c.g.}$, a multiparameter optimization procedure can be applied. Modern computer-based process control systems make it possible to obtain such solutions within acceptable computational time [8].

However, due to strong uncontrolled disturbances affecting the process, including variations in catalyst activity and hydrodynamic conditions within the column, the solution obtained from the model-based optimization can only be considered as an initial approximation in the vicinity of the optimal operating point.

The operating algorithm of the proposed model-based control system is based on a combined mathematical model of the ammonia synthesis column. A distinctive feature of the proposed modeling approach is that the general structure of the model is obtained using deterministic simulation methods, while the numerical values of the model coefficients are refined through the comparison of simulation results with experimental data obtained from the technological object.

Since the model is represented by a fourth-order equation, the functional dependence of the target component concentration on the process input parameters remains unchanged. This property enables the formulation of an optimization equation that can be used to determine optimal operating conditions. The incorporation of a model adaptation block allows continuous adjustment of the model coefficients and, consequently, of the optimization equation according to the current technological parameters.

Due to the relatively simple mathematical structure of the model and the high computational performance of modern process control systems, the correction of the mathematical model and the optimality criterion equation can be performed in real time. This makes it possible to dynamically determine the optimal values of the key control

parameters of the ammonia synthesis process, namely the flow rates of the cold bypass streams supplied to the corresponding catalyst shelves of the synthesis column.

As a result of the conducted research, the technological reserve of the synthesis column in ammonia production has been determined in accordance with the technological regulations. The implementation of the proposed model-based control system makes it possible to stabilize the process at optimal operating conditions and ensure the full utilization of the available technological reserve. Consequently, the application of the developed control system allows increasing the productivity of the ammonia synthesis column by up to 20%.

Conclusions. An improved information-logical scheme of the ammonia synthesis column has been developed. The proposed scheme made it possible to determine that the synthesis column is characterized by two input coordinates, three output coordinates, and four disturbance parameters. In addition, the internal interconnections of the control object were clarified and their influence on the output variables of the ammonia synthesis column was analyzed. Based on the obtained results, an operating algorithm for a model-based control system of the ammonia synthesis column was developed.

The general structure of a mathematical model of the ammonia synthesis column with a built-in internal heat exchanger was obtained. This model made it possible to derive a fourth-order optimality criterion equation describing the column operation and to construct the corresponding optimization function.

The proposed approach allows determining the optimal flow rates of the “cold” bypass streams by solving the optimization problem, ensuring that the synthesis column operates under conditions close to the optimal regime. This enables a rapid transition of the control system to the near-optimal operating region. The optimal value of ammonia concentration at the outlet of the synthesis column was determined using the Hooke–Jeeves optimization method, which allows increasing the product yield by up to 1.2 times.

Л і т е р а т у р а

1. Засядько О. В., Писаренко А. В. Синтез екстремальних систем керування // ElectronComm. 2014. Т. 19, № 3 (80). ISSN 1811-4512. URL: <https://mail.ukr.net/desktop#readmsg/16919466141416568376/f0>

2. Mandloi R., Shah P. Method for on-line identification of a first order plus dead-time process model. Electronics Letters. 1995. Vol. 31, No. 15. P. 1297–1298. DOI: <https://doi.org/10.1049/el:19950865>
3. Verhaegen M., Verdult V. Filtering and System Identification: A Least Squares Approach. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 422 p. URL: https://books.google.com.ua/books/about/Filtering_and_System_Identification.html?id=vIOUuAAACAAJ
4. Söderström T., Stoica P. Instrumental variable methods for system identification. Circuits, Systems and Signal Processing. 2002. Vol. 21, Issue 1. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010088722693>
5. Loria M., Tselishchev O., Eliseyev P., Porkuian O., Hurin O., Abramova A., Boichenko S. Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.270519>
6. Дуришев О. А., Кобзарев Є. В., Гурін О. М., Лорія М. Г. Дослідження впливу дискретного управління вузлом охолодження та конденсації на ефективність виробництва аміаку. Вісник СХУ імені В. Даля. 2025. № 4 (290). С. 72–77. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-72-77>
7. Eliseyev P., Loria M., Tselishchev O., Hurin O., Kupina O., Sotnikova T. Use of additive test methods in the simulation of the methanol synthesis column for the creation of a control system from the model. EUREKA: Physics and Engineering. 2023. No. 5. P. 94–104. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002963>
8. Loria M. Experimental investigation of the method of determination of optimal controller settings. EUREKA: Physics and Engineering. – 2019. – No. 2. P. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00864>
9. Купіна О. А., Лорія М. Г., Целіщев О. Б., Гурін О. М. Дослідження доцільності використання дискретної системи керування з моделлю вузлом охолодження та конденсації аміаку у виробництві аміаку. Вісник СХУ імені В. Даля. 2023. № 2 (278). С. 112–118. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-278-2-112-118>

References

1. Zasiadko, O. V., & Pysarenko, A. V. Synthesis of extreme control systems. ElectronComm. 2014. 19(3(80)). ISSN 1811-4512. Retrieved from <https://mail.ukr.net/desktop#readmsg/16919466141416568376/f0>
2. Mandloi R., Shah P. Method for on-line identification of a first order plus dead-time process model. Electronics Letters. 1995. Vol. 31, No. 15.

- P. 1297–1298. DOI: <https://doi.org/10.1049/el:19950865>
3. Verhaegen M., Verdulet V. Filtering and System Identification: A Least Squares Approach. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 422 p. URL: https://books.google.com.ua/books/about/Filtering_and_System_Identification.html?id=vIOUuAAACAAJ
 4. Söderström T., Stoica P. Instrumental variable methods for system identification. Circuits, Systems and Signal Processing. 2002. Vol. 21, Issue 1. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010088722693>
 5. Loria M., Tselishchev O., Eliseyev P., Porkuian O., Hurin O., Abramova A., Boichenko S. Principles and stages of creation of automatic control systems with a model of complex technological processes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.270519>
 6. Duryshch O. A., Kobzarev Ye. V., Hurin O. M., Loria M. H. Doslidzhennia vplyvu dyskretnoho upravlinnia vuzlom okholodzhennia ta kondensatsii na efektyvnist vyrobnytstva amiahu // Visnyk SNU imeni V. Dalia. 2025. № 4 (290). S. 72-77. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-290-4-72-77>
 7. Eliseyev, P., Loria, M., Tselishchev, O., Hurin, O., Kupina, O., & Sotnikova, T. Use of additive test methods in the simulation of the methanol synthesis column for the creation of a control system from the model. EUREKA: Physics and Engineering. (2023). (5), 94–104. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002963>
 8. Loria, M. Experimental investigation of the method of determination of optimal controller settings. EUREKA: Physics and Engineering. 2019. (2), 16-22. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00864>
 9. Kupina, O. A., Loria, M. H., Tselishchev, O. B., & Hurin, O. M. Study of the feasibility of using a discrete control system with a model of the cooling and condensation unit in ammonia production. Visnyk of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. 2023. (2(278)), 112-118. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2023-278-2-112-118>

Кобзарев Є. В., Куліков Д. О., Дуришев О. А., Лорія М. Г. Розробка алгоритму модельно-орієнтованого керування колоною синтезу аміаку

У статті представлено підхід до розроблення модельно-орієнтованої системи керування багатополічною колоною синтезу, що використовується у виробництві аміаку. Запропонований підхід ґрунтується на застосуванні комбінованої математичної моделі, яка поєднує детерміновані та експериментально-

статистичні методи моделювання. Таке поєднання дозволяє досягти високого рівня адекватності моделі, забезпечити її адаптивність до змінних умов функціонування та розширити можливості застосування для аналізу й керування складними хіміко-технологічними процесами.

На основі запропонованого підходу розроблено математичну модель триполічної колони синтезу аміаку з вбудованим внутрішнім теплообмінником. На основі цієї моделі уточнено інформаційно-логічну схему об'єкта керування, що дало змогу визначити основні внутрішні взаємозв'язки між технологічними параметрами та оцінити їх вплив на вихідні координати колони синтезу. На цій основі розроблено алгоритм функціонування модельно-орієнтованої системи керування.

Отриманий математичний опис дозволив сформулювати критерій оптимальності роботи колони та розв'язати задачу оптимізації, спрямовану на визначення оптимальних витрат «холодних» байпасних потоків. Це забезпечує підтримання режиму роботи колони в області, близькій до оптимальної, а також швидкий перехід системи до цієї області під час функціонування. Оптимальне значення концентрації аміаку на виході з колони синтезу визначено із застосуванням методу оптимізації Гук-Джівса.

Розроблено функціональну схему автоматизації та проаналізовано комплекс технічних засобів, необхідних для впровадження запропонованої системи керування в промислові автоматизовані системи керування технологічними процесами. Реалізація розробленої модельно-орієнтованої системи керування дозволить зменшити відхилення технологічних параметрів від їх оптимальних значень і підвищити ефективність роботи колони синтезу аміаку.

Ключові слова: виробництво аміаку, колона синтезу, модельно-орієнтоване керування, комбінована математична модель, оптимізація процесу.

Кобзарев Євген Володимирович – аспірант, асистент кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, kobzarev@snu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0004-8811-7488>

Куліков Денис Олексійович – старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, kulikovhome@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-9752-6582>

Дуришев Олександр Андрійович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, duryshch@snu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0003-4472-2697>

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, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5589-8351>

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-81-91>

УДК 622.7: 534

РОЗПІЗНАВАННЯ МІНЕРАЛОГІЧНИХ РІЗНОВИДІВ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ БЕЗКОНТАКТНИХ НЕРУЙНІВНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Моркун Н.В., Грищенко С.М., Мацуї А.М., Олійник Т.А.

RECOGNITION OF MINERALOGICAL VARIETIES OF IRON ORE USING NON- CONTACT NON-DESTRUCTIVE MEASUREMENT METHODS

Morkun N.V., Hryshchenko S.M., Matsui A.M., Oliynyk T.A.

Методи вихрострумових та ультразвукових вимірювань поєднують можливість їх одночасного ефективного застосування шляхом електромагнітного перетворення єдиного зондуємого сигналу в процесі досліджень фізико-механічних та хіміко-мінералогічних характеристик рудних матеріалів. Визначення та обґрунтування характеристичних ознак зазначеного перетворення імпульсного електромагнітного сигналу у феромагнітному середовищі є ключовою задачею для розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища. Для вирішення цієї задачі виконано аналіз міжнародного досвіду у галузі безконтактного неруйнівного контролю характеристик матеріалів, використано комп'ютерне моделювання та інтелектуальні методи аналізу та класифікації результатів вимірювань. За результатами досліджень запропоновано використання комбінованого електромагнітного перетворювача для розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди шляхом безконтактних неруйнівних вимірювань. Комбінований перетворювач за рахунок дії електромагнітного поля формує вихрові струми у досліджуваному середовищі та реалізує перетворення електромагнітних сигналів на пружні коливання феромагнітної гірської породи. Параметри вторинного магнітного поля, сформованого вихровими струмами, амплітуда і частота пружних акустичних коливань, залежать від вмісту і структури розподілу феромагнітного компонента в гірській породі, фізико-механічних характеристик і стану гірського масиву. Змодельований вплив вихрових струмів на результати перетворення шляхом генерації магніторушійної сили, яка протидіє змінам магнітного потоку. При цьому враховуються

паразитні ефекти, використовуючи елементи, що моделюють послідовний опір магнітного потоку та паралельну проникність його розсіювання. Сформований зондуємий електромагнітний сигнал має періодичний імпульсний синусоїдальний характер. Спеціальний керований сигнал моделює змінні характеристики (магнітний опір із врахуванням вихрових струмів) досліджуваного середовища. Таким чином, електромагнітний перетворювач формує вихрострумовий сигнал та пружні коливання безпосередньо в зоні вимірювання характеристик феромагнітних порід гірського масиву. Оскільки при цьому відсутні будь-які проміжні елементи передачі зондуємого сигналу в середовищі, то і відсутні похибки вимірювань його характеристик, обумовлені цими факторами. Визначені параметри зондуємого електромагнітного імпульсу та його спектральні характеристики використані для розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища. Застосування результатів вихрострумового перетворення додатково до ультразвукових вимірювань дозволило підвищити якість розпізнавання до 93-94.5 %.

Ключові слова: руда, різновиди, електромагнітне перетворення, моделювання, автоматизація, буріння.

Вступ. Постійно зростаюче енергоспоживання в усьому світі прискорило дослідження в напрямку розробки і застосування енергоефективних технологій у різних галузях промисловості. Вирішення цієї проблеми неможливо без впровадження безконтактних методів неруйнівного контролю

характеристик матеріалів, що використовуються і перероблюються, та стану технологічного обладнання. Саме до таких, в першу чергу, відносяться методи ультразвукових та вихрострумових вимірювань. Ці методи поєднують можливість їх одночасного застосування у процесі досліджень феромагнітних матеріалів шляхом використання єдиного електромагнітного зонduючого сигналу. В свою чергу, така їх особливість значне полегшує застосування для автоматизації технологічних процесів і виробництв.

Rodriguez-Sotelo J.C. та ін. [1] довели, що електричні, магнітні та теплові ефекти під дією електромагнітного випромінювання притаманні для всіх видів феромагнітних матеріалів. Датчики вихрових струмів є незамінними в сучасних промислових операціях для визначення та подолання впливу зазначених ефектів на енергоефективність електротехнічного обладнання. Harms J., and Kern T. A. [2] розробили модель, яка сприяє кращому розумінню фізичних ефектів та параметрів вихрострумового перетворення. Автори проаналізували теорію, що лежить в основі використовуваних датчиків вихрових струмів, запропонували новий опис моделі на основі рівнянь Максвелла та реалізували її за допомогою еквівалентної електричної схеми.

