Co-funded by the European Union

МАТЕРІАЛИ
МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
PROCEEDINGS INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE

«ЄВРОПЕЙСЬКІ СТРАТЕГІЇ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЇХ АДАПТАЦІЯ В УКРАЇНІ»
"EUROPEAN ENERGY SAVING STRATEGIES AND THEIR ADAPTATION IN UKRAINE"

Збірник тез доповідей підготовлено в межах проєкту міжнародної програми Jean Monnet Module **«Міждисциплінарний підхід до інноваційних методів енергоефективності та енергозбереження для сталого розвитку» (101238173 - SYNERGY)**

The collection of conference abstracts was held within the framework of the international educational project Jean Monnet Module **"Interdisciplinary Approach to Innovative Methods of Energy Efficiency and Energy Saving for Sustainable Development" (101238173 – SYNERGY)**.

Львів – 2026
Lviv – 2026

Co-funded by
the European Union

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

МАТЕРІАЛИ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

«ЄВРОПЕЙСЬКІ СТРАТЕГІЇ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЇХ АДАПТАЦІЯ В УКРАЇНІ»

у межах виконання освітнього проєкту Erasmus+ Jean Monnet
«Міждисциплінарний підхід до інноваційних методів енергоефективності та енергозбереження для сталого розвитку» (SYNERGY),
101238173-SYNERGY-ERASMUS-JMO-2025-HEI-TCH-RSCH

Львів 2026

УДК 620.92(4:477)

Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Європейські стратегії енергозбереження та їх адаптація в Україні». – Львів: «Новий Світ-2000», 2026. – 146 с.

ISBN 978-966-418-595-7

Збірник тез доповідей підготовлено за результатами виступів на міжнародній науково-практичній конференції, яка організовувалася колективом кафедр електронної інженерії та хімічної інженерії Національного університету «Львівська політехніка» у межах виконання освітнього проєкту міжнародної програми Jean Monnet Module **«Міждисциплінарний підхід до інноваційних методів енергоефективності та енергозбереження для сталого розвитку»** (**101238173** – **ERASMUS-JMO-2025-HEI-TCH-RSCH (SYNERGY)** (https://lpnu.ua/synergy) за підтримки Програми Європейського Союзу Erasmus+.

Підтримка Європейської Комісії у підготовці цього збірника не означає схвалення його змісту. Він відображає лише думку авторів, і Європейська Комісія не несе відповідальність за будь-яке використання інформації, що міститься в ньому.

У рамках проведення конференції коло тематичних дискусійних напрямів було зосереджено на ключових аспектах енергоефективності, сталому розвитку та механізмах інтеграції передового європейського досвіду в українські реалії.

Відповідальний за випуск – Шимчишин О. Й., графічне оформлення – Кузик О. О.

Матеріали подано у авторській редакції. Відповідальність за зміст матеріалів, їх відповідність вимогам чинного правопису і достовірність фактів та статистичних даних несуть автори.

© Автори статей, 2026

ISBN 978-966-418-595-7

© Видавництво «Новий Світ-2000», 2026

Co-funded by the European Union

LVIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

PROCEEDINGS INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE

"EUROPEAN ENERGY SAVING STRATEGIES AND THEIR ADAPTATION IN UKRAINE"

within the framework of the Erasmus+ Jean Monnet educational project «Interdisciplinary Approach to Innovative Methods of Energy Efficiency and Energy Saving for Sustainable Development» (SYNERGY-101238173)

Lviv 2026

UDC 620.92(4:477)

Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “European Energy Saving Strategies and Their Adaptation in Ukraine”. – Lviv: "New World-2000", 2026. – 146 p.

ISBN 978-966-418-595-7

The collection of conference abstracts has been prepared based on the presentations at the International Scientific and Practical Conference organized by the faculty teams of the Department of Electronic Engineering and the Department of Chemical Engineering at Lviv Polytechnic National University. The event was held within the framework of the international educational project Jean Monnet Module “**Interdisciplinary Approach to Innovative Methods of Energy Efficiency and Energy Saving for Sustainable Development” (101238173 – ERASMUS-JMO-2025-HEI-TCH-RSCH (SYNERGY)** (https://lpnu.ua/synergy) with the support of the Erasmus+ Programme of the European Union.

The European Commission's support for the preparation of this publication does not constitute an endorsement of its contents, which reflect the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

Within the framework of the conference, the scope of thematic discussion areas was focused on the key aspects of energy efficiency, sustainable development, and mechanisms for integrating advanced European experience into Ukrainian realities.

Person responsible for the publication: O. Y. Shymchyshyn, **Graphic design:** O. O. Kuzyk

The materials are published in the authors’ original edition. The authors bear full responsibility for the content of the materials, their compliance with current spelling regulations, and the reliability of facts and statistical data.

© The Authors, 2026

ISBN 978-966-418-595-7

© Publishing House “New World-2000”, 2026

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ / PROGRAM COMMITTEE

Голова:
ІРИНА ЯРЕМЧУК (м. Львів, Україна)

Chairman:
IRYNA YAREMCHUK (Lviv, Ukraine)

Члени програмного комітету:

Members:

ПІТЕР СКАБАРА (м. Глазго, Велика Британія)

PETER SKABARA (Glasgow, UK)

СЕРГІУШ ЛЮЛІНСЬКИЙ (м. Варшава, Польща)

SERGIUSZ LYULINSKI (Warsaw, Poland)

ДМИТРО ВОЛИНЮК (м. Каунас, Литва)

DMYTRO VOLYNIUK (Kaunas, Lithuania)

ОЛЕКСАНДР БЕЗВІКОННИЙ (м. Каунас, Литва)

OLEKSANDR BEZVIKONNYI (Kaunas, Lithuania)

ДАМІАН ГЛОВЄНКО (м. Гданськ, Польща)

DAMIAN GLOWIENKA (Gdansk, Poland)

СВІТЛАНА РОМАНЮК (м. Отвоцьк, Польща)

SVITLANA ROMANIUK (Otwock, Poland)

ВІРА ТИРСА (м. Мехікалі, Сполучені Штати Мексики)

VIRA TYRSA (Mexicali, United States of Mexico)

ЗАКАРЯЄВ ЗАУР НЕЙМАТ (Азербайджанська Республіка)

ZAKARYAEV ZAUR NEYMAT (Republic of Azerbaijan)

ЛЕОНІД ОЗІРКОВСЬКИЙ (м. Львів, Україна)

LEONID OZIRKOVSKYI (Lviv, Ukraine)

БОГДАН ДЗІНЯК (м. Львів, Україна)

BOHDAN DZINYAK (Lviv, Ukraine)

ХРИСТИНА ІВАНЮК (м. Львів, Україна)

KRYSTYNA IVANIUK (Lviv, Ukraine)

ОЛЕКСАНДР ІВАЩУК (м. Львів, Україна)

OLEKSANDR IVASHCHUK (Lviv, Ukraine)

АНДРІЙ ФЕЧАН (м. Львів, Україна)

ANDRIY FECHAN (Lviv, Ukraine)

ВОЛОДИМИР КОЦУН (м. Львів, Україна)

VOLODYMYR KOTSUN (Lviv, Ukraine)

МАРІЯ РУДА (м. Львів, Україна)

MARIA RUDA (Lviv, Ukraine)

ЗІНОВІЙ КОГУТ (м. Львів, Україна)

ZINOVIY KOHUT (Lviv, Ukraine)

ЮЛІЯ НЕЧИТАЙЛО (м. Харків, Україна)

YULIIA NECHYTAILO (Kharkiv, Ukraine)

АНДРІЙ КОСТРУБА (м. Львів, Україна)

ANDRIY KOSTRUBA (Lviv, Ukraine)

ОКСАНА БОЙКО (м. Львів, Україна)

OKSANA BOYKO (Lviv, Ukraine)

ОЛЕГ СЕРГІЄНКО (м. Харків, Україна)

OLEG SERGIENKO (Kharkiv, Ukraine)

ОЛЕКСАНДР ЛЄВТЄРОВ (м. Харків, Україна)

OLEKSANDR LEVTEROV (Kharkiv, Ukraine)

ТЕТЯНА ПЛУГІНА (м. Харків, Україна)

TETIANA PLUGINA (Kharkiv, Ukraine)

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ / ORGANIZING COMMITTEE

Голова:
д.т.н., проф. **ГЕЛЬЖИНСЬКИЙ ІГОР**

Chairman:
Prof. **IGOR HELZHYNSKYI**, D.Sc.

Члени оргкомітету:

Members:

к.т.н., доц. **ОЛЬГА ШИМЧИШИН**
Assoc. Prof. **OLHA SHYMCHYSHYN**, Ph.D.

д. філ, **СЕРГІЙ МЕЛЬНИКОВ**
SERHII MELNYKOV, Ph.D.

аспірант **НАТАЛІЯ КУЗИК**
NATALIA KUZYK, Ph.D. student

к.т.н., доц. **ДІАНА КІНДЗЕРА**
Assoc. Prof. **DIANA KINDZERA**, Ph.D.

аспірант **ОЛЕКСАНДР КУЗИК**
OLEKSANDR KUZYK, Ph.D. student

Зміст | Context

СЕКЦІЯ 1 | Відновлювана енергетика, енергетична безпека та зелене відновлення України
SECTION 1 | Renewable Energy, Energy Security and Green Recovery of Ukraine

Будякова Олена, *Київський національний університет технологій та дизайну* «БІОЕКОНОМІКА В КОНТЕКСТІ ЄВРОПЕЙСЬКИХ СТРАТЕГІЙ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ДОСВІДУ ДЛЯ УКРАЇНИ»	**11**
Вакарчук Анастасія, *НУ «Львівська політехніка»* «КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ»	**13**
Івановський Андрій, *ВП НУБіП України "Ніжинський агротехнічний інститут"* «ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ЯК ЧИННИК ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ»	**15**
Kozak Kateryna[1,2], Mykola Tarasenko[2] *[1]Schréder TOV, [2]Ternopil Ivan Puluj National Technical University,* «SOLAR ROAD LIGHTING AS AN ENERGY SAVING STRATEGY: LIFE CYCLE CO_2 EVIDENCE FOR LOWER ENVIRONMENTAL IMPACT»	**17**
Маєвська Оксана, Скороход Павло, Мокрицький Андрій *Національний лісотехнічний університет України* «НАПРЯМИ ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ЦУКРОВІЙ ГАЛУЗІ»	**19**
Мончук Марта[1], Кшивецький Богдан[1], Кіндзера Діана[2] *[1]Національний лісотехнічний університет України, [2] НУ «Львівська політехніка»* «СУЧАСНІ МЕТОДИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД У СИСТЕМАХ ОЧИЩЕННЯ СТОКІВ»	**21**
Nechytailo Yuliia, *State Biotechnological University* «ANALYSIS OF THE IMPACT OF DIGITAL TECHNOLOGIES ON WORKING CONDITIONS AND SAFETY IN THE ENERGY INDUSTRY»	**24**
Нечитайло Юлія, Зміївський Денис, *Державний біотехнологічний університет* «3D-ДРУК ОПТИМІЗОВАНИХ КОМПОНЕНТІВ МІКРО-ГЕС ТА ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ»	**27**
Нечитайло Юлія, Харченко Максим *Державний біотехнологічний університет* «АГРОВОЛЬТАЇКА: ПОЄДНАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ІЗ СІЛЬСЬКИМ ГОСПОДАРСТВОМ»	**30**
Попович Сергій, Мальований Мирослав, Попович Олена *НУ «Львівська політехніка»* «АДАПТАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ДО ЗМІНИ КЛІМАТУ ТА РОЗВИТОК ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ»	**32**
Тимченко Анастасія, Дугінець Ганна *Державного торговельно-економічного університету (Київ)* «ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ БІОВІДХОДІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА В УМОВАХ ЗЕЛЕНОГО ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ»	**35**
Тишик Юлія[1,2], Андрущак Анатолій [1], Подгурська Вікторія [2] *[1]НУ «Львівська політехніка», [2]Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України* «РОЗВИТОК ПАЛИВНО-КОМІРЧАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УКРАЇНІ»	**38**

СЕКЦІЯ 2 | Інноваційні технології енергозбереження в електронній інженерії та енергетичних системах
SECTION 2 | Innovative Energy Saving Technologies in Electronic Engineering and Energy Systems

Басараба Богдан, Шимчишин Ольга *НУ «Львівська політехніка»* «ПАЛИВНІ КОМІРКИ ЯК ПЕРСПЕКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ТРАНСПОРТУ»	**41**
Hotra Les[1], Helzhynskyy Ihor[1], Klimek Jacek[2] *[1] Lviv Polytechnic National University, [2] Lublin University of Technology* «INVESTIGATION OF FBG SPECTRAL CHARACTERISTICS IN SENSOR APPLICATIONS»	**43**

Ivakh Mariia, Tsovkh Oleksandr *Lviv Polytechnic National University* «IMPLEMENTATION OF ENERGY EFFICIENT ENGINEERING PRINCIPLES IN INTELLIGENT MOBILITY SYSTEMS»	**45**
Карпова Анастасія, Кіндзера Діана *НУ «Львівська політехніка»* «ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СУШАРКИ КИПЛЯЧОГО ШАРУ ТА ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОЗАТРАТ»	**47**
Климкевич Олег, Лукасевич Богдан, Герман Ігор, Булавінець Богдан, Булавінець Тетяна, Іванюк Христина *НУ «Львівська політехніка»* «МОДИФІКАЦІЯ ОРГАНІЧНИХ СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЛЬНИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НАНОЧАСТИНКАМИ СРІБЛА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ»	**50**
Kremer Iryna, Tymkovych Rostyslav *НУ «Львівська політехніка»* «INTEGRATION OF ENERGY HARVESTING TECHNOLOGIES INTO REHABILITATION CONTROL SYSTEMS IN THE CONTEXT OF THE EUROPEAN GREEN DEAL»	**52**
Кремер Ірина, Проскурняк Олександр *НУ «Львівська політехніка»* «ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС СИНХРОННОГО ДЕТЕКТУВАННЯ ОПТИЧНОГО ВІДГУКУ РІДКОКРИСТАЛІЧНОГО ГАЗОВОГО СЕНСОРА З ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ ПАРАЗИТНИХ ВПЛИВІВ»	**54**
Кремер Ірина, Сметанюк Михайло *НУ «Львівська політехніка»* «АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ РЕЗИСТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ДЛЯ ДИНАМІЧНОГО БАЛАНСУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ»	**56**
Kuzyk Natalia, Bulavinets Tetyana, Ivaniuk Khrystyna, Yaremchuk Iryna, Stakhira Pavlo *НУ «Львівська політехніка»* «EFFICIENT UNDOPED ORGANIC LIGHT-EMITTING DIODES BASED ON A NOVEL DONOR-ACCEPTOR TADF EMITTER»	**58**
Макух Віталій, Малиняк Мар'ян, Шимчишин Ольга *НУ «Львівська політехніка»* «АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ВІДНОСНО СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ»	**59**
Мищишин Денис, Івах Марія *НУ «Львівська політехніка»* «ДІЕЛЕКТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ РІДКОКРИСТАЛІЧНИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ»	**61**
Nechyporuk Ihor, Kuzyk Natalia *НУ «Львівська політехніка»* «ENHANCING THE DURABILITY OF PEROVSKITE SOLAR CELLS THROUGH METHODS OF ENCAPSULATION»	**63**
Нечитайло Юлія, Бодров Владислав *Державний біотехнологічний університет, кафедра АКІТ* «ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ»	**66**
Оніщук Богдан, Кремер Ірина *НУ «Львівська політехніка»* «ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИЙ БОРТОВИЙ РК-ОПТИЧНИЙ ГАЗОВИЙ СЕНСОР ДЛЯ БПЛА З АДАПТИВНИМИ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ТА GPS-ПРИВ'ЯЗКОЮ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ»	**68**
Ozirkovskyi Leonid, Bratiuk Pavlo *Lviv Polytechnic National University* «BEHAVIOR ANALYSIS OF RENEWABLE ENERGY SYSTEM COMPONENTS IN ENERGY-SAVING STRATEGIES»	**70**
Shchetinin Mykhailo, Stakhira Pavlo *Lviv Polytechnic National University* «NUMERICAL SIMULATION OF ELECTRON-CHARGE TRANSPORT IN ORGANIC THIN FILM»	**72**

СЕКЦІЯ 3 | Енергоефективні процеси та матеріали в хімічній інженерії та технологіях
SECTION 3| Energy-Efficient Processes and Materials in Chemical Engineering and Technologies

Vyzdryk Oleh, Atamanyuk, Volodymyr, Chyzhovych Roman *Lviv Polytechnic National University* «INVESTIGATION OF DISTILLERY STILLAGE DUST SEPARATION EFFICIENCY IN A CYCLONE USING CFD METHODS»	**75**
Гузьова Ірина, Малінін Ігор, Шнер Анастасія *НУ «Львівська політехніка»* «ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУШІННЯ СТАЦІОНАРНОГО ШАРУ АДСОРБЕНТУ»	**77**
Денисюк Роман, Бернацька Наталія, Типіло Ірина, Лось Олександр, Сидорчук Володимир, Старчевський Володимир *НУ «Львівська політехніка»*	**79**

НАНОДИСПЕРСНІ ПЕРОВСКІТНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ТИТАНАТІВ І НІОБАТІВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ДОВКІЛЛЯ: ЗАЛЕЖНІСТЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВІД СПОСОБУ СИНТЕЗУ	
Дептак Аліна, Кіндзера Діана *НУ «Львівська політехніка»* «ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ПРОЦЕСИ ТА МАТЕРІАЛИ В ХІМІЧНІЙ ІНЖЕНЕРІЇ: ЄВРОПЕЙСЬКИЙ ДОСВІД ТА МОЖЛИВОСТІ АДАПТАЦІЇ В УКРАЇНІ»	**81**
Mudryy Ihor, Kirakevych Iryna, Frechka Mykhailo *Lviv Polytechnic National University* RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES FOR INSTALLING SHEET PILE FOUNDATIONS USING FIBER-REINFORCED CONCRETE	**82**
Іванишин Анна, Кіндзера Діана *НУ «Львівська політехніка»* «ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СПІРАЛЬНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ У ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСАХ ТА СИСТЕМАХ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД»	**84**
Кіндзера Діана, Капущак Павло *НУ «Львівська політехніка»* «НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ПРОЦЕСАХ РЕКТИФІКАЦІЇ»	**85**
Кіндзера Діана, Когут Ольга *НУ «Львівська політехніка»* «ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ПРОЦЕСИ ТЕПЛООБМІНУ У ВИРОБНИЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЯХ ХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ»	**87**
Kirakevych Iryna *Lviv Polytechnic National University* «ENERGY-EFFICIENT HIGH-STRENGTH SELF-COMPACTING CONCRETES WITH SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIALS FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION»	**91**
Kostiuk Alina, Atamanyuk Volodymyr, Hnativ Zoriana *Lviv Polytechnic National University* «DETERMINATION OF ENERGY CONSUMPTION FOR FILTRATION DRYING OF WILD CARROT POMACE»	**93**
Kulpa Marta, Kuzyk Oleksandr *Lviv Polytechnic National University* «REDUCING THE ENERGY INTENSITY OF MASS TRANSFER PROCESSES: ENERGY-SAVING MODES OF MECHANICAL MIXING DURING SALT DISSOLUTION»	**95**
Кузьмінчук Тетяна, Атаманюк Володимир *НУ «Львівська політехніка»* «ГІДРОДИНАМІКА ПІД ЧАС ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ СІРНИКОВОЇ СОЛОМКИ»	**97**
Левицький Михайло, Нечитайло Юлія *Державний біотехнологічний університет* «УТИЛІЗАЦІЯ ВТОРИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ ТА ІНТЕГРАЦІЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ У ВИРОБНИЦТВО»	**99**
М'яловіцький Юрій, Кіндзера Діана *НУ «Львівська політехніка»* «НАПРЯМКИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В АБСОРБЦІЙНИХ ПРОЦЕСАХ»	**102**
Shepida Mariana, Bulavinets Tetiana *Lviv Polytechnic National University* «PULSED LASER DEPOSITION OF BIMETALLIC NANOPARTICLES ON SILICON SURFACE»	**104**
Холод Ярослав, Старчевський Володимир, Чижович Роман *НУ «Львівська політехніка»* «ЗОВНІШНЯ ТА ВНУТРІШНЯ ЗАДАЧА ГІДРОДИНАМІКИ СТАЦІОНАРНОГО ШАРУ ВАПНЯКОВО-АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ»	**106**