Mörée R. [3] розглядав класичні вихрові струми, які враховують лише питомий опір та товщину сталевих пластин ламінованого матеріалу, але результати вихрострумового перетворення також пов'язані з такими властивостями матеріалу, як текстура, розмір кристалічного зерна, тип сплаву та орієнтація кристалічної анізотропії.

Meng B. та ін. [4] на основі методу вихрострумового контролю запропонували рішення в часовій області для коаксіального збудження, приймальних котушок та датчиків Холла, що взаємодіють з полем вихрових струмів в області, в яку подаються сторонні металеві предмети. Детально проаналізовано вплив ефекту відриву на характеристику класифікації та ідентифікації сторонніх металевих предметів. Результати моделювання та експериментів показують, що сигнали системи виявлення металевих сторонніх предметів, оброблені алгоритмом шумозаглушення, дозволяють класифікувати та ідентифікувати положення падіння, розмір, провідність та магнітну проникність металевих сторонніх предметів на основі точки відриву,

пікового значення, часу до піку та ефективного часового діапазону.

В роботах Bishop C.M. та Bishop H. [4], Shukla K. та ін. [6], Hellier, C. [7], продемонстровано інноваційні підходи щодо неруйнівного контролю різноманітних матеріалів і конструкцій. Thon A. та ін. [8] зазначають, що все більшої популярності завдяки своїй безконтактній природі набувають електромагнітні акустичні перетворювачі (EMAT). Зокрема, вони можуть бути використані для вибіркового збудження та виявлення високопорядкових мод ультразвукових хвиль. Електромагнітні акустичні перетворювачі, що генерують крутильні та поздовжні спрямовані хвилі, ретельно досліджені для трубопровідних конструкцій у роботі Wang Z. та ін. [9] Розроблений перетворювач, заснований на механізмі вихрострумового перетворення, містить віялоподібні магнітні полюси та двошарову котушку. Побудовано модель для дослідження генерації та поширення хвиль від перетворювача. Bao L. та ін. [10] дослідили магнітострикційний плівковий електромагнітний акустичний перетворювач, що складається з постійного магніту, котушки та магнітострикційної плівки на основі феромагнетику (Fe_3O_4), прикріпленої до зразка, яку можна використовувати на деталях складної форми або з нерівними чи шорсткими поверхнями.

Визначення характеристик рудних матеріалів із застосуванням ультразвукових вимірювань детально розглянуто у роботах [11-13]. Далі буде розглянуто метод вихрострумового контролю як складова комбінованого методу, який дозволяє поєднати переваги обох підходів.

Вихрострумові методи - це ідеальне рішення для визначення характеристик матеріалів, але з огляду на сучасні вимоги до підвищення енергоефективності та зменшення виробничих втрат, виникає необхідність в їх ефективному і точному моделюванні. Класичні експериментальні підходи до вивчення механізму вихрострумового перетворення відзначаються високою трудомісткістю, значними фінансовими витратами та обмеженими можливостями у відтворенні різноманітних режимів роботи. До того ж, вони не завжди дозволяють оперативне коригування параметрів для пошуку оптимальних рішень.

У роботах [14-16], запропоновано сучасні моделі машинного навчання (ML) для вирішення різноманітних задач дефектоскопії.

Sun F. та інші [17] запропонували нову залишкову мережу CCRNet для поліпшення можливостей інтелектуальної оцінки результатів вихрострумової дефектоскопії, що характеризується кращою роздільною здатністю зображення, більш точною оцінкою та якістю у виявленні дефектів. У цій роботі продемонстровано затухання імпульсних вихрових струмів із глибиною дифузії. Досліджений процес зменшує результуючі зміни сигналу, що ускладнює надійну та точну оцінку глибоко розташованих дефектів.

Morkun V. та ін. [13] запропонували застосовувати алгоритми нечіткої класифікації та нейро-нечіткі мережі для визначення мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища. Робиться висновок, що для підвищення точності розпізнавання потрібно використовувати більше характеристичних ознак предмету розпізнавання різної фізичної природи.

Таким чином, застосування комбінованого методу вимірювань параметрів ультразвукових та вихрострумових вимірювань є перспективним підходом, щодо підвищення ефективності та якості визначення характеристик рудних матеріалів та розпізнавання їх мінералогічних різновидів. Однак, маючи на увазі різноманітність фізико-механічних властивостей та текстурно-структурних особливостей зразків руди, необхідні додаткові дослідження для виявлення взаємозв'язків характеристик руди з параметрами вихрострумового перетворення сформованих в них електромагнітних сигналів.

Метою дослідження є визначення та обґрунтування на основі комп'ютерного моделювання характеристичних ознак вихрострумового перетворення імпульсного електромагнітного сигналу у феромагнітному середовищі для розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди.

Викладання основного матеріалу. Метод вихрострумових вимірювань базується на фундаментальних рівняннях Максвелла

$$\nabla^2 H - (j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon)H = 0, \quad (1)$$

де H - напруженість магнітного поля; σ - провідність; ϵ - діелектрична проникність; μ - магнітна проникність; ∇ - оператор дивергенції.

Основні принципи вихрострумового контролю проілюстровано рис. 1 [18].

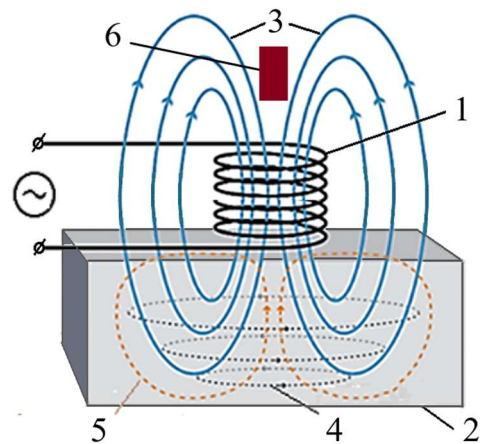


Рис. 1. Основні принципи вихрострумового контролю:

- 1 – котушка збудження; 2 – досліджуваний матеріал;
- 3 – первинне магнітне поле; 4 – вихрові струми;
- 5 – вторинне магнітне поле; 6 – сенсор [18]

Коли в котушку збудження 1 подається змінний струм, вона створює первинне магнітне поле 3, яке індукуює вихрові струми 4 в досліджуваному матеріалі 2. Ці струми, у свою чергу, генерують власне вторинне магнітне поле 5. Задачею вихрострумового контролю є визначення параметрів зазначеного вторинного магнітного поля. Ці параметри вказують на властивості матеріалу (електропровідність, магнітна проникність), наявність дефектів (тріщин, порожнеч), що перешкоджають течії вихрових струмів, та ін. Вони вимірюються за допомогою окремого сенсору 6, другої (приймальної) котушки або шляхом вимірювання параметрів струму, що протікає в котушці збудження.

При реалізації вихрострумових вимірювань велике значення мають проникнення та щільність вихрових струмів. Проникнення обмежене через скін-ефект, який призводить до глибини. Глибина, на якій щільність зменшується до $1/e$ від експоненціального зменшення щільності з щільності на поверхні, характеризує глибину скін-проникнення δ та визначається виразом

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

де δ – глибина скін-слоя (м), μ – магнітна проникність (Гн/м), σ – електропровідність (См/м) та ω – кутова частота (рад/с).

Вираз (2) показує, що глибина проникнення залежить від частоти збудження. Чим нижча частота, тим глибше проникнення і навпаки. У порівнянні з одночастотним (лише одна частота збудження) більш інформативним є імпульсний метод вихрострумового контролю. У цьому випадку форма хвилі збудження визначається як у роботі [19]

$$f(t) = \begin{cases} A, & -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \\ 0, & |t| > \frac{T}{2} \end{cases} \quad (3)$$

де A – амплітуда імпульсу, а T – ширина імпульсу.

Перетворення Фур'є дозволяє визначити частотні складові імпульсної хвилі

$$F(\omega) = \frac{2 \sin \omega T/2}{\omega} . \quad (4)$$

Для визначення характеристик феромагнітних порід гірського масиву використовується перетворювач електромагнітного типу. Він є розподіленою структурою, що складається з джерела постійного магнітного поля, джерела змінного магнітного поля і деякого обсягу феромагнітного компонента гірської породи, де і відбуваються процеси перетворення енергії електромагнітного поля. На рис. 2 наведена загальна схема комбінованого електромагнітного акустичного та вихрострумового перетворювача ЕМАТ.

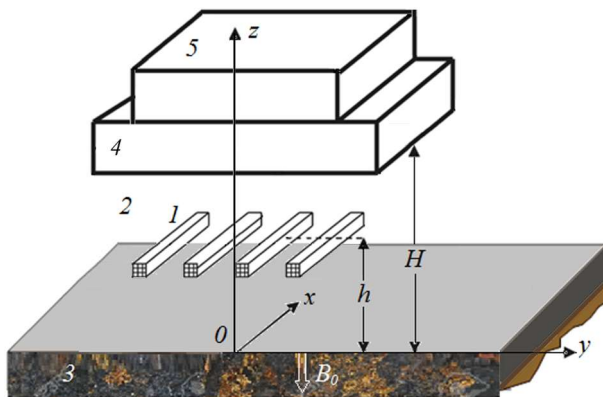


Рис. 2. Електромагнітний перетворювач:
1 – струмопроводи котушки збудження;
2 – повітряне середовище; 3 – об'єкт контролю;
4 – екран; 5 – однополюсний магніт;
 B_0 – вектор індукції магнітного поля

Котушка індуктує вихрові струми $\mathbf{J}$ в поверхневих шарах випробувального матеріалу, а взаємодія між статичним магнітним полем $\mathbf{B}$ і вихровими струмами $\mathbf{J}$ створює густину сили Лоренца $\mathbf{F}$, яка в свою чергу генерує ультразвукові хвилі, що поширюються в досліджуваному зразку у роботі авторів Xie Y. та ін. [20]

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (5)$$

Dodd C.V. та Deeds W.E. [21] запропонували аналітичні рішення для круглої котушки над шаруватим провідником. Для розрахунку індукованого вихрового струму у цьому випадку запропоновані наступні рівняння

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{I} + \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \mu \nabla \left(\frac{1}{\mu} \right) \times (\nabla \times \mathbf{A}) , \quad (6)$$

$$\mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} , \quad (7)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} , \quad (8)$$

де $\mathbf{A}$ – векторний потенціал; μ , σ та ε – проникність, провідність та діелектрична проникність матеріалу, відповідно; $\mathbf{I}$ – щільність прикладеного струму; ω – кутова частота прикладеного змінного струму; $\mathbf{E}$ – електричне поле; $\mathbf{J}$ – індукований вихровий струм.

На основі розрахунку вихрових струмів із застосуванням виразів (6)-(8) визначається векторний потенціал [21]

$$\mathbf{A}(r, z) = \mathbf{M} \int_0^\infty \frac{1}{a^2} \left(\int_{ar_1}^{ar_2} x J_1(x) dx \right) J_1(ar) (e^{-al} - e^{-a(l+h)}) \frac{e^{a_1 z}}{a+a_1} da , \quad (9)$$

$$\mathbf{M} = \mu_0 N \mathbf{I} , \quad (10)$$

$$a_1 = \sqrt{a^2 + j\omega \mu_1 \sigma} , \quad (11)$$

де N – витки котушки; a та x – змінні інтегрування; $J_1(ar)$ та $J_1(x)$ – функції Бесселя першого роду; μ_0 та μ_1 – проникність повітря та досліджуваного матеріалу відповідно.

Ланцюжок перетворень електромагнітних сигналів у досліджуваному феромагнітному середовищі наведено на рис. 3 [22]

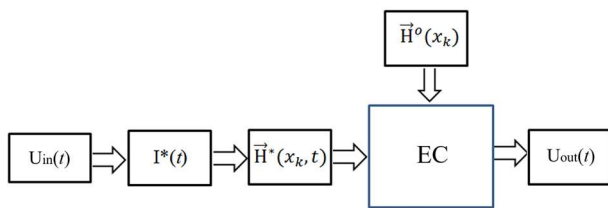


Рис. 3. Ланцюжок перетворень електромагнітних сигналів у досліджуваному феромагнітному середовищі [22]

На рис. 3 прийнято наступні позначення: $U_{in}(t)$ - різниця електричних потенціалів на електричному вході (на клеммах електричного контуру) перетворювача ЕМАТ; $I^*(t)$ - електричний струм, що змінюється в часі t в електричному контурі перетворювача; $\vec{H}^*(x_k, t)$ - вектор напруженості змінного магнітного поля, яке створюється електричним контуром перетворювача в точці з координатами x_k у фізичній системі координат; $\vec{H}^o(x_k)$ - вектор напруженості постійного поля підмагнічування, який визначає структуру матриці п'єзомагнітних констант і характер напружено-деформованого стану середовища в точці з координатами x_k ; EC - характеристики досліджуваного середовища в області існування змінного та постійного магнітних полів; $U_{out}(t)$ - вихідний сигнал перетворення.

До характеристик досліджуваного середовища EC відносяться: c_{ijkl}^H - компонент тензора модулів пружності, що експериментально визначаються в режимі сталості напруженості магнітного поля; ρ_0 - щільність середовища; r_{nm} - компонент тензора електричної провідності середовища; m_{pqkl} - компонент тензора магнітострикційних констант; μ_{rs}^E - компонент тензора магнітної проникності, що експериментально визначається в режимі сталості деформацій при заданому рівні напруженості поля підмагнічування [22-24].