СЕКЦІЯ 4 | Цифрові технології, IoT та штучний інтелект для управління енергоспоживанням
SECTION 4 | Digital Technologies, IoT and Artificial Intelligence for Energy Consumption Management

Богінська Людмила *Сумський національний аграрний університет* «ЗЕЛЕНЕ БУДІВНИЦТВО ЯК ІНСТРУМЕНТ СТАЛОГО ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ»	**109**
Горбатий Іван, Андрухів Андрій *НУ «Львівська політехніка»* «ГІБРИДНІ МОДЕЛІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОВИТРАТ ХМАРНИХ СИСТЕМ»	**111**
Думин Ирина *НУ «Львівська політехніка»* «КОНТЕКСТНА ІНЖЕНЕРІЯ ЯК ЧИННИК ЕНЕРГООПТИМІЗАЦІЇ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ»	**113**
Dzhumelia Elvira, Fechan Andriy, Khoverko Yuriy *Lviv Polytechnic National University* «SMART TEMPERATURE MONITORING USING PASSIVE LIQUID CRYSTAL–SEMICONDUCTOR SENSORS FOR ENERGY-EFFICIENT ENVIRONMENTS»	**115**

Zhadan Maryna, Kuzyk Oleksandr *Lviv Polytechnic National University* «DATA PROTECTION OF UKRAINE'S ENERGY INFRASTRUCTURE IN THE CONTEXT OF SMART METER INTEGRATION AND WIRELESS DATA TRANSMISSION PROTOCOLS»	**117**
Зайвий Роман, Павлиш Володимир *НУ «Львівська політехніка»* «МЕТОД АДАПТИВНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МЕРЕЖІ FANET НА ОСНОВІ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ»	**119**
Zakaryayev Zaur, Gayıbov Chingiz *Military Institute named after Heydar Aliyev (Republic of Azerbaijan)* «FUNDAMENTALS OF RADIO ENGINEERING AND MODULATION TECHNIQUES»	**121**
Illia Kucheruk, Oleksandr Kuzyk *Lviv Polytechnic National University* AUTOMATION OF CYBER THREAT RESPONSE IN AWS FOR THE PROTECTION OF ENERGY MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL MONITORING IOT SYSTEMS OF ENTERPRISES»	**123**
Kachurak Yurii, Melnykov Serhii *Lviv Polytechnic National University* «PROACTIVE MANAGEMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND THE CONDITION OF POWER TRANSMISSION LINES USING IOT TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE»	**125**
Khimchyk Anastasiia, Kuzyk Oleksandr *Lviv Polytechnic National University* «A RESPONSE MODEL TO AWS SERVICE AVAILABILITY VIOLATIONS IN ENERGY MONITORING SYSTEMS CONSIDERING SLA AND CYBERSECURITY RISKS»	**127**
Козічук Юрій, Булавінець Тетяна *НУ «Львівська політехніка»* «АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ РІШЕННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ МОДУЛЬНИХ IoT-ПЛАТФОРМ РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ»	**129**
[1]Коцун Володимир, [2]Сушинський Орест *[1]Львівська філія Приватного Вищого Навчального Закладу "ЄВРОПЕЙСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ", [2]Приватний Вищий Навчальний Заклад "ЄВРОПЕЙСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ"* «ЗАСТОСУВАННЯ SALESFORCE EINSTEIN AI ТА ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ: ВІД SMART METER ДО SMART CITY»	**131**
Лаврів Василь, Горбатий Іван *НУ «Львівська політехніка»* «ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ СИСТЕМАМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ПРОМИСЛОВИХ І ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ»	**133**
Martyniuk Roman, Kuzyk Oleksandr *Lviv Polytechnic National University* «THE IMPACT OF DOCKER AND KUBERNETES ON IT INFRASTRUCTURE ENERGY CONSUMPTION»	**136**
[1]Mehman Huseynov, [1]Habil Kishiyev, [2]Zaur Huseynov *[1]Military Institute named after Heydar Aliyev (Republic of Azerbaijan)*, *[2]UNINET LLC* «A FREQUENCY SYNTHESIZER BASED ON THE ADF4360-1 MICROCIRCUIT WITH AUTOMATIC FREQUENCY CONTROL»	**139**
Olishchak Vladyslav, Kuzyk Oleksandr *Lviv Polytechnic National University* «THE UTILIZATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS FOR FORECASTING AND MANAGING ENERGY CONSUMPTION IN UKRAINIAN INDUSTRIAL ENTERPRISES»	**141**
Плугіна Тетяна, Едуард Самолевський *Харківський національний автомобільно-дорожній університет* «АРХІТЕКТУРА СИСТЕМ IoT ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ РІШЕНЬ ПРОМИСЛОВОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ»	**143**
Приймак Назар, Жук Юрій, Озірковський Леонід *НУ «Львівська політехніка»* «ОЦІНКА ВПЛИВУ СТРУКТУРНОЇ ЖИВУЧОСТІ МЕРЕЖІ РОЗУМНОГО БУДИНКУ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ»	**145**

СЕКЦІЯ 1 | Відновлювана енергетика, енергетична безпека та зелене відновлення України
SECTION 1 | Renewable Energy, Energy Security and Green Recovery of Ukraine

Олена Будякова
к.е.н., доцент
Київський національний університет технологій та дизайну

БІОЕКОНОМІКА В КОНТЕКСТІ ЄВРОПЕЙСЬКИХ СТРАТЕГІЙ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ДОСВІДУ ДЛЯ УКРАЇНИ

Анотація. *У сучасному світі проблема енергозбереження є однією з найактуальніших. Швидке зростання споживання енергії, виснаження природних ресурсів та забруднення навколишнього середовища обумовлюють енергозбереження та нові технології виробництва енергії. Одним із перспективних напрямів є розвиток біоекономіки. Біоекономіка – це модель, яка базується на використанні відновлюваних біологічних ресурсів для виробництва біоенергії, біопалива, біогазу, продуктів харчування, матеріалів тощо. Вона поєднує економічну, екологічну та соціальну сфери та сучасні технології, зокрема біотехнології, що сприяє сталому розвитку.*

Ключові слова: *біоекономіка, сталий розвиток, біопаливо, енергозбереження.*

Для України питання розвитку біоекономіки є особливо важливим. Через енергетичні кризи внаслідок повномасштабного вторгнення та залежність від імпортних енергоносіїв країна потребує пошуку альтернативних джерел енергії. Україна має великі площі сільськогосподарських земель, значні лісові ресурси та великі обсяги органічних відходів, які можуть використовуватися для виробництва біоенергії. Саме тому біоекономіка є одним із ключових напрямів розвитку енергозбереження в державі.

У 2009 році ЄС почав розробляти політику для забезпечення стійкого енергетичного союзу та довгострокової політики щодо кліматичних змін. У рамках цього проєкту була розроблена Директива 2009/28/ЄС Європейського Парламенту та Ради про заохочення до використання енергії, виробленої з відновлюваних джерел (Renewable Energy Directive, RED), яка спочатку встановила обов'язкову мету 20% кінцевого споживання енергії з відновлюваних джерел до 2020 року [1].

З моменту створення Директива RED неодноразово переглядалась та оновлювалась, в результаті стала частиною Пакету чистого енергоспоживання Європейського Союзу (ЄС) (2018) (RED II). Переглянута Директива Європейського парламенту і ради від 11 грудня 2018 року «Про стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел» [2] підвищила свою ціль на споживання відновлюваної енергії до 32 % до 2030 року. «Держави-члени повинні колективно забезпечити, щоб частка енергії з відновлюваних джерел у валовому кінцевому споживанні енергії в Союзі у 2030 році була на рівні принаймні 32%» [2]. Директива встановлює критерії сталості та скорочення викидів ПГ, що вельми актуально для зеленого відновлення України [3].

Загальний цільовий показник Європейської Унії у 2023 році (RED III) було оновлено до 42,5% з додатковим пунктом про те, що держави-члени колективно прагнуть збільшити частку енергії з відновлюваних джерел у валовому кінцевому споживанні енергії Союзу у 2030 році до 45%.

Один із сценаріїв найбільш інтенсивного розвитку відновлювальних джерел енергії – збільшення її частки до 75% кінцевого споживання енергії до 2050 року.

Серед основних механізмів стимулювання розвитку біоенергетики в країнах ЄС: ринкові ціни та додаткові податки на викопні палива, стимулюючі «зелені» тарифи та «зелені»

сертифікати на електроенергію з відновлювальних джерел енергії, державна підтримка, субсидії на обладнання, високі державні цілі та діюча державна політика з розвитку ВДЕ.

Отже, Європейський Союз активно підтримує розвиток біоенергетики через впровадження стратегій сталого розвитку, нормативно-правових актів та інструментів стимулювання. Особлива увага приділяється екологічному впливу біомаси з врахуванням викидів парникових газів на всіх етапах виробництва та використання.

В Україні 13 серпня 2024 р. Розпорядженням КМУ затверджено Національний план дій з відновлюваної енергетики до 2030 року, де зазначено, що в Україні діяло 68 установок загальною електричною потужністю 135 МВт, якими виробляється енергія з біогазу та які працюють за "зеленим" тарифом на початок 2024 року [3]. Перспективним розвитком біогазових технологій є виробництво біогазу з побутових відходів. Щорічно в Україні обсяг побутових відходів сягає 10 млн тонн.

Таким чином, розвиток біоекономіки в контексті енергозбереження за рахунок виробництва біогазу зменшує викиди парникових газів в атмосферу, забезпечує стабільність в енергетичному комплексі за рахунок зменшення споживання традиційних корисних копалин (газу, нафти, вугілля тощо), сприяє енергозбереженню та енергонезалежності.

Дослідження проведено за підтримки Європейського Союзу в рамках проєкту Жана Моне [номер гранту ERASMUS-JMO-2023-HEI-TCH-RSCH, 101127252 – «Просування європейських навичок та підходів до сталої біоекономіки в умовах сучасних викликів в Україні» (PESAB)].

«Фінансується Європейським Союзом. Проте висловлені погляди та думки належать лише авторам і не обов'язково відображають погляди Європейського Союзу чи Європейського виконавчого агентства з освіти та культури. Ні Європейський Союз, ні орган, що надає гранти, не можуть нести за них відповідальності».

This research has been conducted with the support of the European Union within Jean Monnet project [grant number ERASMUS-JMO-2023-HEI-TCH-RSCH, 101127252 – "Promoting of European skills and approaches for sustainable bioeconomy in the conditions of Ukrainian acute challenges" (PESAB)].

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them".

Список використаних джерел

1. Директива 2009/28/ЄС Європейського Парламенту та Ради про заохочення до використання енергії, виробленої з відновлюваних джерел та якою вносяться зміни до, а в подальшому скасовуються Директиви 2001/77/ЄС та 2003/30/ЄС https://ips.ligazakon.net/document/MU09267

2. Директива Європейського парламенту і ради (ЄС) 2018/2001 від 11 грудня 2018 року «Про стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел» https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_039-18#Text

3. Національний план дій з відновлюваної енергетики до 2030 року https://www.kmu.gov.ua/storage/app/uploads/public/66b/b80/837/66bb808375c48806179148.pdf

4. Будякова О. Екосистемний підхід до соціально-економічного розвитку в умовах зеленої та цифрової трансформації на засадах біоекономіки. *Економічні горизонти*. 2026. № 1(34). С. 15–31. https://doi.org/10.31499/2616-5236.1(34).2026.348943

Анастасія Вакарчук
доктор філософії
Національний університет «Львівська політехніка»

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Анотація: *У роботі розглядаються актуальні проблеми моніторингу стану енергетичного обладнання та систем з метою виявлення деструктивних змін до моменту настання незворотних процесів. На основі аналізу існуючих методів діагностики, що переважно базуються на електричних та хімічних показниках, обґрунтовано необхідність впровадження мультипараметричного підходу. Дослідження охоплює перелік неелектричних параметрів навколишнього середовища – температури, вологості, концентрації корозійних газів, вібрації та запиленості, які мають кількісно підтверджений вплив на деградацію електричних характеристик обладнання. Проведений аналіз створює підґрунтя для розробки автоматизованих дистанційних систем моніторингу в реальному часі для завчасного прийняття диспетчерських рішень.*

Ключові слова: *моніторинг електротехнічного обладнання, неелектричні параметри, діагностика обладнання, мультипараметричний моніторинг.*

Традиційна діагностика електроенергетичних систем та їх елементів здебільшого зосереджена на електричних параметрах і часто ігнорує інші фактори впливу, які теж стають першопричинами незворотних змін. До електричних параметрів, які доволі добре інтегровані в системи моніторингу та спостереження належать струми небалансів, склад газів, що розвинені у маслі масловмісного обладнання, стан ізоляції вводів, опори, діелектричні властивості масел та інші.

Втім, моніторинг електричних параметрів не може бути ізольованими від інших, неелектричних, параметрів. Наприклад, надмірне нагрівання компонентів є основною причиною деструкції ізоляційних матеріалів [1]. Таке нагрівання може мати два джерела: температура навколишнього середовища та тепло, яке виділяється струмовідними частинами і накопичується в межах розподільчого щита [2]. В обидвох випадках, моніторинг температури обладнання дозволяє вчасно вживати заходи щодо охолодження та вентиляції приміщень або конструкцій, в яких розташоване обладнання. Окрім цього, підвищення температури збільшує швидкість корозійних реакцій та може спричинити термічне розширення деталей, що також збільшує зношування контактів [3].

Відносна вологість повітря є одним із ключових неелектричних чинників, що суттєво впливає на стан внутрішньої ізоляції та інтенсивність деградаційних процесів електротехнічного обладнання. Конденсація вологи на холодних металевих поверхнях при високій вологості активує корозійні реакції, перетворюючи метали на оксиди, гідроксиди або сульфідні сполуки [4], а корозійно-активні гази (H_2S, SO_2, NH_3), потрапляючи в плівку вологи на металі, різко збільшують її електропровідність та інтенсивність руйнування [5].

Запиленість повітря, як самостійно, так і в комбінації з іншими параметрами, також несе загрозу роботі обладнання. За рахунок накопичення пилу на струмовідних елементах ускладнюється тепловідведення виділеного ними тепла, що може призводити до перегріву. А в поєднанні із вологою, запиленість суттєво пришвидшує електрохімічну корозію контактних поверхонь [6].

Під час роботи електричного обладнання, особливо генераційного та трансформаторного, електрична сила є джерелом вібрації. У свою чергу вібрація впливає на якість болтових з'єднань шинопроводів, провокує мікропробої ізоляції та механічний знос рухомих контактів. Відстеження тривалості вібрацій з різною амплітудою може допомогти завчасно виконувати профілактичні або ремонтні роботи, не доводячи стан обладнання та з'єднань до критичного рівня.

Огляд цих параметрів доводить, що жоден із них не визначає стан обладнання ізольовано – між ними є взаємозв'язки в різних комбінаціях та послідовностях виникнення. Тому ефективний моніторинг стану електротехнічного обладнання не обмежується лише електричними параметрами, а й складається з комплексного моніторингу неелектричних параметрів зі складними взаємозв'язками. Такий підхід, інтегрований у цифрові системи діагностики з використанням інтелектуальної аналітики, дозволить попереджати передкритичні стани електротехнічного обладнання у реальному часі.

Подяка

Ця робота була виконана в рамках державного науково-дослідного проекту № 0126U001693 «Технологія мультисенсорного моніторингу параметрів критичної інфраструктури для превенції позаштатних ситуацій на основі моделей машинного навчання».

Список використаних джерел

1. Проценко О. (2022) Діагностика стану електротехнічного обладнання. Київ. Режим доступу: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/47972
2. Iderus S., Peter G. (2020) Temperature Rise Test on Medium Voltage Switchgear Assembly Based on IEC Standard. 2020 8th International Conference on Orange Technology (ICOT), 1-5. doi: 10.1109/ICOT51877.2020.9468746
3. Wand Q., Xie T., Jin S., Tian H., Zhou X., Shi S. (2026) Corrosion Failure Analysis of Contactor Type Electrical Connection Components Used in Converter Valve Side Bushings. High Voltage. doi: 10.1049/hve2.70179
4. Taylor J.W., McFarland K.W., Ellis S. (2017) Corrosion Reduction in Power Distribution. 2017 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC). 253-262. doi: 10.1109/PCICON.2017.8188744
5. Облещенко А., Прядко К., Кудінов К. (2021) Дослідження факторів, які впливають на корозію мідних контактів електрообладнання. IX всеукраїнська науково-технічної конференція здобувачів вищої освіти ТДАТУ. 133-137.
6. VIOX (2026) How Dust in Switchgear Affects Electrical Reliability. Available from: https://viox.com/dust-in-switchgear-electrical-reliability/

Андрій Івановський,
старший викладач
ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»

ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ЯК ЧИННИК ТРАНСФОРМАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ

Анотація: *розглянуто роль відновлюваних джерел енергії у розвитку електроенергетичного сектору. Досліджено їх вплив на енергетичну безпеку, екологічну стійкість та економічний розвиток. Окреслено ключові переваги впровадження «зеленої» енергетики.*

Ключові слова*: відновлювані джерела енергії, електроенергетика, енергетична безпека, зелена енергетика, сталий розвиток, декарбонізація, конкурентоспроможність.*

Відновлювані джерела енергії забезпечують зміцнення енергетичної безпеки та підвищення екологічної стійкості, сприяють економічному зростанню й покращенню добробуту суспільства, а також підвищують конкурентоспроможність національної економіки. Крім того, вони посилюють співпрацю з європейськими партнерами в реалізації проєктів у сфері відновлюваної енергетики та сприяють обміну досвідом [1].

Законодавче регулювання є одним із ключових інструментів реалізації стратегії переходу України до «зеленої» енергетики, що передбачає зменшення залежності від викопних видів палива та інтеграцію відновлюваних джерел енергії в національну енергосистему. Правове забезпечення цього процесу має комплексний характер і включає як внутрішні нормативні ініціативи, так і виконання міжнародних зобов'язань, спрямованих на скорочення викидів парникових газів та покращення екологічного стану довкілля [2].

Одним із ключових нормативно-правових актів, що формує правові засади розвитку «зеленої» енергетики в Україні, є Закон України від 20.02.2003 № 555-IV «Про альтернативні джерела енергії», який установлює правові, економічні, екологічні та організаційні основи використання альтернативних джерел енергії, а також спрямований на стимулювання розширення їх застосування в паливно-енергетичному комплексі [3].

Важливою тенденцією сучасного енергетичного розвитку виступає стрімке зростання частки сонячної та вітрової генерації в енергетичних балансах країн, що зумовлено зниженням вартості технологій, розвитком інноваційних рішень та активною державною підтримкою. У результаті електроенергетичні системи поступово переходять від централізованої моделі до децентралізованої, що передбачає значну кількість розподілених джерел генерації.

Разом із тим інтеграція відновлюваних джерел енергії в енергосистему супроводжується комплексом технічних та організаційних викликів, які потребують системного вирішення. Однією з ключових проблем є нерівномірність та непередбачуваність генерації електроенергії з сонячних і вітрових установок, оскільки її обсяги безпосередньо залежать від погодних умов, часу доби та сезонних коливань. Це ускладнює процес стабільного балансування енергосистеми та забезпечення безперервного постачання електроенергії споживачам.

У зв'язку з цим виникає потреба у розвитку інфраструктури накопичення енергії, зокрема систем акумулювання різних типів, які дозволяють зберігати надлишки виробленої електроенергії та використовувати їх у періоди пікового попиту або зниження генерації. Важливу роль відіграє також розвиток маневрових потужностей, здатних швидко реагувати на коливання навантаження в енергосистемі та забезпечувати її стабільність.

Окремим напрямом є модернізація електричних мереж, включаючи впровадження «розумних» енергетичних систем (smart grids), які дозволяють здійснювати оперативний моніторинг, прогнозування та автоматизоване управління потоками електроенергії. Це забезпечує більш ефективне балансування попиту і пропозиції, зменшення втрат та підвищення надійності енергопостачання в умовах зростання частки відновлюваної енергетики.

Економічний аспект розвитку відновлюваних джерел енергії є одним із ключових чинників трансформації сучасного електроенергетичного ринку. Поступове зростання частки ВДЕ сприяє формуванню нових організаційно-економічних моделей функціонування галузі, серед яких важливе місце займає розподілена генерація. Вона передбачає виробництво електроенергії безпосередньо поблизу споживача, що знижує втрати в мережах, підвищує енергетичну ефективність та сприяє децентралізації енергетичної системи. Важливим елементом нової ринкової архітектури є розвиток енергетичних кооперативів та локальних енергетичних спільнот, які дозволяють об'єднувати ресурси домогосподарств, підприємств і громад для спільного виробництва та споживання «зеленої» електроенергії. Це не лише підвищує доступність відновлюваної енергії, але й стимулює участь широкого кола економічних суб'єктів у енергетичному ринку.