У режимі збудження ЕМАТ за рахунок дії електромагнітного поля формує вихрові струми у досліджуваному середовищі та реалізує перетворення електромагнітних сигналів на пружні коливання феромагнітної гірської породи. У певній точці феромагнетику з координатами x_k формується постійне магнітне поле з напруженістю $\vec{H}^o(x_k)$ та змінне (внаслідок впливу електромагнітного імпульсу певної амплітуди, тривалості та частоти) з напруженістю $\vec{H}^*(x_k, t)$ у момент часу t . Романюк М.І. (2015), Сучков Г. М. та інш. (2012)

довели, що в сфері існування магнітних полів $\vec{H}^o(x_k)$ та $\vec{H}^*(x_k, t)$ у феромагнетику формуються деформації. Енергія у зоні формування деформацій передається далі пружними хвилями. Параметри вторинного магнітного поля, амплітуда і частота пружних акустичних коливань, що склалися, залежить від вмісту і структури розподілу феромагнітного компонента в гірській породі, фізико-механічних характеристик і стану гірського масиву.

Таким чином, ЕМАТ формує вихрострумний сигнал та пружні коливання безпосередньо в зоні вимірювання характеристик феромагнітних порід гірського масиву. Оскільки при цьому відсутні будь-які проміжні елементи передачі зондуючого сигналу в середовище, то і відсутні похибки процедури вимірювань його характеристик, обумовлені цими факторами.

Результати та обговорення. Для моделювання процесів електромагнітного вихрострумного перетворення у залізовмісній гірській породі використані блоки фізичного моделювання розширення Simscape® для Simulink®/MATLAB®. Блоки в бібліотеці Simscape фактично представляють фізичні компоненти, отже, складні багатодоменні моделі можна побудувати без необхідності виводити математичні рівняння на основі фізичних принципів. На рис. 4 наведена Simscape модель відтворення вихрових струмів у гірській породі за допомогою електромагнітного імпульсу.

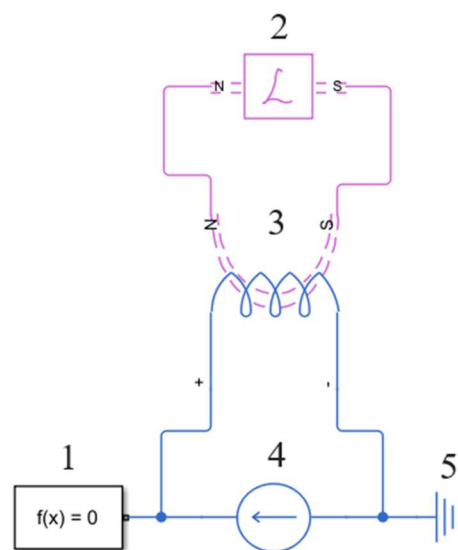


Рис. 4. Схема моделі відтворення вихрових струмів у гірській породі за допомогою електромагнітного імпульсу

У наведеній моделі використані наступні блоки Simscape® для Simulink®/MATLAB®: 1 - блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 2 – блок Eddy Current із бібліотеки Simscape / Electrical / Passive; 3 - блок Electromagnetic Converter із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 4 - блок Current Source із бібліотеки Simscape / Electrical / Sources; 5 - блок Electrical Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements.

Блок Solver Configuration (конфігурації розв'язувача) визначає параметри розв'язувача, які потрібні моделі перед початком моделювання. Блок (Electrical Reference) являє собою електричне заземлення.

Блок Current Source - джерело струму з додатковими компонентами постійного струму, змінного струму та шуму). Задає гармонічний струм живлення індуктора (амплітуду та частоту). Використовується для збудження магнітного поля у котушці. Струм, що протікає через джерело від – до + виводу, визначається за формулою

$$i = i_{DC} + i_{AC} \sin(2\pi f t + \phi) + i_N, \quad (12)$$

де i_{DC} – це стаціонарний компонент постійного струму; i_{AC} – амплітуда змінної складової струму; f – частота змінної складової; ϕ – фазовий зсув змінної складової; i_N – струм шуму.

Блок Current Source генерує гауссовий шум, використовуючи джерело випадкових чисел PS у бібліотеці Simscape™ Foundation. Шумова складова визначається за формулою

$$i_N = \sqrt{\frac{P_i N(0,1)}{2 \sqrt{h}}}, \quad (13)$$

де P_i - спектральна щільність потужності одностороннього шуму для навантаження 1 Ом, в $A^2/Гц$; N - гаусове випадкове число з нульовим середнім значенням та стандартним відхиленням, що дорівнює одиниці; h – інтервал дискретизації.

Блок Electromagnetic Converter забезпечує загальний інтерфейс між електричною та магнітною областями моделі. Блок базується на наступних рівняннях

$$MMF = N \cdot I, \quad (14)$$

$$V = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad (15)$$

де MMF - магніторушійна сила на магнітних портах; Φ - потік через магнітні порти; I - струм через електричні порти; V - напруга на електричних портах; N - кількість витків електричної обмотки; t - час моделювання.

Блок Eddy Current моделює вплив вихрових струмів, генеруючи магніторушійну силу (MMF), яка протидіє змінам магнітного потоку. Крім того, блок моделює паразитні ефекти, використовуючи послідовний опір магнітного потоку та паралельну проникність розсіювання, а також теплові ефекти, використовуючи додатковий тепловий порт H .

Еквівалентна магнітна схема блоку Eddy Current, включаючи шлях вихрових струмів та паралельний шлях розсіювання, наведено на рис. 5 у Simscape® для Simulink®/MATLAB® та Eddy Current.

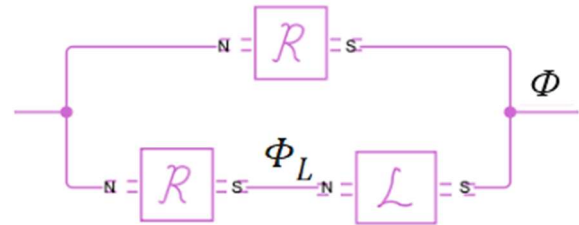


Рис. 5. Еквівалентна магнітна схема блоку Eddy Current: Φ – загальний потік на клеммах; Φ_L – потік через петлю вихрових струмів [25]

Блок Eddy Current обчислює MMF терміналу $\mathcal{F}$ та потік Φ як

$$\mathcal{F} = G_{eddy} \frac{d\Phi_L}{dt} + \mathcal{R}\Phi_L, \quad (16)$$

$$\Phi = \mathcal{F}\mathcal{P} + \Phi_L, \quad (17)$$

де G_{eddy} – провідність петлі вихрових струмів; $\mathcal{R}$ - паразитний послідовний опір шляху вихрових струмів; $\mathcal{P}$ - паралельна проникність.

Оскільки паразитний послідовний опір та паралельна проникність не мають втрат, загальна розсіювана потужність на блоці становить

$$P_{diss} = G_{eddy} \left(\frac{d\Phi_L}{dt} \right)^2. \quad (18)$$

Наведений підхід використаний для моделювання вихрострумовевого перетворення електромагнітного імпульсу у залізовмісній гірській породі. Схема моделі із застосуванням блоків фізичного моделювання розширення

Simscape® для Simulink® /MATLAB® наведено на рис. 6.

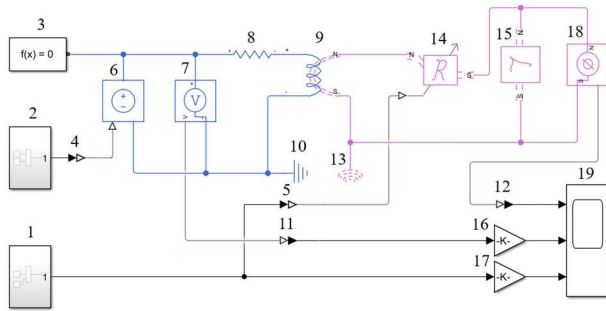


Рис. 6. Схема моделі вихрострумowego перетворення електромагнітного імпульсу у залізовмісній гірській породі

У наведеній моделі використані наступні блоки Simscape® для Simulink®/MATLAB®: 1 – блок Subsystem 1; 2 – блок Subsystem 2; 3 - блок Solver Configuration із бібліотеки Simscape / Utilities; 4,5 – блоки Simulink-PS Converter із бібліотеки Simscape / Utilities; 6 – блок Controlled Voltage Source із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Sources; 7 – блок Voltage Sensor із бібліотеки Simscape / Electrical / Sensors & Transducers; 8 – блок Resistor із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 9 - блок Electromagnetic Converter із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 10 - блок Electrical Reference із бібліотеки Simscape / Foundation Library / Electrical / Electrical Elements; 11,12 - блоки PS-Simulink Converter; 13 – блок Magnetic Reference із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 14 – блок Variable Reluctance із бібліотеки Simscape / Magnetic Elements; 15 – блок Eddy Current із бібліотеки Simscape / Electrical / Passive; 16,17 – блоки Gain із бібліотеки Simulink / Math Operations; 18 – блок Flux Sensor із бібліотеки Simscape / Magnetic Sensors; 19 - блок Scope із бібліотеки Simulink / Sinks.

Блок Subsystem 1 формує сигнал із змінними параметрами, який симулює динамічні зміни характеристик гірської породи із стохастичною складовою.

Блок Subsystem 2 формує зонduючий періодичний імпульсний синусоїдальний сигнал заданої амплітуди та частоти.

Блок Controlled Voltage Source являє собою ідеальне джерело напруги, достатньо потужне для підтримки заданої напруги на своїх клеммах незалежно від струму, що протікає через джерело. Вихідна напруга V

$$V = V_S, \quad (19)$$

де V_S - числове значення, що відображається на фізичному сигнальному порту.

Блок Voltage Sensor являє собою ідеальний датчик напруги, тобто пристрій, який перетворює напругу, виміряну між двома точками електричного кола, у фізичний сигнал, пропорційний напрузі.

Блок резистора моделює лінійний резистор, що описується наступним рівнянням

$$V = I \cdot R, \quad (20)$$

де V – напруга; I – струм; R – опір.

Блок Variable Reluctance моделює змінний магнітний опір, тобто компонент, який протистоїть магнітному потоку. Відношення магніторушійної сили на компоненті до результуючого потоку, який протікає через компонент, є постійним, а значення співвідношення визначається як опір. Опір залежить від геометрії ділянки, що моделюється. Блок базується на наступних рівняннях

$$MMF = \Phi \cdot \mathfrak{R}, \quad (21)$$

$$\mathfrak{R} = \frac{g}{\mu_0 \mu_r A}, \quad (22)$$

де MMF - магніторушійна сила на компоненті; Φ - потік через компонент; $\mathfrak{R}$ - опір; g - товщина ділянки, що моделюється; μ_0 - константа проникності; μ_r - відносна проникність матеріалу; A - площа поперечного перерізу секції, що моделюється.

Блок Flux Sensor являє собою ідеальний датчик потоку, тобто пристрій, який перетворює потік, виміряний у будь-якій магнітній гілці, на фізичний сигнал, пропорційний потоку.

Блок Gain множить вхідне значення на константу (коефіцієнт посилення). Блок Scope відображають сигнали у часовій області. Блок Simulink-PS Converter перетворює вхідний сигнал Simulink® на фізичний сигнал. Блок PS-Simulink Converter виконує зворотнє перетворення.

На рис. 7 наведено результати моделювання вихрострумowego перетворення електромагнітного імпульсу у залізовмісній гірській породі.

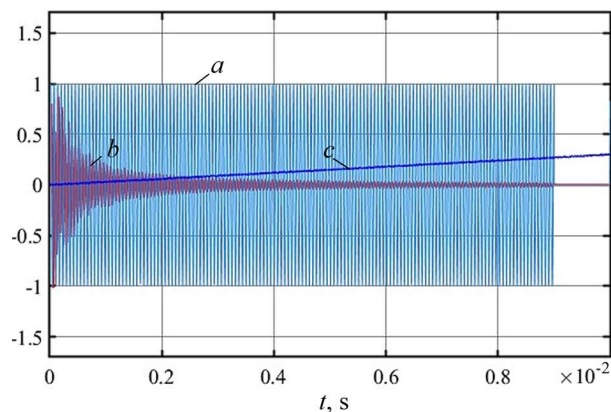


Рис. 7. Результати моделювання вихрострумового перетворення електромагнітного імпульсу у залізистій гірській породі: a – зонduючий електромагнітний сигнал, В; b – сигнал, сформований у досліджуваному середовищі, $\times 10^{-4}$ В; c – сигнал, що моделює змінний магнітний опір досліджуваного середовища, В

Зонduючий електромагнітний сигнал має періодичний імпульсний синусоїдальний характер. На рис. 4 наведено вигляд одного імпульсу (a) з частотою заповнення 60 кГц. Магнітний опір блоку Variable Reluctance збільшується на 30%, починаючи з початкового значення, за допомогою керуючого сигналу (c) із стохастичною складовою, що формується блоком Subsystem 1. Сигнал (c) відтворює змінні характеристики (магнітний опір із врахуванням вихрових струмів) досліджуваного середовища.

У табл. 1 наведено виміряні параметри сигналу b при варіаціях характеристик досліджуваного середовища, які імітувалися ухилом зміни (slope) сигналу c (рис. 4). При цьому параметри зонduючого електромагнітного сигналу не змінювались.

Таблиця 1

Параметри сигналу, сформованого у досліджуваному середовищі, при зміні його характеристик

Параметр	A_{max}	A_{min}	Peak to peak	Mean	RMS
$S = 0.1$	8.56e-5	-10.81e-5	1.94e-4	4.142e-8	1.757e-5
$S = 0.3$	8.74e-5	-10.16e-5	1.89e-4	2.431e-8	1.027e-5
$S = 0.5$	8.49e-5	-9.149e-5	1.76e-4	1.913e-8	0.849e-5

У табл. 1 прийнято наступні позначення: S (slope) – ухил зміни сигналу c впродовж зонduючого імпульсу відносно первинного значення; A_{max} – максимальне позитивне значення амплітуди; A_{min} – максимальне негативне значення амплітуди; Peak to peak – амплітуда сигналу від максимально позитивного до максимально негативного значення; Mean –

середнє значення амплітуди; RMS – середньоквадратичне значення амплітуди.

Таким чином, варіації характеристик досліджуваного середовища (його магнітних властивостей) призводять до адекватної зміни параметрів вимірюваного сигналу. Найбільш прийнятним для подальшого практичного застосування визначено середньоквадратичне значення амплітуди зонduючого електромагнітного імпульсу, сформованого у залізистій гірській породі.

Висновки. Наведені результати моделювання доводять, що параметри вихрострумового перетворення зонduючого електромагнітного імпульсу у феромагнітному середовищі, являють собою його важливі характеристичні ознаки. Середньоквадратичні значення амплітуди зонduючого електромагнітного імпульсу у залізистій гірській породі та його спектральні характеристики використані для розпізнавання мінералогічних різновидів залізної руди досліджуваного родовища в процесі автоматизованого буріння свердловин відповідно до методу, наведеного у роботі [13]. Застосування зазначених результатів вихрострумового перетворення додатково до ультразвукових вимірювань дозволило підвищити якість розпізнавання до 93-94,5 %.

Література

- Rodriguez-Sotelo J.C., Quintero J.D., and Herrera-Ruiz G. Magnetic core loss modeling in electrical machines: A comprehensive review. *Micromachines*. 2022, vol.13(3). 418. <https://doi.org/10.3390/mi13030418>.
- Harms J. and Kern T. A. Theory and Modeling of Eddy Current Type Inductive Conductivity Sensors. *Engineering Proceedings*. 2021, vol. 6(1), pp. 37. <https://doi.org/10.3390/13S2021Dresden-10103>
- Mörée R. *Modelling of iron losses in electric al machines: State-of-the-art and future trends*. Doctoral Thesis, Uppsala University. 2024.
- Meng B., Zhuang Z., Ma J. and Zhao S. Study on the effect of pulsed eddy current lift-off characteristics for feeding metallic foreign objects detection in coal mine crushers. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, 23775. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08185-x>.
- Bishop C.M., & Bishop H. *Deep Learning: Foundations and Concepts*. Springer Nature. 2023, 656 p. ISBN 978-3-031-45468-4 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-3-031-45468-4>.

6. Shukla K., Di Leoni P.C., Blackshire J., Sparkman D., and Karniadakis G.E. Physics-informed neural network for ultrasound nondestructive quantification of surface breaking cracks. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2020, vol. 39, pp.1-20. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.03596>.
7. Hellier C. *Handbook of Nondestructive Evaluation*, 3E. Third edition. New York, N.Y.: McGraw-Hill Education. 2020. ISBN-13 978-1260441437.
8. Thon A., Painchaud-April G., Le Duff A., and Bélanger P. Development of a linear array electromagnetic acoustic transducer for shear horizontal guided wave inspection. *NDT & E International*. 2023, vol. 136, 102807. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102807>.
9. Wang Z., Wang S., Wang Q., Zhao W. and Huang S. Development of a Helical Lamb Wave Electromagnetic Acoustic Transducer for Pipeline Inspection. *In IEEE Sensors Journal*. 2020, vol. 20(17), pp. 9715-9723, doi: 10.1109/JSEN.2020.2990795.
10. Bao L., Li, Z., Dixon, S., Yang Yu, Y., and Guofu Zhai G. Development of a magnetostrictive Fe₃O₄-film electromagnetic acoustic transducer. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2023, vol. 361, 16, 114593. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114593>
11. Morkun V., Morkun N., Hryshchenko S., Gaponenko I., Gaponenko A., and Bobrov Ye. Modelling of an electromagnetic acoustic transducer. *Mining Journal of Kryvyi Rih National University*. 2023. vol. 57(1), pp.88-95.
12. Morkun V., Morkun N., Gaponenko A. and Bobrov Ye. Methods of ultrasonic wave generation in the practice of non-destructive measurements. *Journal of Kryvyi Rih National University*. 2023, vol. 21(1), pp. 54-62. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-54-62>.
13. Morkun V., Morkun N., Fischerauer G., Tron V., Haponenko A., and Bobrov Y. Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*. 2024. vol. 18(3), pp. 1-8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.
14. Munir N., Park J., Kim H.-J., Song S.-J., and Kang S.-S. Performance enhancement of convolutional neural network for ultrasonic flaw classification by adopting autoencoder. *Ndt & E International*. 2020, vol. 111, article number 102218. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102218>.
15. Niyirora R., Masengesho W. Ji, E., Munyaneza J., Niyonyungu F., and Nyirandayisabye R. Intelligent damage diagnosis in bridges using vibration-based monitoring approaches and machine learning: a systematic review. *Results in Engineering*. 2022, 16, article number 100761. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100761>.
16. Ghafoor I., Peter W.T., Munir W.T., and Trappey A.J. Non-contact detection of railhead defects and their classification by using convolutional neural network. *Optik. (Stuttg)*. 2022, vol. 253, article number 168607. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168607>.
17. Sun F., Fan M., Cao B., Ye B., Lu G., and Li W. Cross-Correlation Inspired Residual Network for Pulsed Eddy Current Imaging and Detecting of Subsurface Defects. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2023, vol. 70(12), pp.12860 - 12871, DOI: 10.1109/TIE.2023.3239862.
18. Stawicki O., Ahlbrink R., and Schröer K. *Shallow internal corrosion sensor technology for heavy pipe wall inspection*. 2009. URL: <https://www.researchgate.net/publication/23767050>.
19. Sophian A., Tian G. and Fan M. Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineerin*. 2017, 30, pp. 500–514. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0122-4>.
20. Xie Y., Rodriguez S., Zhang W., Liu Z. and Yin W. Simulation of an Electromagnetic Acoustic Transducer Array by Using Analytical Method and FDTD. *Journal of Sensors*. 2016, vol. 5451821, 10. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5451821>.
21. Dodd C. V. and Deeds W. E. Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems, *Journal of Applied Physics*. 1968, vol. 39(6), pp. 2829–2838. <https://doi.org/10.1063/1.1656680>, 2-s2.0-36849096720.
22. Петрищев О.М., Сучков Г.М., Плеснецов С.Ю. *Теорія і практика електромагнітно-акустичного контролю*. Частина 1. Теоретичні основи розрахунку і проектування електроакустичних перетворювачів електромагнітного типу: монографія: Вид. центр НТУ «ХПІ». 2019, 555 с.
23. Романюк М.І. *Теоретичні основи розрахунку ультразвукових трактів пристроїв контролю поверхні металопрокату*. Київ. 2015.
24. Сучков Г. М., Хащина С. В., Петрищев О. Н. *Розвиток концепцій створення ультразвукових перетворювачів електромагнітного типу. Режим збудження*. Частина 1. Технічна діагностика та неруйнівний контроль., №1. № 1. (с. 23-28). Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. 2012.
25. Eddy Current. URL: <https://se.mathworks.com/help/sps/ref/eddycurrent.html>.
26. Simscape Block Libraries. URL: <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.

References

- Rodriguez-Sotelo J.C., Quintero J.D., and Herrera-Ruiz G. Magnetic core loss modeling in electrical machines: A comprehensive review. *Micromachines*. 2022, vol.13(3). 418. <https://doi.org/10.3390/mi13030418>.
- Harms J. and Kern T. A. Theory and Modeling of Eddy Current Type Inductive Conductivity Sensors. *Engineering Proceedings*. 2021, vol. 6(1), pp. 37. <https://doi.org/10.3390/I3S2021Dresden-10103>
- Mörée R. *Modelling of iron losses in electric al machines: State-of-the-art and future trends*. Doctoral Thesis, Uppsala University. 2024.
- Meng B., Zhuang Z., Ma J. and Zhao S. Study on the effect of pulsed eddy current lift-off characteristics for feeding metallic foreign objects detection in coal mine crushers. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, 23775. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08185-x>.
- Bishop C.M., & Bishop H. *Deep Learning: Foundations and Concepts*. Springer Nature. 2023, 656 p. ISBN 978-3-031-45468-4 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-3-031-45468-4>.
- Shukla K., Di Leoni P.C., Blackshire J., Sparkman D., and Karniadakis G.E. Physics-informed neural network for ultrasound nondestructive quantification of surface breaking cracks. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2020, vol. 39, pp.1-20. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.03596>.
- Hellier C. *Handbook of Nondestructive Evaluation*, 3E. Third edition. New York, N.Y.: McGraw-Hill Education. 2020. ISBN-13 978-1260441437.
- Thon A., Painchaud-April G., Le Duff A., and Bélanger P. Development of a linear array electromagnetic acoustic transducer for shear horizontal guided wave inspection. *NDT & E International*. 2023, vol. 136, 102807. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102807>.
- Wang Z., Wang S., Wang Q., Zhao W. and Huang S. Development of a Helical Lamb Wave Electromagnetic Acoustic Transducer for Pipeline Inspection. In *IEEE Sensors Journal*. 2020, vol. 20(17), pp. 9715-9723, doi: 10.1109/JSEN.2020.2990795.
- Bao L., Li, Z., Dixon, S., Yang Yu, Y., and Guofu Zhai G. Development of a magnetostrictive Fe₃O₄-film electromagnetic acoustic transducer. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2023, vol. 361, 16, 114593. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114593>
- Morkun V., Morkun N., Hryshchenko S., Gaponenko I., Gaponenko A., and Bobrov Ye. Modelling of an electromagnetic acoustic transducer. *Mining Journal of Kryvyi Rih National University*. 2023. vol. 57(1), pp.88-95.
- Morkun V., Morkun N., Gaponenko A. and Bobrov Ye. Methods of ultrasonic wave generation in the practice of non-destructive measurements. *Journal of Kryvyi Rih National University*. 2023, vol. 21(1), pp. 54-62. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2023-1-56-54-62>.
- Morkun V., Morkun N., Fischerauer G., Tron V., Haponenko A., and Bobrov Y. Identification of mineralogical ore varieties using ultrasonic measurement results. *Mining of Mineral Deposits*. 2024. vol. 18(3), pp. 1-8. <https://doi.org/10.33271/mining18.03.001>.
- Munir N., Park J., Kim H.-J., Song S.-J., and Kang S.-S. Performance enhancement of convolutional neural network for ultrasonic flaw classification by adopting autoencoder. *Ndt & E International*. 2020, vol. 111, article number 102218. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102218>.
- Niyirora R., Masengesho W. Ji, E., Munyaneza J., Niyonyungu F., and Nyirandayisabye R. Intelligent damage diagnosis in bridges using vibration-based monitoring approaches and machine learning: a systematic review. *Results in Engineering*. 2022, 16, article number 100761. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100761>.
- Ghafoor I., Peter W.T., Munir W.T., and Trappey A.J. Non-contact detection of railhead defects and their classification by using convolutional neural network. *Optik. (Stuttg)*. 2022, vol. 253, article number 168607. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168607>.
- Sun F., Fan M., Cao B., Ye B., Lu G., and Li W. Cross-Correlation Inspired Residual Network for Pulsed Eddy Current Imaging and Detecting of Subsurface Defects. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2023, vol. 70(12), pp.12860 - 12871, DOI: 10.1109/TIE.2023.3239862.
- Stawicki O., Ahlbrink R., and Schröer K. *Shallow internal corrosion sensor technology for heavy pipe wall inspection*. 2009. URL: <https://www.researchgate.net/publication/23767050>.
- Sophian A., Tian G. and Fan M. Pulsed Eddy Current Non-destructive Testing and Evaluation: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineerin*. 2017, 30, pp. 500–514. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0122-4>.
- Xie Y., Rodriguez S., Zhang W., Liu Z. and Yin W. Simulation of an Electromagnetic Acoustic Transducer Array by Using Analytical Method and FDTD. *Journal of Sensors*. 2016, vol. 5451821, 10. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5451821>.
- Dodd C. V. and Deeds W. E. Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems, *Journal of Applied Physics*. 1968, vol. 39(6), pp. 2829–2838. <https://doi.org/10.1063/1.1656680>, 2-s2.0-36849096720.

22. Petryshchev O.M., Suchkov H.M., Plesnetsov S.Iu. Teoriia i praktyka elektromahnitno-akustychnoho kontroliu. Chastyna 1. Teoretychni osnovy rozrakhunku i proektuvannia elektroakustychnykh peretvoriuvachiv elektromahnitnoho typu: monohrafiia: Vyd. tsentr NTU «KhPI». 2019, 555 c.
23. Romaniuk M.I. Teoretychni osnovy rozrakhunku ultrazvukovykh traktiv prystroiv kontroliu poverkhni metaloprokatu. Kyiv. 2015.
24. Suchkov H. M., Khashchyna S. V., Petryshchev O. N. Rozvytok kontseptsii stvorennia ultrazvukovykh peretvoriuvachiv elektromahnitnoho typu. Rezhym zbudzhennia. Chastyna 1. Tekhnichna diahnostyka ta neruiniivnyi kontrol., №1. № 1. (с. 23-28). Instytut elektrozvariuvannia im. Ye.O. Patona NAN Ukrainy. 2012.
25. Eddy Current. URL: <https://se.mathworks.com/help/sps/ref/eddycurrent.html>.
26. Simscape Block Libraries. URL: <https://se.mathworks.com/help/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html>.