Суттєву роль у розвитку ВДЕ відіграють також економічні стимули, зокрема механізми «зелених» тарифів та аукціонів підтримки. Вони забезпечують прогнозованість доходів для інвесторів, знижують ризики реалізації проєктів та створюють сприятливі умови для залучення приватного капіталу. У результаті відбувається активізація інвестиційної діяльності та прискорення впровадження інноваційних технологій у секторі електроенергетики. Екологічний ефект розвитку відновлюваної енергетики проявляється у зменшенні залежності від викопного палива, що безпосередньо сприяє скороченню викидів діоксиду вуглецю та інших шкідливих речовин в атмосферу. Це позитивно впливає на якість повітря, знижує рівень екологічних ризиків та покращує загальний стан довкілля. У довгостроковій перспективі масштабне впровадження ВДЕ є важливим інструментом досягнення цілей кліматичної нейтральності, визначених міжнародними угодами, та формування стійкої моделі енергетичного розвитку, орієнтованої на екологічну безпеку та сталий економічний розвиток.

Отже, ВДЕ є ключовим чинником трансформації електроенергетичного сектору, забезпечуючи його екологізацію, децентралізацію та технологічне оновлення. Попри наявні виклики, пов'язані з нестабільністю генерації та необхідністю модернізації інфраструктури, їх подальший розвиток є невід'ємною умовою формування стійкої, безпечної та конкурентоспроможної енергетичної системи. У довгостроковій перспективі інтеграція ВДЕ сприятиме підвищенню енергетичної незалежності, зниженню екологічного навантаження та переходу до моделі сталого енергетичного розвитку.

Список використаних джерел

1. Королюк Т. О. Звєрєвич Ю. О. Державна політика розвитку відновлювальної енергетики в Україні. *Державне будівництво*. 2024. № 2 (360). С. 83-99. DOI: https://doi.org/10.26565/1992-2337-2024-2-06.

2. Мельник Л. Г., Карінцева О. І., Пархоменко Д. В., Кубатко О. В., Завдов'єва Ю. М. Еколого-економічні аспекти переходу України на «зелену» енергетику в умовах воєнного стану. *Київський економічний науковий журнал*. 2025. № 8. DOI: 10.32782/2786-765X/2025-8-23.

3. Про альтернативні джерела енергії: Закон України від 20.02.2003 № 555-IV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text.

Kateryna Kozak
Associate Professor,
PhD in Electrical Engineering, TNTU
Sustainability Products Specialist, Schréder
Mykola Tarasenko
Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department
of Electrical Engineering, TNTU

SOLAR ROAD LIGHTING AS AN ENERGY SAVING STRATEGY: LIFE CYCLE CO_2 EVIDENCE FOR LOWER GRID DEMAND AND CLIMATE IMPACT

Abstract: *This paper presents a comparative cradle to grave Life Cycle Assessment of a stand alone solar road luminaire and two grid connected alternatives. The study demonstrates how LCA can support energy saving decisions by linking operational electricity demand, grid dependence and life cycle CO_2 emissions.*

Keywords: *life cycle assessment, energy saving, road lighting, solar luminaire, grid electricity, CO_2 emissions.*

Public road lighting is a permanent electricity consuming infrastructure. It operates every night, remains in service for many years and is commonly replicated across thousands of installations. Therefore, energy saving in road lighting should not be reduced only to LED efficacy or driver efficiency. A broader European approach has to assess whether the complete lighting system can reduce supplied electricity demand, relieve pressure on the grid and lower environmental impacts over its service life. This is also important because grid infrastructure is a critical condition for secure energy transitions [2]. In lighting, the next technological development is increasingly connected with efficiency, smart operation, long lifetime and circularity [1].

Life Cycle Assessment is useful because it prevents a narrow interpretation of energy efficiency. A product may reduce operational electricity use but require more materials, electronics or maintenance. Conversely, a product with low production impact may create high climate impact if it depends on grid electricity for decades. LCA therefore addresses the engineering question of whether an energy saving solution remains environmentally beneficial when manufacturing, transport, use and end of life are considered together. This is particularly relevant for stand alone solar lighting, where photovoltaic modules and batteries shift part of the environmental burden from the use phase to the production phase.

The study compares three Schréder road lighting products: the solar luminaire Sunaria and two grid connected alternatives, Izylum 2 and Izylum Neo 2. The products were selected to represent comparable road lighting functions and similar application conditions. The assessment follows ISO 14040 and ISO 14044 principles and is aligned with EN 15804:2012+A2:2019 and the PEP ecopassport PCR framework [3]. The system boundary covers A1 to A3 manufacturing, A4 to A5 transport and installation, B6 operational energy use, and C2 to C4 end of life. Operational electricity for the grid connected luminaires was modelled using an average European grid mix.

The results show a clear life cycle trade off. In A1 to A3, Sunaria has higher embodied emissions: 178.07 kg CO_2 eq compared with 36.24 kg CO_2 eq for Izylum 2 and 35.38 kg CO_2 eq for Izylum Neo 2. This is expected because the solar option integrates local electricity generation and storage into the product system. It is not only a lighting device, but also a compact autonomous energy

supply system. If only the production stage were assessed, the solar option would appear less favourable, because the energy saving mechanism during use would be ignored.

The decisive difference appears in B6. Sunaria has zero operational grid electricity emissions because it operates independently from the electricity network. The grid connected alternatives accumulate 777.89 and 800.30 kg CO_2 eq during the use phase, which dominates their cradle to grave profiles. From A1 to C4, Sunaria reaches 191.96 kg CO_2 eq compared with 820.75 kg CO_2 eq for Izylum 2 and 839.26 kg CO_2 eq for Izylum Neo 2. The corresponding reductions are 76.61% and 77.13%. Thus, the energy saving effect is expressed both as avoided lifetime grid electricity and as a lower total carbon footprint.

Module D was calculated separately as supplementary information beyond the core system boundary. When reuse, recovery and recycling potential are included, the reduction reaches 85.61% compared with Izylum 2 and 85.94% compared with Izylum Neo 2. Although Module D is not part of the core A1 to C4 result, it is relevant for European energy saving strategies because circular design, recoverable materials and responsible end of life management influence the long term performance of energy infrastructure [4].

For Ukraine and wider European practice, the study supports a pragmatic conclusion. Energy saving strategies in lighting should include not only efficient components, but also system configurations that reduce dependence on supplied electricity where this is technically justified. Solar road lighting is not universal, because performance depends on solar resource, battery sizing, maintenance quality and service life. However, when these conditions are properly engineered, it can contribute to lower grid demand, improved local resilience and measurable reduction of life cycle climate impact. This conclusion is consistent with earlier comparative LCA work on grid connected and stand alone solar street lighting [5]. The scientific value of the comparison is methodological: LCA translates energy saving from a general intention into measurable evidence. In road lighting and electrical supply systems, robust decisions should combine low operational electricity demand, transparent material impacts and credible environmental communication.

References

1. International Energy Agency. (2026). The next wave of LED lighting: Smarter, circular and more efficient. IEA, Paris.
2. International Energy Agency. (2023). Electricity Grids and Secure Energy Transitions. IEA, Paris.
3. PEP ecopassport Programme. (2021). Product Category Rules for Electrical, Electronic and HVAC R Products. PCR ed4 EN 2021 09 06.
4. Stucki, M., Gotz, M., de Wild-Scholten, M., & Frischknecht, R. (2024). Environmental Life Cycle Assessment of Electricity from PV Systems: 2023 Data Update. IEA PVPS Task 12.
5. Tannous, S., Manneh, R., & Harajli, H. (2018). Comparative life cycle assessment of grid connected and solar stand alone street lighting: a case study for rural areas in Lebanon. Journal of Cleaner Production, 186, 963 to 977.

Оксана Маєвська
к.б.н., доцент
Павло Скороход
аспірант
Андрій Мокрицький
асистент
Національний лісотехнічний університет України

НАПРЯМИ ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ЦУКРОВІЙ ГАЛУЗІ

Анотація. *Проаналізовано основні напрями покращення енергозбереження, які передбачають модернізацію окремих етапів технологічних процесів, встановлення біогазової установки та отримання біогазу, а також впровадження теплового пінч-аналізу на підприємствах цукрової галузі. Зазначено, що кожен з цих напрямів впливає на посилення енергоефективності. Відмічено, що запровадження оборотної системи водокористування приводить до зниження роботи енергоємного обладнання та значної економії електроенергії та фінансів. Вказано, що монтаж біогазової установки є технологічно складним процесом, який повинен врахувати можливість цілорічної роботи цієї споруди і використання інших джерел біомаси, окрім тих, що формуються на цукровому заводі. Наголошено на важливості впровадження нових методологій, таких як тепловий пінч-аналіз, який дозволяє інтегрувати теплові процеси різних етапів технологічного циклу виробництва цукру-піску.*

Ключові слова: *цукрова галузь, біогазова установка, стічні води, тепловий пінч-аналіз.*

У сучасних реаліях, спричинених повномасштабною війною в Україні, кризою енергетичного світового ринку проблеми зниження споживання енергії та пошуки можливостей використання альтернативних джерел, насамперед відновних, сприяють безперебійній роботі підприємств та їхній енергонезалежності.

Цукрова галузь, як один із секторів харчової промисловості, важливість якої та вклад в економіку України зріз в останні роки, прагне переорієнтувати роботу своїх підприємств під сучасні виклики, які стосуються зокрема й підвищення енергоефективності. Одним із шляхів цього є така модернізація технологічного процесу, яка позначиться на роботі енергоємного обладнання. Так, впровадження оборотної системи водокористування на Хоростівському цукровому заводі, яке відноситься до компанії «Радехівський цукор» – ключового виробника цукру в Україні, привело до значного зниження витрат електроенергії на водопостачання (орієнтовно 70–80%) [1]. Скорочення часу роботи насосів, що викачували воду з річки, та водопідіймального обладнання позначається на економії електроенергії приблизно в 200–300 тис. кВт·год за сезон. За 2019-2024 роки економія коштів за цією статтею становила 300-500 тис. гривень на рік. Варто зазначити, що зниження навантаження на обладнання подовжує тривалість його роботи і зменшує витрати на ремонти.