Morkun N.V., Hryshchenko S.M., Matsui A. M., Oliinyk T.A. Recognition of mineralogical varieties of iron ore using non-contact non-destructive measurement methods

Eddy current and ultrasonic measurement methods combine the possibility of their simultaneous effective application through electromagnetic conversion of a single probing signal in the process of researching the physical, mechanical, chemical, and mineralogical characteristics of ore materials. The determination and justification of the characteristic features of this conversion of a pulsed electromagnetic signal in a ferromagnetic medium is a key task for recognizing the mineralogical varieties of iron ore in the studied deposit. To solve this problem, an analysis of international experience in the field of non-contact non-destructive testing of material characteristics was performed, using computer modeling and intelligent methods of analysis and classification of measurement results. Based on the research results, it is proposed to use a combined electromagnetic converter for recognizing mineralogical varieties of iron ore by means of non-contact non-destructive measurements. The combined transducer uses an electromagnetic field to generate eddy currents in the environment under study and converts electromagnetic signals into elastic vibrations of ferromagnetic rock. The parameters of the secondary magnetic field formed by eddy currents, the amplitude and frequency of elastic acoustic vibrations depend on

the content and distribution structure of the ferromagnetic component in the rock, the physical and mechanical characteristics and the state of the rock mass. The modeled effect of eddy currents on the results of conversion by generating a magnetomotive force that counteracts changes in magnetic flux. In this case, parasitic effects are taken into account using elements that simulate the series resistance of magnetic flux and the parallel permeability of its scattering. The formed probing electromagnetic signal has a periodic pulsed sinusoidal character. A special controlled signal simulates the variable characteristics (magnetic resistance taking into account eddy currents) of the environment under study. Thus, the electromagnetic transducer generates an eddy current signal and elastic vibrations directly in the area where the characteristics of ferromagnetic rocks of the mountain massif are measured. Since there are no intermediate elements for transmitting the probing signal into the medium, there are no measurement errors in its characteristics caused by these factors. The determined parameters of the probing electromagnetic pulse and its spectral characteristics are used to recognize the mineralogical varieties of iron ore in the studied deposit. The application of the results of eddy current conversion in addition to ultrasonic measurements made it possible to increase the recognition quality to 93-94.5%.

Keywords: ore; varieties; electromagnetic conversion; modeling; automation; drilling.

Моркун Наталя Володимирівна – доктор технічних наук, професор, професор Львівського національного університету імені Івана Франка (Львів), nmorkun@gmail.com.

Грищенко Світлана Миколаївна – кандидат педагогічних наук, старший дослідник Державний податковий університет (Ірпінь), smgrischenko@gmail.com

Мацуй Анатолій Миколайович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет (Кропивницький), matsuiam@kntu.kr.ua

Олійник Тетяна Анатоліївна – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри збагачення корисних копалин, Криворізький національний університет (Кривий Ріг), zkkh@knu.edu.ua.

Стаття подана 11.12.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-92-96>

УДК 66.012

ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ НАГРІВАННЯ РІДИНИ

Карпюк Л. В., Давіденко Н. О., Ганжа С. А.

AUTOMATION FEATURES OF THERMAL PROCESSES FOR HEATING LIQUIDS

Karpiuk L. V., Davidenko N. O., Ganzha S. A.

В даній статті розглянуто принципи процесу управління теплом на прикладі кожухотрубного теплообмінника з поверхнею керування, до якого подається теплоносієм та нагрівальний продукт. Показником ефективності процесу є температура продукту на виході з теплообмінника, а метою керування є підтримка цієї температури на певному рівні. Автоматизація виробничих процесів – основний напрямок, за яким нині просувається виробництво в усьому світі. Усе, що раніше виконувалося самою людиною, її функції, не тільки фізичні, а й інтелектуальні, поступово переходять до техніки, яка сама виконує технологічні цикли і здійснює контроль над ними. Завдяки автоматизації, технологія теплообміну зробила крок далеко вперед. Висока якість регулювання, забезпечення безпеки протікання реакцій, швидкість здійснення процесів і багато іншого дають змогу забезпечувати технічні засоби автоматизації. Температура є показником термодинамічного стану системи і використовується як вихідна координата під час регулювання теплових процесів. Динамічні характеристики об'єктів у системах регулювання температури залежать від фізико-хімічних параметрів процесу і конструкції апарата. Тому загальні рекомендації щодо вибору АСР температури сформулювати неможливо, і потрібен аналіз кожного конкретного процесу. До загальних особливостей АСР температури можна віднести значну інерційність теплових процесів і промислових датчиків температури. Теплові процеси відіграють значну роль у хімічній технології. Хімічні реакції речовин, а також їх фізичні перетворення, як правило, супроводжуються тепловими явищами. Теплові ефекти часто складають основу технологічних процесів. Нагрівання здійснюють за допомогою різних нагрівальних теплоносіїв (основні з яких водяна пара, гаряча вода, топкові гази і нагріте повітря, висококиплячі органічні речовини

рідини), а також електричного струму. Вибір нагрівача залежить в першу чергу від необхідної температури нагріву і можливості її регулювання. Крім того, теплоносієм повинен забезпечити досить високу інтенсивність теплообміну при невеликих його витратах, мати малу в'язкість, але високу щільність, теплоємність і теплоту пароутворення. Бажано також, щоб теплоносієм був негорючим, нетоксичним, термічно стійким, не мав руйнівного впливу на матеріал апарату і водночас був доступною і дешевою речовиною.

Ключові слова: теплообмінник, автоматизація, температура, тиск, теплоносієм, нагрівальний продукт, керування, регулювання.

Вступ. Передачу тепла від гарячих теплоносіїв до більш холодних здійснюють у теплообмінниках. У зв'язку з цим, питання автоматизації теплообмінників, пов'язані з передачею тепла, відіграють істотну роль.

Теплообмінні апарати класифікуються таким чином: за видом теплообмінної поверхні; за фізичним процесом, що відбувається з основною технологічною речовиною; за характером роботи в часі та іншими ознаками.

Поверхневі теплообмінники досить широко використовуються в хімічній технології, оскільки теплоносії в таких апаратах розділені теплопередаючою поверхнею: в трубчастих теплообмінниках – стінки трубок, в пластинчастих теплообмінниках – плоскі або рифлені листи. Поширеною конструкцією теплообмінної апаратури трубчастого типу є кожухотрубний теплообмінник. Кожухотрубні теплообмінники поділяють на теплообмінники з

незмінним агрегатним станом речовин, а також теплообмінники зі змінним агрегатним станом речовин.

Особливістю теплообмінників зі змінним агрегатним станом речовин, що розглядаються як об'єкти регулювання, є рівність температур рідкої та парової фаз при постійному тиску та відсутності переохолодження конденсату, що утворюється (перегріву пари, що утворюється). Оскільки температура рідкої та парової фаз однакова, вона не може слугувати показником процесу випаровування або конденсації. Тоді в якості основного показника процесу теплообміну вибирають рівень рідкої фази.

У кожухотрубних парорідинних теплообмінниках, призначених для нагрівання рідини до заданої температури за рахунок теплоти конденсації нагрівальної пари, основним завданням регулювання є стабілізація температури рідини на виході з теплообмінника.

Тепер з урахуванням виявлених основних збурюючих і керуючих впливів можна запропонувати кілька варіантів систем регулювання температури рідини на виході з промислових кожухотрубних парорідинних теплообмінників.

Перший варіант. Для регулювання вихідної температури рідини без статичної помилки можна застосувати одноконтурну замкнуту САР з використанням ПІ-регулятора або ПІД-регулятора, що змінює витрату нагрівальної пари. Недоліки такого регулювання: при сильних збурюючих впливах по каналах витрати або температури рідини на вході в теплообмінник якість перехідного процесу виявляється незадовільною.

Другий варіант. Якщо мають місце збурюючі впливи по каналах витрати або температурі рідини на вході, то обмежуються їх статичною компенсацією. Реалізувати такий підхід можливо застосуванням каскадної САР співвідношення витрат пари і рідини з корекцією по третьому параметру – температурі рідини на виході теплообмінника.

Третій варіант. При сильних збурюючих впливах по каналах зміни тиску або температури нагрівальної пари можливо застосувати каскадну систему регулювання температури (або тиску) в міжтрубному просторі теплообмінника. Температура (або тиск) в міжтрубному просторі теплообмінника – проміжна координата, яка значно швидше реагує на зазначені збурюючі впливи, ніж температура рідини на виході теплообмінника.

Четвертий варіант. Щоб забезпечити високу якість регулювання температури, бажано мати додатковий керуючий вплив. Для цього рідину, що надходить на нагрівання, перед теплообмінником ділять на два потоки. Частину рідини направляють у теплообмінник і нагрівають до температури, трохи вищої за задану. Інша частина рідини мінає теплообмінник, залишаючись холодною. За теплообмінником нагрітий і холодний потоки змішуються для отримання рідини заданої температури. Таким чином, реалізується схема з байпасуванням. У цьому випадку регулятор температури стабілізує температуру після теплообмінника [4].

Викладення основного матеріалу. Розглянемо принципи процесу управління теплом на прикладі кожухотрубного теплообмінника з поверхнею керування (рис. 1), до якого подається теплоносієм та нагрівальний продукт. Показником ефективності процесу є температура продукту на виході з теплообмінника, а метою керування є підтримка цієї температури на певному рівні. Залежність температури від параметрів процесу можна знайти з рівняння теплового балансу:

$$G_p \cdot c_p \cdot (t_p'' - t_p') = G_c \cdot c_c \cdot (t_c'' - t_c'),$$

де: G_p, G_c – витрата продукту та гарячого теплоносія;

c_p, c_c – питома теплоємність продукту та гарячого теплоносія;

t_p', t_c' – температура продукту та гарячого теплоносія на вході в теплообмінник; □

t_p'', t_c'' – температура продукту та гарячого теплоносія на виході з теплообмінника.

Розв'язуючи рівняння теплового балансу для t_p'' , отримуємо:

$$t_p'' = (G_c \cdot c_c / G_p \cdot c_p) \cdot (t_c' - t_c'') + t_p'$$

Витрати теплоносія G_c легко стабілізуються та можуть бути використані для впровадження ефективних керуючих втручань. Витрати продукту G_p визначаються іншими технологічними процесами, а не процесом нагрівання, тому їх неможливо стабілізувати або використовувати для впровадження керуючих втручань; зі зміною G_p у теплообмінник надходять сильні збурення.

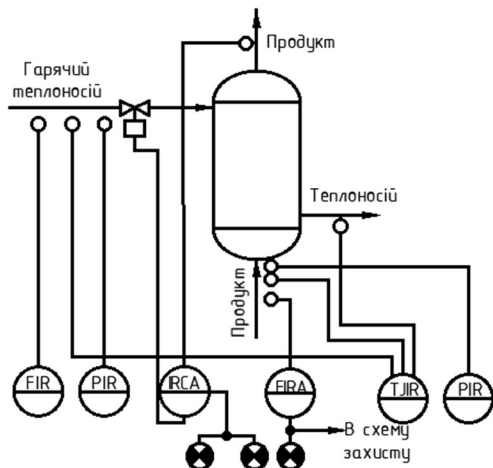


Рис. 1. Типова схема автоматизації процесу нагрівання

Температури t_p' , t_c' та питомі теплоємності c_p , c_c визначаються технологічними умовами інших процесів, тому стабілізувати їх у процесі нагрівання неможливо. Неліквідовані збурення також містять зміни температури навколишнього середовища та властивостей теплопередачі стінки внаслідок відкладення солей та корозії [1,2].

Аналізуючи об'єкт керування, можна побачити, що більшість збурень неможливо усунути. У зв'язку з цим температуру t_c'' слід прийняти за керуючу змінну та здійснювати регулюючий вплив шляхом зміни витрат G_c .

Теплообмінник як об'єкт регулювання температури має більшу затримку, тому слід приділити особливу увагу вибору місця установки датчика та закону регулювання. Щоб зменшити затримки в роботі, датчик температури слід розміщувати якомога ближче до теплообмінника. Для усунення затримки можуть бути ефективними контролери з попередньо встановленими значеннями та приводи з позиціонерами. В якості контрольованих змінних слід брати витрату теплоносія, його кінцеву і початкову температуру, тиск. Знання поточних значень цих параметрів необхідне для нормального запуску, введення в експлуатацію і роботи процесу. Також необхідно знати витрату G_c для розрахунку техніко-економічних параметрів процесу, а витрату G_p і температуру t_c'' – для оперативного управління процесом.

Температура t_c'' і витрата продукту повинні контролюватися. Оскільки різке падіння витрати G_p часто є причиною виходу з ладу теплообмінника, захисний пристрій в цьому

випадку повинен перекривати лінію гарячого теплоносія.

Всі аргументи, що стосуються процесу нагрівання, є справедливими і для процесу охолодження. Об'єктом регулювання в цьому випадку буде кожухотрубний теплообмінник, який подає охолоджуючу рідину і охолоджуваний продукт; показником ефективності є кінцева температура продукту, а метою регулювання є підтримка цієї температури на заданому рівні. Основний блок управління буде контролювати кінцеву температуру охолоджуваного продукту, регулювання буде здійснюватися шляхом зміни витрати охолоджуючої рідини [1,2,3].