Для підприємств переробної промисловості, які працюють із біосировиною, проведення технологічних циклів переробки сировини і отримання основної продукції супроводжується утворення залишків різного походження – деревинних чи пожнивних, які використовуються як біомаса для забезпечення енергетичних потреб підприємства [2]. У випадку цукрових заводів такою вторинною біомасою може бути жом цукрових буряків. Повноцінне функціонування біогазових установок на підприємствах цукрової галузі буде рентабельним тоді, коли споруда працюватиме безперебійно, а не тільки у сезон переробки цукрових буряків, яка триває чотири місяці [3]. Тому важливим є передбачити поступання біомаси із інших джерел, які розташовані поблизу цукрового заводу., а також патока та

дефекат. Окремо варто розглянути можливість використання в біогазових установках низько- та висококонцентрованих стічних вод, які характеризуються високим рівнем хімічного та біохімічного споживання кисню, підвищення концентрацій завислих речовин та біогенних елементів (нітрогену загального й аміачного та фосфору). Саме таку установку передбачається монтувати на одному з підприємств компанії «Радехівський цукор». Вона буде частиною технологічного процесу біологічного очищення стічних вод. Система анаеробного очищення й отримання біогазу включає такі споруди: гідролізер, анаеробний реактор, дегазатор, ламельний відстійник, когенератор та високотемпературний пальник. На анаеробне очищення подаватимуться стічні води II категорії після механічного зневоднення осаду (об'єм – 142 м^3/год та висококонцентровані стічні води вода III категорії (об'єм – 5 м^3/год). Після анаеробного очищення спостерігається значне зниження органічних сполук у стічних водах, а кінцевою сполукою є метан як основна сполука у складі біогазу. Його накопичення відбувається у внутрішньому об'ємі реактора між рівнем води і газонепроникною покрівлею біогазової установки. Безпечне спалювання надлишку біогазу відбувається в зовнішньому газовому пальнику.

Перспективним напрямом є й застосування теплового пінч-аналізу, особливо у поєднанні його із водним пінч-аналізом [4]. Така синергія спричинена, з одного боку, наявністю специфічного обладнання (випарювачів, вакуум-конденсаторних установок, теплообмінників), а з іншого - формуванням великих об'ємів нагрітих вод, теплова енергія яких може бути перенаправлена на нагрівання холодних потоків у технологічному процесі виготовлення цукру (наприклад, дифузійного соку). Така інтеграція допомагає не тільки повторно використовувати теплообмінні води, але й дозволяє знизити витрату енергоресурсів, що позитивно впливає на енергоефективність роботи підприємства.

Висновки

Аналіз напрямів покращення енергозбереження в цукровій галузі показав, що вони стосуються удосконалення управління нагрітими (впровадження оборотної ситеми водокористування) та стічними водами (використання їхнього анаеробного біологічного очищення для отримання біогазу), а також залучення інтеграції теплових процесів і водного пінч-аналізу (застосування тепла нагрітих вод для підігрівання холодних потоків). Впровадження одного або кількох напрямів дасть змогу підвищити енергоефективність підприємств цукрової галузі та посилити екологічну орієнтованість завдяки залученню «зелених» технологій.

Список використаних джерел

1. Skorokhod, P., Mayevska, O. (2025). Assessing the efficiency of water reuse at Khorostkiv sugar factory. Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science. 29(4). 49-59. doi.org/10.56407/bs.agrarian/4.2025.49/

2. Kasinath, A., Fudala-Ksiazek, S., Szopinska, M., Bylinski, H., Artichowicz, W., Remiszewska-Skwarek, A., Luczkiewicz, A. (2021). Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 150. doi.org/10.1016/j.rser.2021.111509.

3. Hontaruk, Ya., Furman, I., Bondarenko, V., Riabchyk, A., & Nepochatenko, O. (2024). Production of biogas and digestate at sugar factories as a way of ensuring the energy and food security of Ukraine. Politika Energetyczna – Energy Policy Journal, 27(2). 195-210. doi:10.33223/epj/185210.

4. Valencia, A.F.R. & Lopez Yu. (2024). Thermal integration in sugar production using pinch analysis. Ingeniería y Competitividad, 26(3), 1-22. doi:10.25100/iyc.v26i3.14315.

Мончук М.І.
Здобувач РВО бакалавр
Кшивецький Б.Я.
д.т.н., професор
НЛТУ України
Кіндзера Д.П.
к.т.н., доцент
НУ «Львівська політехніка»

СУЧАСНІ МЕТОДИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД У СИСТЕМАХ ОЧИЩЕННЯ СТОКІВ

Анотація. *Розглянуто перспективні напрями енергетичної утилізації осадів стічних вод (ОСВ) як відновлюваного джерела енергії. Показано, що перспективним напрямом енергетичної утилізації ОСВ є анаеробне зброджування з отриманням біогазу. Проаналізовано можливості отримання синтез-газу та твердого альтернативного палива. Показано, що впровадження таких технологій сприяє зменшенню обсягів відходів, підвищенню енергоефективності та зниженню екологічного навантаження на довкілля.*

Ключові слова: *осади стічних вод, енергетична утилізація, біогаз, анаеробне зброджування, піроліз, газифікація, альтернативне паливо, енергоефективність.*

Ситуація з накопиченням значних обсягів осадів стічних вод (ОСВ), які утворюються після механічного, фізико-хімічного та біологічного очищення комунальних і промислових стоків на очисних спорудах, характеризується як критична та загрозлива для екології [1]. ОСВ потребують значних площ для зберігання, а також створюють ризики вторинного забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод та атмосферного повітря Тому особливого значення набуває впровадження сучасних технологій обробки та енергетичної утилізації ОСВ, що відповідають принципам ресурсозбереження, декарбонізації та циклічної економіки.

Проаналізовано перспективні технологічні рішення щодо залучення ОСВ до виробництва газоподібного та твердого палива. Як показав аналіз джерел літератури [1–3], одним із найбільш перспективних напрямів енергетичної утилізації є анаеробне (безкисневе) зброджування осадів у метантенках біогазових установок. Для такого процесу найбільш придатними є первинні осади, надлишковий активний мул та змішані осади після біологічного очищення стічних вод підприємств харчової промисловості, тваринницьких і птахівничих комплексів, цукрових та спиртових заводів, а також міських очисних споруд. Такі осади характеризуються високим вмістом органічної речовини, значною концентрацією біодеградабельних компонентів та високим біогазовим потенціалом, що забезпечує ефективність процесів анаеробного зброджування.

На рис. 1 представлена принципова технологічна схема очищення стічних вод із залученням осадів до анаеробної переробки у метантенку для виробництва біогазу. Схема відображає послідовність основних стадій очищення стічних вод, обробки осадів та отримання енергетичних продуктів.

Світовий досвід використання анаеробної переробки ОСВ свідчить про рентабельність та перспективність її впровадження. В Україні технології анаеробної переробки осадів використовуються обмежено, хоча мають значний потенціал для подальшого розвитку.

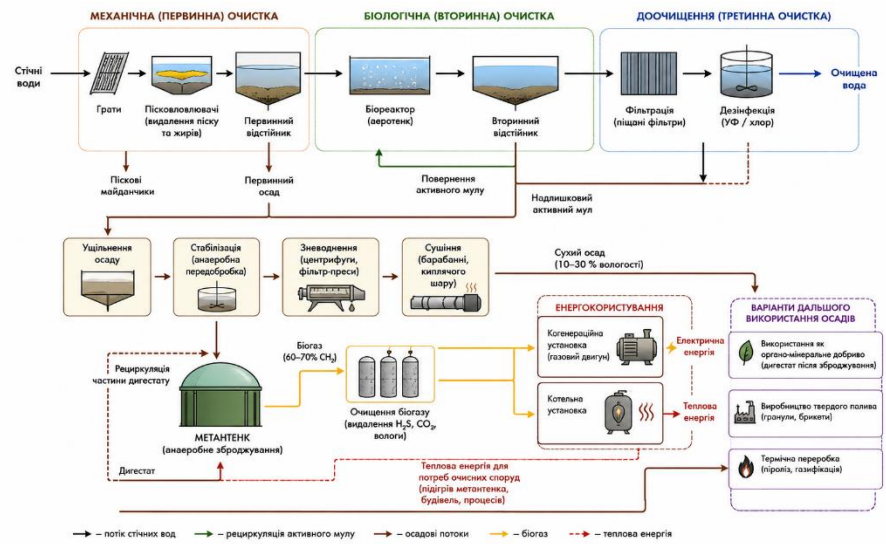


Рисунок 1 – Технологічна схема очищення стічних вод із залученням надлишкового мулу та осадів до анаеробної переробки у метантенку для виробництва біогазу

Анаеробна переробка дозволяє стабілізувати осад та одночасно отримувати біогаз – відновлюване паливо, основним компонентом якого є метан у кількості 60–70 % CH_4. Біогаз може використовуватися для виробництва як електричної, так і теплової енергії, що знижує залежність очисних споруд від зовнішніх джерел енергії [1]. Під час спалювання біогазу у газотурбінних установках або когенераційних модулях виробляється електроенергія для живлення насосів, компресорів та іншого обладнання очисних споруд. Теплова енергія, що утворюється при цьому, може використовуватися для підтримання температурного режиму метантенків, підігріву води та інших технологічних процесів. Можливою є передача надлишків енергії споживачам виробничого сектору. Одночасно з цим дигестат, який є залишковим продуктом процесу зброджування, після додаткової стабілізації та контролю вмісту важких металів, може використовуватися як органо-мінеральне добриво, що додатково підвищує ресурсну ефективність технології.

Використання анаеробної переробки осадів стічних вод (ОСВ), незважаючи на значний енергетичний та екологічний потенціал технології, стримується низкою технологічних, економічних і організаційних чинників. Одним із основних стримуючих факторів є висока капіталомісткість процесу, оскільки будівництво метантенків, систем підготовки осаду, очищення біогазу, когенераційних установок та допоміжного обладнання потребує значних інвестиційних витрат.

Перспективним напрямом є також термічна переробка ОСВ методом піролізу або газифікації [4]. Для таких процесів найбільш придатними є попередньо зневоднені та висушені осади з низькою вологістю, оскільки надлишковий вміст води знижує енергетичну ефективність термічної переробки. Під час піролізу органічна частина ОСВ за відсутності кисню перетворюється на піролізний газ, рідкі паливні фракції та твердий карбонізований залишок. Газифікація дозволяє отримувати синтез-газ, який містить водень, оксид вуглецю та метан і може використовуватися як паливо для виробництва теплової та електричної енергії.

Іншим перспективним напрямом є виробництво твердого альтернативного палива з ОСВ [5, 6]. Для цього використовують механічно зневоднені на фільтр-пресах або центрифугах та подалі термічно висушені у барабанних, стрічкових чи сушарках киплячого шару осади, які після зниження вологості характеризуються теплотворною здатністю близько

14…17 МДж/кг. Після гранулювання або брикетування висушені ОСВ можуть використовуватися у вигляді паливних гранул чи брикетів для котельних установок, теплоелектростанцій або сміттєспалювальних комплексів. Особливо перспективним є їх використання у цементній промисловості, де високотемпературний режим печей забезпечує повне згоряння органічної складової та нейтралізацію небезпечних компонентів.

Для покращення енергетичних характеристик та стабільності горіння ОСВ можуть застосовуватися у суміші з іншими видами біомаси, деревними відходами, тирсою, соломою або твердими побутовими відходами. Це дозволяє підвищити теплотворну здатність паливної композиції, знизити вологість та покращити механічну міцність паливних гранул чи брикетів.

Висновки

Осади стічних вод є перспективним відновлюваним джерелом енергії, яке може ефективно використовуватися для виробництва газоподібного та твердого палива. Найбільш перспективними напрямами енергетичної утилізації ОСВ є анаеробне зброджування з отриманням біогазу, термічна переробка методом піролізу та газифікації, а також виробництво твердого альтернативного палива із висушених осадів.

Встановлено, що первинні осади, надлишковий активний мул та змішані осади після біологічного очищення найбільш придатні для анаеробного зброджування, тоді як попередньо зневоднені та висушені осади доцільно використовувати для піролізу, газифікації та виробництва паливних гранул.

Енергетична утилізація осадів стічних вод дозволяє скоротити обсяги накопичення відходів, знизити екологічне навантаження на довкілля, зменшити споживання традиційних енергоресурсів та підвищити енергонезалежність комунальних підприємств відповідно до сучасних принципів ресурсоефективності та сталого розвитку.

Список використаних джерел

1. Кравченко В. І. Застосування осадів стічних вод для підвищення енергоефективності роботи комунальних очисних споруд. Таврійський науковий вісник. Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології, 2025, № 4, частина 2, С. 236-242. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.4.2.25

2. Виробництво біогазу. URL: https://iknet.com.ua/uk/article/biogas-production

3. Скрильник Є.В., Кутова А.М., Гетманенко В.А. Вплив анаеробного зброджування органічних відходів на зміну вмісту біогенних елементів у ефлюенті біогазової установки. Вісник аграрної науки. 2020, №3 (804), С. 71-76.

4. Travaglino A., Morrone B., Zaccariello L., 2025, Preliminary Investigation on the Sewage Sludge Gasification: Reactor and Operating Parameters Optimization, Chemical Engineering Transactions, 119, 127-132.

5. Кравченко В.І., Білоус Ю.В., Кравченко В.П. Створення та обґрунтування композитного палива на основі осаду стічних вод. Технічні науки. Херсон: ХДАЕУ. 2023. №3. С. 88–94. URL: http://journals.ksauniv.ks.ua/index.php/tech/article/view/40

6. Pereira A.B., Zanuncio A.J.V., Carvalho A.G., de Cassia Oliveira Carneiro A., de Castro V.R., Carvalho A.M.M.L., Lopes O.P., Branco-Vieira M., Ferreira M.V., de Assunção R.M.N., et al. Sustainable Solid Biofuel Production: Transforming Sewage Sludge and *Pinus* sp. Sawdust into Resources for the Circular Economy. *Sustainability*, 2024, *16,* 4554. https://doi.org/10.3390/su16114554

Nechytailo Yuliia,
PhD, Assoc. Prof.
State Biotechnological University

ANALYSIS OF THE IMPACT OF DIGITAL TECHNOLOGIES ON WORKING CONDITIONS AND SAFETY IN THE ENERGY INDUSTRY

Abstract: *The impact of digital technologies on the working conditions and safety of personnel in the energy sector is studied. The role of automated control systems, digital monitoring platforms and remote access technologies in reducing production risks is analyzed. The main advantages of digitalization are identified, in particular, reducing the impact of hazardous factors, increasing the efficiency of equipment condition monitoring and the speed of response to emergencies. New challenges associated with cyber threats, increased psycho-emotional stress and the need to improve personnel skills are outlined. The feasibility of a comprehensive approach to ensuring occupational safety in the context of the digital transformation of the energy sector is substantiated.*

Keywords: *Digitalization, energy, occupational health and safety, SCADA, cybersecurity, automation.*

The current stage of the energy industry's evolution is inextricably linked to large-scale digital transformation, which serves as the fundamental basis for implementing the concept of smart energy systems and integrating the principles of the Fourth Industrial Revolution. The active and widespread implementation of end-to-end digital technologies, including automated dispatch control systems, the Industrial Internet of Things, predictive big data analytics, and intelligent continuous monitoring platforms, is fundamentally transforming the traditional architecture of production processes. These processes are driven by the global transition to decentralized generation and the need for real-time capacity balancing. These technological innovations contribute to a significant increase in the energy efficiency of generation and distribution facilities, the minimization of process losses, and a manifold increase in the efficiency of network operation mode management. At the same time, they are initiating a profound, multi-layered transformation of the working conditions of service personnel [2; 5].

The key vector of change in the nature of production activity lies in the large-scale transition from direct physical interaction with power equipment to predominantly cognitive, informational, and analytical work carried out through integrated human-machine interfaces and complex software systems. This paradigm shift creates fundamentally new, heightened demands on the professional training of specialists, requiring the development of abstract thinking, a high level of digital competence, and the ability to quickly adapt to the increasingly complex automation of work processes. At the same time, the reliability of power facilities is becoming increasingly dependent on the correctness of software algorithms, the throughput and stability of the communications infrastructure, and the overall security of information systems, which has a direct determining effect on the basic level of technosphere safety in the production environment [3].

Under these circumstances, the issue of ensuring safe working conditions during the combined operation of high-voltage power equipment and the latest cyber-physical control systems is acquiring particular scientific and practical significance. The specific nature of modern technological processes is such that any latent errors in automated system algorithms, telemetry transmission failures, or cybersecurity compromises can trigger cascading emergencies, creating an unpredictable threat to the lives and health of production personnel. In this context, basic occupational safety regulations continue to play a fundamental, yet increasingly controversial, role, particularly conservative rules

for the safe operation of electrical installations, which strictly regulate procedures for physical access, work permit issuance, and visual inspection of equipment technical condition [4]. Currently, there is an objective and progressive lag between the traditional regulatory framework, focused on analog systems, and the pace of innovation, necessitating a conceptual revision of safety regulations, shifting from static to dynamic risk assessment models.

The digitalization of the energy sector inevitably creates new categories of occupational risks, requiring detailed scientific analysis and the development of adequate countermeasures. These primarily include targeted cyberattacks on critical information infrastructure (e.g., false data injections), which can disorient operators and disrupt the normal operation of hardware safety interlocks. Secondly, researchers are documenting a sharp increase in the psychophysiological load on control and operational personnel, which is due to the need for continuous cognitive control over colossal amounts of incoming data from hundreds of subsystems in real time. Recent research confirms that permanent information overload and the need to simultaneously process multiple emergency signals act as a powerful catalyst for technostress, depleting cognitive reserves, negatively impacting concentration, increasing the latency of psychomotor reactions, and greatly increasing the likelihood of critical errors caused by the notorious human factor [1; 3].

At the same time, the deep integration of advanced digital solutions opens up unprecedented prospects for a fundamental shift from the traditional reactive risk management model to proactively improving industrial safety and systematically minimizing injuries at enterprises. The use of extensive Industrial Internet of Things networks, in close synergy with the concept of multidimensional digital twins, enables highly accurate, continuous remote monitoring of the technical condition of critical power equipment in real time. This high-tech approach makes it possible to identify hidden degradation defects, such as abnormal microvibrations of rotor mechanisms, localized thermal overheating of contact connections, acoustic deviations, or the initial stages of partial discharges in insulation, at the earliest stages of their development. Timely identification and intelligent analysis of such hardware and physical anomalies enable operating organizations to implement scientifically and economically sound predictive maintenance strategies. This completely eliminates the risk of sudden catastrophic failures of high-voltage equipment, accompanied by an uncontrolled energy release and posing a direct threat to the lives of operating personnel. The conceptual design, hierarchical architecture of information links, and general operating algorithm of such integrated hardware and software solutions are clearly demonstrated in the generalized structural diagram (Fig. 1).

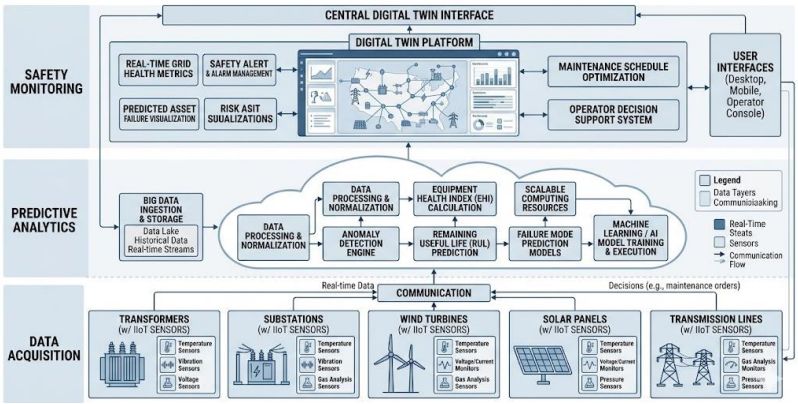


Figure 1 – Architecture diagram of an intelligent safety management system for a modern power grid (generated by AI)

The architecture of the intelligent safety management system is built on a multi-level hierarchical principle and includes several key functional blocks that are continuously engaged in information exchange. At the basic (field) level, continuous data collection occurs through an extensive network of smart sensors integrated directly into power equipment nodes. The resulting arrays of primary raw information are transmitted to a cloud or peripheral predictive analytics module, where complex neural network algorithms and machine learning methods are used to identify hidden patterns of physical deterioration and probabilistically predict potential failures. The final results of high-performance computing are transmitted to the central safety monitoring interface, implemented as an interactive digital twin, which provides operational personnel with a visualized, ergonomically structured metric of the technospheric safety status of the entire facility in real time [5]. This structural-analytical approach reduces the likelihood of sudden, fatal equipment failures and the accompanying severe man-made incidents to an absolute minimum. Moreover, the widespread automation of routine operations and the introduction of remotely controlled robotic systems for inspecting high-risk areas radically reduce the need for direct human presence in aggressive production environments, completely mitigating the impact of hazardous production factors on the worker's body [2; 5].