Каскадне регулювання. Використання двоконтурних систем автоматичного регулювання значно покращує якість контролю температури кінцевого продукту, якщо параметр, що сильно впливає на процес теплопередачі, вибрано як допоміжну регульовану змінну. Часто в якості допоміжного параметра вибирають витрату охолоджуючої рідини (рис. 2); якщо охолоджуючою рідиною є пара зі змінним тиском, то краще вимірювати тиск охолоджуючої рідини або тиск у міжтрубному просторі.

Останній варіант слід використовувати при змінній температурі та нагріванні потоком, оскільки тиск у міжтрубному просторі набагато менший за інерційний параметр, ніж температура кінцевого продукту.

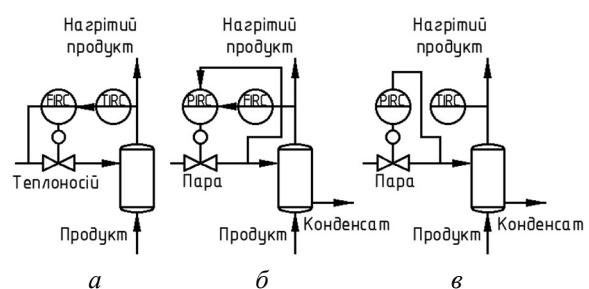


Рис. 2. Двоконтурна система регулювання процесу нагрівання з використанням допоміжних змінних показників витрати:

а – охолоджуючої рідини, б – тиску пари, в – тиску в міжтрубному просторі

Регулювання шляхом обходу продуктів. Для управління системами, в яких неможливо змінити швидкість потоку теплового конденсатора, використовується метод байпасу.

Регулюючий ефект у цьому випадку здійснюється шляхом зміни потоку байпасного продукту (рис. 3, а).

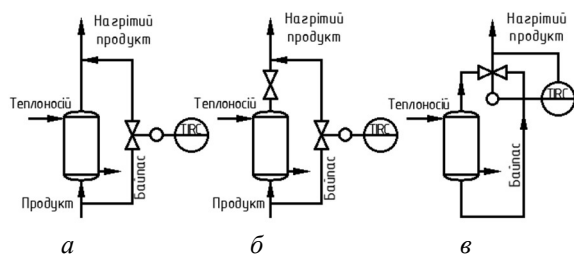


Рис. 3. Схема регулювання зміни температури потоку продукту через байпасну трубу:
а – через один клапан; б – через два клапани;
в – через триходовий клапан

Оскільки рух регулюючого органу в обвідній лінії все ще призводить до деяких змін у потоці продукту при високих вимогах до стабільності потоку, встановлюються два мембранні приводи різного типу (рис. 3, б). Аналогічний ефект досягається шляхом встановлення триходового змішувального клапана (рис. 3, в).

Метод управління покращує динамічні характеристики обходу системи, оскільки виключається цей ланцюг управління теплообмінником.

Регулювання шляхом зміни витрати конденсату гріючої пари. Якщо теплообмінник працює з частковим виливом конденсату, регулюючий вплив може здійснюватися зміною витрати конденсату, що призводить до зміни рівня конденсату в теплообміннику. У цьому випадку поверхня теплообміну розподіляється між конденсуючою парою та продуктом з одного боку, та конденсатом та продуктом – з іншого.

Інтенсивність теплообміну, а отже і температура продукту, що виходить з теплообмінника, змінюється. Ця система дозволяє підвищити ефективність теплообмінника на 6–7% за рахунок повного використання тепла пари і конденсату. Однак через великі затримки, систему можна рекомендувати тільки за відсутності раптових збурюючих впливів.

Керування процесами в теплообмінниках змішування. Найменша зміна параметрів теплоносія під час безпосереднього змішування двох або більше рідин призводить до значних і швидких змін температури кінцевого продукту, тому в управлінні теплообмінниками змішування часто використовуються пов'язані регулювання та співвідношення витрати та продукту з корекцією температури продукту [5,6].

Висновки. Для усунення небезпеки вибуху в поверхневих теплообмінниках необхідно передбачити методи і засоби, що запобігають взаємному проникненню теплоносія (якщо це може призвести до утворення вибухонебезпечного середовища). Це особливо стосується теплообмінників, в яких тиск палива-теплоносія перевищує тиск негорючого теплоносія. При зниженні рівня горючих рідин, що нагріваються в теплообміннику, та оголенні поверхні теплообміну (що може призвести до перегріву, висихання та розкладання горючих продуктів і розвитку неконтрольованих процесів) має спрацьовувати сигналізація та блокування пристрою (останнє повинно зупиняти потік нагріваючого агента).

Нині системи автоматизованого управління активно використовують на виробництві, зокрема й для здійснення теплообмінних процесів. При цьому такі процеси займають до 40% від усіх технологічних процесів у хімічній промисловості по всьому світу. Грамотне й ефективне розв'язання завдань автоматизації апаратів, що реалізують теплообмін, дає змогу убезпечити працівників, замінюючи ручну працю, при цьому здійснювати економію технічних ресурсів підприємства, а також підвищувати якість одержуваної сировини.

Література

- 1 Стенцель Й. І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв: Навч. посібник. К. : ІСДО, 1995. 360 с.
- 2 Стенцель Й. І. Автоматика та автоматизація хіміко-технологічних процесів: Навч. посібник. Луганськ: вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім В. Даля, 2004. 376 с.
- 3 Стенцель Й. І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв. Конспект лекцій (електронний варіант). 2009. 287 с.
- 4 Барало О. В., Самійленко П. Г. та ін. Автоматизація технологічних процесів і систем автоматичного керування. К. : Аграрна освіта, 2010. 557 с.
- 5 Автоматизація виробничих процесів. Кіровоград: Видавець Лисенко В. Ф., 2016. 352 с.
- 6 Ельперін І. В., Пупена О. М., Сідлецький В. М., Швед С. М. Автоматизація виробничих процесів: підручник / Вид. 2-ге, виправлене. К. : Вид. Ліра-К, 2021. 378 с.

References

1. Stentsel Y. I. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv khimichnykh vyrobnytstv: Navch. posibnyk. K. : ISDO, 1995. 360 s.
2. Stentsel Y. I. Avtomatyka ta avtomatyzatsiia khimiko-tekhnolohichnykh protsesiv: Navch. posibnyk. Luhansk: vyd-vo Skhidnoukr. nats. un-tu im V. Dalia, 2004. 376 s.
3. Stentsel Y. I. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv khimichnykh vyrobnytstv. Konspekt lektsii (elektronnyi variant). 2009. 287 s.
4. Baralo O. V., Samiilenko P. H. ta in. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv i system avtomatychnoho keruvannia. K. : Ahrarna osvita, 2010. 557 s.
5. Avtomatyzatsiia vyrobnychkh protsesiv. Kirovohrad: Vydavets Lysenko V. F., 2016. 352 s.
6. Elperin I. V., Pupena O. M., Sidletskyi V. M., Shved S. M. Avtomatyzatsiia vyrobnychkh protsesiv: pidruchnyk / Vyd. 2-he, vypravlene. K. : Vyd. Lira-K, 2021. 378 s.

Karpiuk L. V., Davidenko N. O., Ganzha S. A.
Automation features of thermal processes for heating liquids

This article discusses the principles of heat management using the example of a shell-and-tube heat exchanger with a control surface to which a heat transfer fluid and a heating product are supplied. The indicator of the process efficiency is the temperature of the product at the outlet of the heat exchanger, and the control objective is to maintain this temperature at a certain level. Automation of production processes is the main direction in which production is currently moving worldwide. Everything that was previously performed by humans, their functions, not only physical but also intellectual, are gradually being transferred to technology, which performs technological cycles and controls them. Thanks to automation, heat exchange technology has taken a big step forward. High-quality control, ensuring the safety of reactions, speed of processes, and much more are made possible by technical automation tools. Temperature is an indicator of the thermodynamic state of a system and is used as an output coordinate when controlling thermal processes. The dynamic characteristics of objects in temperature control systems depend on the physical and chemical parameters of the process and the design of the device. Therefore, it is impossible to formulate general recommendations for selecting a temperature control

system, and each specific process must be analyzed. The general characteristics of temperature control systems include the significant inertia of thermal processes and industrial temperature sensors. The dynamic characteristics of objects in temperature control systems depend on the physical and chemical parameters of the process and the design of the device. Therefore, it is impossible to formulate general recommendations for selecting a temperature control system, and each specific process must be analyzed. The general characteristics of temperature control systems include the significant inertia of thermal processes and industrial temperature sensors. Thermal processes play a significant role in chemical technology. Chemical reactions of substances, as well as their physical transformations, are usually accompanied by thermal phenomena. Thermal effects often form the basis of technological processes. Heating is carried out using various heating media (the main ones being steam, hot water, furnace gases and heated air, high-boiling organic liquids), as well as electric current. The choice of heating medium depends primarily on the required heating temperature and the possibility of regulating it. In addition, the heat transfer fluid must ensure a sufficiently high heat exchange intensity at low consumption rates, have low viscosity but high density, heat capacity, and heat of vaporization. It is also desirable that the heat transfer fluid be non-flammable, non-toxic, thermally stable, have no destructive effect on the material of the apparatus, and at the same time be an affordable and inexpensive substance.

Keywords: heat exchanger, automation, temperature, pressure, heat transfer fluid, heating product, control, regulation.

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 іноземної філології та перекладу, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, nat.davidenkoi1@gmail.com

Ганжа Світлана Анатоліївна – викладач вищої категорії, методист, Сєвєродонецький політехнічний фаховий коледж Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, gsaua@ukr.net

Стаття подана 13.12.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-97-104>

УДК 629.4.08:629.1.08:355/359

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВИКЛИКИ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ МЕХАНІЧНИХ ЧАСТИН РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

Фомін О.В., Климаш А.О., Полупан Є.В., Прохорчук М.В.

OPERATIONAL CHALLENGES IN THE INTERACTION OF MECHANICAL PARTS OF RAILWAY AND ROAD TRANSPORT ROLLING STOCK IN MARTIAL ARTS CONDITIONS

Fomin O.V., Klymash A.O., Polupan Ye.V., Prokhorchuk M.V.

У статті комплексно розглянуто експлуатаційні виклики, що виникають при взаємодії механічних частин рухомого складу залізничного та автомобільного транспорту в умовах воєнного стану, який характеризується підвищеною інтенсивністю перевезень, руйнуванням інфраструктури, дефіцитом ресурсів та нестабільністю логістичних ланцюгів. Обґрунтовано, що поєднання динамічних перевантажень, ударних і вібраційних впливів, температурних коливань, агресивних середовищ та обмеженого доступу до планового технічного обслуговування призводить до прискореного зносу вузлів тертя, передач, підшипникових опор і гальмівних систем. Встановлено, що деградація колійного та дорожнього полотна формує додаткові імпульсні навантаження на колісні пари, буксові вузли, ресорне підвішування, рами візків, елементи трансмісії та кермові механізми автомобілів, що зумовлює кумулятивний характер пошкоджень і зростання ймовірності раптових відмов. Досліджено закономірності зміни технічного стану механічних систем за умов перевищення нормативних режимів експлуатації, використання альтернативних мастильних матеріалів і замінників запасних частин, а також скорочення часу на діагностику. Показано, що традиційні регламентні підходи до технічного обслуговування є недостатньо ефективними в особливий період та потребують трансформації у гнучкі стратегії, засновані на оцінюванні фактичного технічного стану.

Визначено найбільш вразливі елементи для залізничного транспорту, зокрема буксові вузли, колісні пари, гальмівні механізми та зчіпні пристрої, а для автомобільного транспорту –

підвіску, трансмісію, двигуни та шини, що працюють у режимах перевантаження й бездоріжжя. Проаналізовано вплив дефіциту кваліфікованого персоналу та обмежень матеріально-технічного забезпечення на якість ремонтних операцій і надійність відремонтованих агрегатів. Запропоновано концептуальні підходи до підвищення живучості рухомого складу, які включають перехід до систем технічного обслуговування за станом, впровадження експрес-методів віброакустичної та термографічної діагностики, створення мобільних ремонтних бригад, уніфікацію конструктивних рішень і формування локальних резервів критичних запасних частин. Обґрунтовано доцільність використання цифрових технологій моніторингу, формування централізованої бази типових відмов і алгоритмів підтримки прийняття рішень у режимі реального часу.

Показано, що реалізація запропонованих заходів дозволяє знизити аварійність, оптимізувати витрати на відновлення, продовжити ресурс відповідальних вузлів і забезпечити безперервність транспортного забезпечення в умовах воєнних ризиків. Отримані результати формують науково-методичну основу адаптації систем технічної експлуатації транспорту до екстремальних умов та можуть бути використані при розробленні нормативних документів, модернізації існуючого парку й створенні рухомого складу нового покоління з підвищеним рівнем надійності та захищеності.

Ключові слова: рухомий склад, воєнний стан, технічна експлуатація, залізничний транспорт, автомобільний транспорт, надійність, ремонтні стратегії.

Вступ. Сучасні реалії воєнного стану висувають надзвичайні вимоги до функціонування транспортної системи України. Ефективна логістика стає критичним фактором національної безпеки та життєдіяльності держави. Взаємодія механічних частин рухомого складу залізничного та автомобільного транспорту піддається безпрецедентним навантаженням. Постійні обстріли та руйнування інфраструктури змушують транспортні засоби працювати на межі технічних можливостей. Необхідність швидкого перекидання військової техніки та гуманітарних вантажів скорочує терміни на технічне обслуговування. Зміна звичних маршрутів призводить до інтенсивного зносу ходових частин на непідготовлених ділянках шляху. Дефіцит оригінальних запчастин вимагає розробки нових підходів до ремонту механічних вузлів. Вплив динамічних ударних навантажень на механічні з'єднання значно зріс через пошкодження дорожнього покриття та колій. Виникає гостра потреба у прогнозуванні залишкового ресурсу деталей у критичних умовах. Важливо враховувати специфіку роботи мультимодальних терміналів, де відбувається перевантаження з авто на залізницю. Механічні системи зчіпних пристроїв та платформ працюють у режимі підвищеної інтенсивності. Недотримання нормативних умов експлуатації призводить до прискореної деградації матеріалів. Фактор часу стає визначальним при проведенні діагностики технічного стану. Традиційні методи оцінки зносу не завжди враховують екстремальні температурні та вібраційні впливи воєнного часу. Потреба у забезпеченні безперебійного руху вимагає впровадження мобільних систем моніторингу. Ризик аварійних ситуацій через технічні несправності зростає пропорційно навантаженню на вузли тертя. Оптимізація роботи підшипникових вузлів та редукторів стає пріоритетним завданням. Необхідно враховувати вплив засміченості та агресивних середовищ на механічні частини. Дослідження процесів втоми металу в умовах перевантаження є вкрай актуальним. Важливо розробити алгоритми швидкого відновлення працездатності механізмів у польових умовах. Економічна доцільність експлуатації зношеного парку потребує наукового обґрунтування. Безпека руху в умовах обмеженої видимості та пошкодженої сигналізації залежить від надійності гальмівних систем. Складна геометрія тимчасових переїздів та мостів

створює додаткові напруження у рамках рухомого складу. Потрібен аналіз взаємодії колісних пар з деформованими рейками. Автомобільний транспорт стикається з проблемою перевантаження, що руйнує підвіску. Синхронізація роботи різних видів транспорту вимагає уніфікації механічних параметрів. Вивчення трибологічних процесів у вузлах зчеплення дозволить уникнути раптових відмов. Наукове обґрунтування режимів експлуатації допоможе зберегти транспортний потенціал країни. Застосування нових мастильних матеріалів може частково компенсувати негативний вплив середовища. Взаємодія механічних частин при транспортуванні нестандартних військових вантажів потребує особливої уваги. Моделювання критичних станів конструкцій дозволить запобігти масштабним руйнуванням. Впровадження інноваційних методів зміцнення поверхонь деталей підвищить їх живучість. Стан транспортної галузі безпосередньо впливає на обороноздатність. Кожна технічна затримка на залізниці чи автошляху може мати стратегічні наслідки. Дослідження адаптивних можливостей механічних систем є вимогою часу. Надійність транспортних вузлів забезпечує стабільність логістичних ланцюгів. Необхідно систематизувати досвід експлуатації техніки в зонах бойових дій. Розробка рекомендацій для технічного персоналу є практичним результатом дослідження. Науковий підхід дозволить знизити витрати на екстрені ремонти. Врахування людського фактору та умов праці ремонтних бригад також є частиною проблеми. Експлуатаційні виклики вимагають гнучкості інженерних рішень. Це дослідження сприятиме швидкій інтеграції українського транспорту в європейські коридори після перемоги. Аналіз сучасних викликів закладає фундамент для модернізації галузі. Комплексний підхід до вивчення взаємодії механічних частин є ключем до успіху. Актуальність роботи підтверджується реальною потребою транспортних підприємств. Отримані дані стануть основою для нових державних стандартів експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У публікації [1] розглянуто метод безпосереднього вимірювання сил взаємодії «колесо–рейка» для оцінювання якості руху вагонів у реальних умовах експлуатації. Автори обґрунтовують інформативність силових показників як інтегральних критеріїв динамічної поведінки рухомого складу. Показано зв'язок

між рівнем динамічних навантажень та показниками плавності ходу і безпеки руху. Запропонований підхід дозволяє виявляти погіршення технічного стану ходових частин на ранніх стадіях. Практична цінність роботи полягає у можливості застосування методу для експлуатаційного моніторингу в умовах підвищених навантажень.

Стаття [2] присвячена визначенню показників безпеки вантажних вагонів із використанням мобільних діагностичних систем. Автори аналізують можливості оперативного контролю технічного стану без виведення вагонів з експлуатації. Обґрунтовано перелік параметрів, що найбільш чутливо реагують на дефекти елементів ходової частини. Показано, що мобільні системи дозволяють підвищити оперативність прийняття рішень щодо технічного обслуговування. Результати є актуальними для умов інтенсивної експлуатації та обмежених ремонтних ресурсів.

У роботі [3] досліджено критерії взаємодії пантографа з контактною мережею в експлуатаційних умовах. Автори розглядають динамічні та силові показники як основу для оцінювання стабільності струмознімання. Показано вплив швидкості руху та стану елементів системи на якість контакту. Запропоновані критерії можуть бути використані для діагностики зношування та налаштування струмоприймачів. Праця має практичне значення для забезпечення надійної роботи електрифікованих ділянок залізниць.

Публікація [4] присвячена порівняльному аналізу різних індикаторів зношування коліс вантажних вагонів. Автори оцінюють ефективність геометричних і трибологічних показників у кількісному визначенні зносу. Показано, що окремі індикатори мають різну чутливість залежно від режимів експлуатації. Результати дозволяють обґрунтовано обирати показники для систем моніторингу стану коліс. Робота сприяє підвищенню ресурсу колісних пар і зниженню експлуатаційних ризиків.

У статті [5] запропоновано метод діагностики схильності вантажних вагонів до «виляння» на основі стаціонарних шляхових систем контролю. Автори поєднують дані датчиків з алгоритмами обробки сигналів для виявлення нестійкої динаміки руху. Показано ефективність методу для раннього виявлення небезпечних режимів експлуатації. Запропонований підхід знижує ймовірність аварій, пов'язаних із динамічною нестабільністю. Практичне застосування

можливе на ділянках з інтенсивним вантажним рухом.

Робота [6] спрямована на підвищення технічних і експлуатаційних характеристик залізничного вагона шляхом конструктивних та параметричних удосконалень. Автор аналізує вплив змін конструкції на міцність, масу та динамічну поведінку вагона. Показано можливості оптимізації без погіршення показників безпеки. Отримані результати підтверджені чисельними та експериментальними дослідженнями. Стаття має прикладне значення для проєктування сучасного рухомого складу.

У публікації [7] досліджено показники динамічної взаємодії колії та вантажних вагонів з підвищеним осьовим навантаженням. Автори аналізують вплив зростання навантажень на напружено-деформований стан елементів системи «вагон–колія». Показано зростання динамічних ефектів та їхній вплив на знос і пошкодження. Запропоновано індикатори для оцінювання допустимих режимів експлуатації. Результати є важливими для обґрунтування умов експлуатації важковагового руху.

Стаття [8] має оглядово-аналітичний характер і присвячена проблемам спільної динаміки системи «поїзд–колія» у важковаговому русі. Автор узагальнює сучасні моделі та методи аналізу взаємодії рухомого складу з інфраструктурою. Особливу увагу приділено нелінійним ефектам та контактній взаємодії «колесо–рейка». Показано актуальні наукові виклики та напрями подальших досліджень. Робота формує теоретичну основу для підвищення надійності важковагових перевезень.

У публікації [9] наведено результати динамічного аналізу взаємодії залізничного транспортного засобу з колією. Автор застосовує математичні моделі для оцінювання коливальних процесів і контактних навантажень. Показано вплив параметрів колії та рухомого складу на рівень динамічних сил. Результати дозволяють прогнозувати експлуатаційні навантаження та потенційні зони пошкоджень. Праця є корисною для інженерних розрахунків і оптимізації конструктивних рішень.

Стаття [10] присвячена цифровим технологіям підтримки життєвого циклу залізничного рухомого складу. Автори аналізують роль цифрових моделей, аналітики даних та інформаційних систем у процесах експлуатації та ремонту. Показано перспективи

впровадження цифрових двійників і прогнозової діагностики. Робота підкреслює важливість інтеграції даних з різних етапів життєвого циклу. Результати мають стратегічне значення для розвитку сучасних систем управління технічним станом рухомого складу.

Проведений детальний аналіз наукової літератури та нормативної бази засвідчив, що питанням експлуатаційних викликів при взаємодії механічних частин рухомого складу в умовах воєнного стану не приділено достатньої уваги. Більшість існуючих праць фокусуються на мирному часі та стандартних режимах роботи техніки, які не враховують екстремальні навантаження. Дослідники здебільшого розглядають окремо залізничний та автомобільний транспорт, уникаючи комплексного аналізу їхньої механічної взаємодії в кризових умовах. Відсутні системні дані щодо впливу бойових пошкоджень інфраструктури на прискорений знос вузлів тертя та передач. Питання швидкої діагностики та відновлення механізмів без спеціалізованої бази залишаються малодослідженими. Наукові джерела не містять вичерпних рекомендацій щодо адаптації технічних регламентів до вимог особливого періоду. Таким чином, виявлений суттєвий науковий вакуум обумовлює необхідність проведення даного дослідження.

Мета. Метою дослідження є наукове обґрунтування методів підвищення експлуатаційної надійності та живучості механічних частин рухомого складу в умовах воєнного стану. Робота спрямована на розробку рекомендацій щодо адаптивного технічного обслуговування вузлів взаємодії залізничного та автомобільного транспорту. Кінцевою метою є забезпечення безперебійної роботи логістичних ланцюгів шляхом мінімізації ризиків раптових технічних відмов.

Завдання:

1. Визначити ключові фактори воєнного стану, що впливають на знос механічних частин.
2. Проаналізувати види механічних частин, найбільш вразливі до екстремальних умов.
3. Дослідити специфіку взаємодії механічних систем в умовах підвищеного навантаження.
4. Оцінити наслідки дефіциту запасних частин, матеріалів та кваліфікованого персоналу.
5. Розробити концептуальні підходи до адаптації систем обслуговування та ремонту, стратегії підвищення живучості.

Об'єктом дослідження є процес технічної експлуатації механічних частин рухомого складу залізничного та автомобільного транспорту в екстремальних умовах.

Предметом дослідження є закономірності зміни технічного стану, зносу та надійності вузлів взаємодії транспортних засобів під впливом факторів воєнного стану.

Виклад основного матеріалу.

Функціонування транспортної системи в умовах воєнного стану супроводжується різким зростанням інтенсивності використання рухомого складу. Постійна експлуатація техніки з перевищенням нормативних термінів та вантажопідйомності призводить до критичного зносу механічних частин. Основна проблема полягає у відсутності перевірених методик оцінки надійності вузлів при роботі на пошкоджених шляхах сполучення. Традиційні системи технічного обслуговування виявляються неефективними через неможливість дотримання графіків планових ремонтів. Взаємодія механічних компонентів залізничного та автомобільного транспорту ускладнюється деградацією матеріально-технічної бази. Виникає конфлікт між необхідністю виконання термінових перевезень та забезпеченням технічної безпеки руху. Брак специфічних запчастин змушує використовувати аналоги, вплив яких на довговічність вузлів не вивчений. Непередбачувані вібраційні режими, спричинені деформацією колій та доріг, провокують раптові втомні руйнування. Проблема ускладнюється обмеженням доступом до діагностичного обладнання в прифронтових зонах. Відсутність чітких критеріїв граничного стану деталей в екстремальних умовах створює ризики техногенного характеру. Необхідно знайти баланс між максимальною експлуатацією ресурсів та запобіганням аваріям. Пошук шляхів вирішення цих викликів є першочерговим завданням для транспортної науки та практики.

Ключові фактори впливу воєнного стану на рухомий склад. Підвищена інтенсивність експлуатації: безперервна робота, перевантаження, скорочення часів простою. Умови навколишнього середовища: коливання температур, вологість, агресивні речовини. Фізичні пошкодження: уламки, вибухові хвилі, обстріли, руйнування дорожнього/колійного полотна. Обмеження ресурсів: дефіцит палива, мастил, технічних рідин. Логістичні та інфраструктурні порушення: ускладнений

доступ до ремонтних баз, відсутність енергопостачання, зниження якості палива та мастил. Кадрові обмеження: нестача кваліфікованих фахівців, фізичне та психологічне виснаження персоналу. Масово-габаритні параметри: перевезення позагабаритних та надважких вантажів (техніки, обладнання), для яких рухомий склад не завжди оптимізований. Динамічні навантаження: різкі маневри, екстрене гальмування автомобілів для уникнення небезпек; нерівномірність руху поїздів через зруйновану інфраструктуру. Тривалість безперервної роботи: максимальне продовження робочих змін, відмова від технологічних "вікон" для ремонту, що призводить до перегріву, втоми матеріалів.

Деградація інфраструктури. Для залізниці: деформації колії, руйнування стрілочних переводів, нерівності на стиках. Це викликає динамічні удари, коливання, розгонений знос бандажів, рейок, елементів ресорного підвішування, рами візків. Для автомобільного транспорту: рух по пошкоджених, замінованих або тимчасових дорогах, поза дорогами. Призводить до інтенсивного зносу шин, руйнування підвіски, мостів, деформації несучих систем.

Найбільш вразливі механічні частини та вузли.

Залізничний транспорт. Колісні пари та буксові вузли: прискорений знос через підвищене навантаження, дефекти колії. Візки та ходові частини: Основним викликом є контактна втома металів бандажів та рейок через рух по деформованій колії. Збільшується ймовірність виникнення сколів, вдавлювань, відшарувань. Ресорне підвішування, амортизатори працюють у нештатному режимі, втрачають характеристики, що посилює динамічні навантаження на кузов та вантаж. Тягові електродвигуни та передавальні механізми: перегрів, попадання пилу та вологи, перевантаження. Постійні перевантаження та робота на граничних режимах призводять до перегріву обмоток, прискореного зношування щіток, колекторів, підшипників. У зубчастих передачах збільшується ймовірність задирок та викришування зубців. Гальмівна система: знос колодок, дисків, порушення герметичності пневматичних систем. Інтенсифікація гальмування, часто екстреного, веде до перегріву гальмівних колодок (накладок) та дисків (бандажів), їх зносу, появи тріщин від термічної втоми. Може порушуватись геометрія гальмівних систем. Підвіска та ресорне

підвішування: пошкодження через нерівності колії, руйнування мостів, динамічні навантаження. Зчіпні пристрої: знос через часті маневри, перевантаження. Навантаження на зчепні пристрої значно зростають через нерівномірність руху поїзда, різкі ривки. Збільшується знос деталей автозчепу, загроза їх руйнування.

Автомобільний транспорт. Двигун: знос через якісне погіршення палива та мастил, перегрів, недостатнє обслуговування. Пилове забруднення повітря погіршує роботу системи очищення, збільшуючи знос циліндрів, поршневих кілець. Перегрів через перевантаження. У трансмісії (коробка передач, роздавальна коробка, головні передачі) зростають навантаження на зубчасті передачі та підшипники. Трансмісія: пошкодження коробки передач, приводних валів, мостів через перевантаження та екстремальні дорожні умови. Рух по бездоріжжю викликає ударні навантаження, що призводять до деформації важелів, руйнування пружин/торсіонів, виходу з ладу амортизаторів. Прискорюється знос шарнірів рівних кутових швидкостей, сайлент-блоків. Підвіска та кермове управління: знос через руйнування дорожнього покриття, попадання в ями, навантаження. Гальмівна система: прискорений знос колодок, дисків, ризик попадання вологи. Загроза потрапляння води та бруду в гальмівні механізми, що знижує ефективність. Шини: пошкодження через уламки, порізи, підвищений знос через перевантаження. Пошкодження шин об ускладнену дорожню поверхню, бокові порізи. Перевантаження дисків призводить до перегріву та руйнування шин.

Експлуатаційні виклики взаємодії механічних частин. Кумулятивний ефект зношування: пошкодження одних вузлів призводить до додаткового навантаження на суміжні системи. Резонансні явища: несправності підвіски чи коліс призводять до вібрацій, що пошкоджують інші механічні частини. Теплові навантаження: неефективне охолодження через забруднення радіаторів, недостатність мастил. Корозія та абразивний знос: питання гігієни повітря та вологи прискорюють руйнування металів. Динамічні перевантаження: різкі гальмування, прискорення, маневри на нерівних поверхнях.

Обмеження та ризики в умовах воєнного стану. Відсутність запчастин: ускладнено постачання оригінальних та аналогових компонентів. Дефіцит мастил та технічних

рідин: використання nereкомендованих заміників. Обмежений доступ до оригінальних запасних частин, мастильних матеріалів, спеціалізованого інструменту. Використання некондиційних або адаптованих деталей, що порушує геометрію взаємодії вузлів. Перебої з паливом, використання палива низької якості, що впливає на роботу паливної апаратури, циліндропоршневої групи. Скорочення термінів ремонту: неповна діагностика, ризик прихованих дефектів. Відсутність діагностичного обладнання: ремонт "на слух" або за зовнішніми ознаками. Нестабільність енергопостачання: ускладнення ремонтних робіт, неможливість використання сучасного обладнання.

Концептуальні підходи до подолання викликів.

Адаптація системи технічного обслуговування (ТО). Перехід на прогнозоване (за станом) ТО замість регламентного (якщо є можливість моніторингу). Створення мобільних ремонтних бригад з мінімальним необхідним обладнанням. Стандартизація вузлів та агрегатів для уніфікації запасних частин між різними типами рухомого складу.

Оптимізація ресурсів. Розробка тимчасових технологічних рішень (наприклад, тимчасове відновлення деталей зварюванням, наплавленням). Використання альтернативних мастил та технічних рідин (з чітким контролем їх властивостей). Організація локальних складів критичних запчастин у безпечних місцях.

Кадрова політика. Інтенсифікація навчання персоналу з основ екстреного ремонту та діагностики. Створення інструкцій із спрощеними алгоритмами ТО для умов обмежених ресурсів.

Технологічна підтримка. Застосування систем моніторингу стану в реальному часі (якщо можливо) для ключових вузлів. Використання 3D-друку для швидкого виготовлення некритичних деталей у польових умовах.

Організаційні заходи. Створення координаційних центрів для обміну інформацією про стан рухомого складу та наявність запчастин. Розробка пріоритетних маршрутів та режимів експлуатації для мінімізації зносу.

Напрями адаптації та стратегії підвищення живучості. Перехід на умовно-ресурсну або за станом систему ТОіР: Замість календарної періодичності – технічне обслуговування за моторесурсом або результатами оперативної

діагностики (віброакустичної, термічної, візуальної засобами NDT). Мобілізація ремонтних потужностей: створення мобільних ремонтних бригад, польових майстерень з базовим набором обладнання для відновлення працездатності критичних систем. Імпортозаміщення та адаптація: розробка та застосування методів відновлення деталей (наплавлення, механічна обробка), адаптація доступних аналогів запчастин. Пріоритетна діагностика: фокус на контролі стану найбільш навантажених та критичних вузлів: ходових частин, гальм, основних підшипників вузлів. Оптимізація логістики експлуатації: по можливості, диференціація рухомого складу за призначенням (найстійкіші одиниці – для найважчих умов), маршрутизація з урахуванням стану інфраструктури.

Висновки. Експлуатація транспортних засобів у воєнний час характеризується зростанням інтенсивності зносу механічних вузлів у 2,5-3 рази. Основним фактором виходу з ладу ходових частин є динамічні удари, спричинені незадовільним станом транспортної інфраструктури. Традиційні регламенти технічного обслуговування потребують негайної адаптації до умов обмеженого часу та ресурсів.

Встановлено, що критичними вузлами для залізничного транспорту є буксові вузли, а для автомобільного – елементи підвіски та трансмісії.

Впровадження методів експрес-діагностики дозволяє виявляти приховані тріщини на ранніх стадіях без повного розбирання агрегатів. Використання альтернативних мастильних матеріалів є виправданим заходом для короткострокового підтримання працездатності.

Взаємодія залізничних та автомобільних засобів на перевантажувальних пунктах вимагає посилення контролю за станом кріпильних механізмів.

Живучість рухомого складу забезпечується через надмірність конструктивних елементів та можливість модульного ремонту. Доведено, що необхідно створити централізовану базу даних типових відмов для оперативного реагування на системні проблеми. Навчання персоналу роботі в екстремальних умовах повинно базуватися на розроблених у дослідженні алгоритмах.

Економічний ефект від реалізації запропонованих заходів полягає у збереженні державного майна та безперервності постачання. Проведене дослідження закладає

наукові основи для створення транспортної техніки нового покоління з підвищеним рівнем захищеності вузлів.

Література

1. Fomin O., Prokopenko P., Klimash A., Kuz'menko S. Assessment of the quality indicators of the carriage movement by directly measuring the forces of interaction between the wheels and rails // Communications – Scientific Letters of the University of Žilina. 2025. Vol. 26, No. 3. P. 155–166. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.030>
2. Fomin O. et al. Determination of safety indicators of the freight wagons by mobile systems // Procedia Structural Integrity. 2024. Vol. 59. P. 516–522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.073>
3. Fomin O., Gerlici J., Lovskaya A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Research of the strength of the bearing structure of the flat wagon body from round pipes during transportation on the railway ferry // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 235. Article 00003. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500003>
4. de Paula Pacheco P. A. et al. The effectiveness of different wear indicators in quantifying wear on railway wheels of freight wagons // Railway Engineering Science. 2024. Vol. 32, No. 3. P. 307–323. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-024-00334-8>
5. Wang Q. et al. A diagnostic method of freight wagons hunting performance based on wayside hunting detection system // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2024. Vol. 227. Article 114274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114274>
6. Bulakh M. Improving the technical and operational characteristics of the railway carriage // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 509. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84332-0>
7. Tokmurzina-Kobernyak N., Tursynbayeva A., Sagatova L., Shurenov M., Kurbenova A. Indicators of the dynamic interaction of the track and freight wagons with increased axial load // Communications – Scientific Letters of the University of Žilina. 2025. Vol. 27, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2025.033>
8. Zhai W. Train–track coupled dynamics problems in heavy-haul rail // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2025.2494834>
9. Solonenko V. G. Dynamic analysis of railway vehicle–track interaction // Applied Sciences. 2025. Vol. 15, No. 13. Article 7152. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15137152>
10. 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
- No. 3. P. 155–166. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2024.030>
2. Fomin O. et al. Determination of safety indicators of the freight wagons by mobile systems // Procedia Structural Integrity. 2024. Vol. 59. P. 516–522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.073>
3. Fomin O., Gerlici J., Lovskaya A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Research of the strength of the bearing structure of the flat wagon body from round pipes during transportation on the railway ferry // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 235. Article 00003. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500003>
4. de Paula Pacheco P. A. et al. The effectiveness of different wear indicators in quantifying wear on railway wheels of freight wagons // Railway Engineering Science. 2024. Vol. 32, No. 3. P. 307–323. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-024-00334-8>
5. Wang Q. et al. A diagnostic method of freight wagons hunting performance based on wayside hunting detection system // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2024. Vol. 227. Article 114274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114274>
6. Bulakh M. Improving the technical and operational characteristics of the railway carriage // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 509. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84332-0>
7. Tokmurzina-Kobernyak N., Tursynbayeva A., Sagatova L., Shurenov M., Kurbenova A. Indicators of the dynamic interaction of the track and freight wagons with increased axial load // Communications – Scientific Letters of the University of Žilina. 2025. Vol. 27, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2025.033>
8. Zhai W. Train–track coupled dynamics problems in heavy-haul rail // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2025.2494834>
9. Solonenko V. G. Dynamic analysis of railway vehicle–track interaction // Applied Sciences. 2025. Vol. 15, No. 13. Article 7152. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15137152>
10. 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

References

1. Fomin O., Prokopenko P., Klimash A., Kuz'menko S. Assessment of the quality indicators of the carriage movement by directly measuring the forces of interaction between the wheels and rails // Communications – Scientific Letters of the University of Žilina. 2025. Vol. 26,

Fomin O.V., Klimash A.O., Polupan Ye.V., Prokhorchuk M.V. Operational challenges in the interaction of mechanical parts of railway and road transport rolling stock in martial arts conditions

The article comprehensively examines the operational challenges that arise during the interaction of mechanical parts of railway and road transport rolling stock in conditions of martial law, which is characterized by increased traffic intensity, infrastructure destruction, resource shortages and instability of logistics chains. It is substantiated that the combination of dynamic overloads, shock and vibration effects, temperature fluctuations, aggressive environments and limited access to scheduled maintenance leads to accelerated wear of friction units, gears, bearing supports and brake systems. It is established that the degradation of the track and roadbed forms additional impulse loads on the wheelsets, axle units, spring suspension, bogie frames, transmission elements and steering

mechanisms of vehicles, which causes the cumulative nature of damage and an increase in the probability of sudden failures. The patterns of changes in the technical condition of mechanical systems under conditions of exceeding the regulatory operating modes, the use of alternative lubricants and spare parts substitutes, as well as reducing the time for diagnostics are studied. It is shown that traditional routine approaches to technical maintenance are not effective enough in a special period and require transformation into flexible strategies based on the assessment of the actual technical condition. The most vulnerable elements for railway transport are identified, in particular axle units, wheelsets, braking mechanisms and coupling devices, and for road transport - suspension, transmission, engines and tires operating in overload and off-road modes. The impact of the shortage of qualified personnel and limitations in material and technical support on the quality of repair operations and the reliability of restored units is analyzed. Conceptual approaches to increasing the survivability of rolling stock are proposed, which include the transition to technical maintenance systems based on condition, the introduction of express methods of vibroacoustic and thermographic diagnostics, the creation of mobile repair teams, the unification of design solutions and the formation of local reserves of critical spare parts. The feasibility of using digital monitoring technologies, the formation of a centralized database of typical failures and algorithms for supporting decision-making in real time is substantiated.

It is shown that the implementation of the proposed measures allows reducing the accident rate, optimizing the costs of restoration, extending the resource of responsible

nodes and ensuring the continuity of transport support in conditions of military risks. The results obtained form a scientific and methodological basis for adapting transport technical operation systems to extreme conditions and can be used in the development of regulatory documents, modernization of the existing fleet and the creation of a new generation of rolling stock with an increased level of reliability and security.

Keywords: *rolling stock, martial law, technical operation, railway transport, road transport, reliability, repair strategies.*

Фомін О. В. – д.т.н., професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Національного транспортного університету, o.fomin@ntu.edu.ua

Климаш А. О. – к.т.н., доцент, завідувач кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, klimash@snu.edu.ua

Полупан Є.В. – к.т.н., доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, polupan_ev@snu.edu.ua

Прохорчук М. В. – старший викладач факультету комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки Державний університет «Житомирська політехніка», maribel.dictu@gmail.com

Стаття подана 23.12.2025.

Наукове видання

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 1 (299) 2026**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск

Лорія М.Г.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 12.02.2026 р.
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 12,1. Обл.-вид. арк. 13,6.
Наклад 50 прим. Вид. № 3436.

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