To summarize, it can be concluded that the impact of digital technologies on working conditions and safety in the energy sector is clearly dualistic, multidimensional, and dialectical. On the one hand, the large-scale deployment of smart systems and intelligent predictive analytics tools creates a highly reliable technological foundation for radically reducing industrial injuries and increasing the overall predictability of complex power grids. On the other hand, the intensive development of cyber-physical production environments is giving rise to previously unknown, hidden threats in the form of critical cyber vulnerabilities and severe cognitive overload for control personnel. This systemic contradiction requires the immediate implementation of a comprehensive, interdisciplinary approach to occupational safety management, based on a harmonious synthesis of advanced technological solutions, a promptly modernized regulatory framework, and innovative programs for in-depth psychological support and continuous professional adaptation for energy industry specialists [1; 2; 5].

References

1. Berger S. Digital technologies in the industrial sector: technology-driven threats and opportunities. Bayreuth, 2020. URL: https://epub.uni-bayreuth.de/4940/

2. Digitalisation and energy. Paris: OECD Publishing, 2023. URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2017/11/digitalization-energy_g1g85139/9789264286276-en.pdf

3. European Agency for Safety and Health at Work. Digital technologies at work and psychosocial risks: evidence and implications for occupational safety and health. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. URL: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0537e526-8b6d-11ef-a67d-01aa75ed71a1/language-en

4. NPAOP 40.1-1.21-98. Rules for the safe operation of electrical installations of consumers. Kyiv: State Service for Occupational Safety and Health of Ukraine, 1998. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98

5. Smart systems and safety 4.0: a systematic review of technologies enhancing safety decision-making in Industry 4.0 // Results in Engineering. 2026. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123026003713

Нечитайло Ю.А.
к.т.н., доц.
Зміївський Д.А.
здобувач РВО бакалавр
Державний біотехнологічний університет

3D-ДРУК ОПТИМІЗОВАНИХ КОМПОНЕНТІВ МІКРО-ГЕС ТА ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ.

Анотація: *Розглянуто сучасні підходи до підвищення ефективності систем теплопостачання на основі впровадження автоматизованих систем керування, цифрового моделювання та адитивних технологій. Обґрунтовано доцільність інтеграції децентралізованих джерел енергії та інтелектуальних систем управління*

Ключові слова: *автоматизовані системи керування, теплопостачання, енергоефективність, мікромережі, 3D-друк, CFD.*

Сучасні виклики енергетичній безпеці та необхідність забезпечення стійкості критичної інфраструктури вимагають переосмислення підходів до організації систем теплопостачання. Особливої актуальності це питання набуває в умовах переходу до децентралізованих енергетичних систем, зокрема мікромереж (microgrids), які здатні забезпечувати автономне функціонування енергетичних об’єктів.

Важливим напрямом розвитку є інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як мікро-гідроелектростанції та малі вітроелектростанції. Проте їх ефективність значною мірою залежить від природних умов, зокрема швидкості вітру або параметрів водного потоку. Це обумовлює необхідність застосування сучасних інженерних підходів, серед яких провідне місце займають автоматизовані системи керування та цифрове моделювання [3, 4]. Концептуальна схема функціонування децентралізованої енергетичної системи, що поєднує генерацію, управління та виробництво компонентів, наведена на рис. 1.

Ключову роль у підвищенні ефективності таких систем відіграє створення цифрових двійників енергетичного обладнання на основі CAD/CAE-моделювання, що дозволяє оптимізувати параметри роботи систем ще на етапі проектування. При розробці турбін для умов низьких швидкостей потоку важливим є вибір оптимального профілю лопаті це забезпечує високий коефіцієнт підйомної сили при малих числах Рейнольдса [3]. Наступним етапом є оптимізація геометричних параметрів (кручення та хорда лопаті). Використання сучасних інструментів моделювання дозволяє створювати складні просторові форми, що забезпечують ефективну роботу кожного сегмента лопаті. Результати чисельного моделювання процесів обтікання робочих поверхонь наведені на рис. 2.

Застосування методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) дає змогу визначити розподіл тиску та швидкостей потоку, що, у свою чергу, дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії турбіни на 15–20% порівняно з традиційними рішеннями [4].

Рисунок 1 – Екосистема децентралізованої мережі в дії

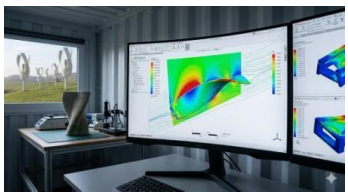


Рисунок 2 – Результати CAE-симуляції потоку навколо 3D-друкованої лопаті

Важливим елементом реалізації інноваційних рішень є адитивні технології виробництва. 3D-друк дозволяє виготовляти складні геометричні конструкції без необхідності використання дорогого технологічного оснащення. Приклад процесу виготовлення елементів турбіни наведено на рис. 3.

Рисунок 3 – Великогабаритний 3D-принтер друкує складну турбіну в мобільному контейнері

Застосування полімерних та композитних матеріалів, зокрема PETG, ASA та армованих волокном полімерів, забезпечує необхідну міцність і довговічність елементів конструкції [1, 2]. Крім того, можливість формування внутрішньої структури (infill) дозволяє створювати легкі, але достатньо жорсткі конструкції, що зменшує інерційність турбін і покращує їх пускові характеристики [2]. Експериментальна перевірка ефективності запропонованих рішень включає як аеродинамічні, так і механічні випробування. Випробування в аеродинамічній трубі підтверджують відповідність експериментальних даних результатам чисельного моделювання, що свідчить про високу достовірність застосованих методів [4]. Приклад експериментального стенда наведено на рис. 4.

Рисунок 4 – Екосистема децентралізованої мережі в дії

Паралельно з аеродинамічними дослідженнями проводяться комплексні механічні випробування, спрямовані на оцінювання міцності та довговічності конструктивних елементів. У ході таких досліджень лопаті турбін піддаються як статичним, так і динамічним навантаженням, що моделюють реальні умови експлуатації, включаючи вплив відцентрових сил, вітрових поривів або змін гідродинамічного тиску. Особлива увага приділяється аналізу напружено-деформованого стану матеріалів, а також дослідженню їхньої втомної міцності при тривалому циклічному навантаженні. Отримані результати свідчать про те, що навіть за умов зменшеної маси конструкції, досягнутої завдяки використанню оптимізованих внутрішніх структур та адитивних технологій, забезпечується необхідний рівень надійності, жорсткості та експлуатаційної стійкості виробів [2]. Це підтверджує доцільність застосування

інноваційних підходів до проєктування і виготовлення елементів енергетичних установок малої потужності.

Інтеграція автоматизованих систем керування з децентралізованими джерелами енергії формує основу для створення інтелектуальних систем теплопостачання нового покоління. Такі системи функціонують на засадах безперервного збору та аналізу даних щодо параметрів роботи обладнання, що дозволяє оперативно реагувати на зміну зовнішніх і внутрішніх умов функціонування. Завдяки використанню сучасних алгоритмів обробки даних і прогнозування забезпечується адаптація режимів роботи до змін температури навколишнього середовища, навантаження споживачів та доступності енергетичних ресурсів. У результаті досягається оптимізація процесів споживання енергії, зниження втрат та підвищення загальної ефективності функціонування системи. Водночас автоматизація сприяє підвищенню надійності роботи теплопостачання, оскільки дозволяє своєчасно виявляти відхилення у роботі обладнання, попереджати аварійні ситуації та забезпечувати стабільність енергозабезпечення навіть в умовах нестабільності зовнішніх джерел енергії.

З економічної точки зору, впровадження адитивних технологій у поєднанні з автоматизованими системами керування відкриває широкі можливості для оптимізації витрат на створення та експлуатацію енергетичних установок. Відсутність потреби у виготовленні складного та дорогого технологічного оснащення, характерного для традиційних методів виробництва, дозволяє суттєво знизити капітальні витрати. Крім того, скорочуються строки виготовлення компонентів, що є особливо важливим для оперативного впровадження енергетичних рішень у локальних умовах. Не менш значущою перевагою є підвищення ремонтопридатності обладнання, оскільки наявність цифрових моделей та 3D-принтерів дає змогу швидко відтворювати необхідні деталі безпосередньо на місці експлуатації. Сукупність цих факторів робить адитивні технології важливим інструментом розвитку децентралізованих енергетичних систем та підвищення їх економічної ефективності [1]. Поєднання автоматизованих систем керування, цифрового моделювання та адитивного виробництва формує нову парадигму розвитку систем теплопостачання. Такий підхід дозволяє забезпечити високу енергоефективність, надійність та екологічність енергетичних систем. Перспективи подальших досліджень полягають у розробці інтелектуальних алгоритмів керування, вдосконаленні матеріалів для 3D-друку та дослідженні довготривалої експлуатаційної надійності елементів енергетичних установок.

Список використаних джерел

1. Doroshenko Yu., Doroshenko O. Investigation of the possibilities of using 3D printing for the manufacture of elements of low-power wind turbines. Ventilation, lighting and heat and gas supply. 2021. Issue 38. P. 24–31. URL: https://knuba.edu.ua

2. Ali M. S., Al-Saffar A. S. Design and Manufacturing of Small Wind Turbine Blades by Using 3D Printing Technology. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2021. Vol. 44, No. 2. P. 364–373. URL: http://jmerd.net

3. Dhiliban S., Gopinath S., Seralathan S. Design and Analysis of Horizontal Axis Wind Turbine Blade for Low Wind Speed Applications. Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 33. P. 370–375. URL: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.739

4. Mostafa N. H., Ismaiel A. M., El-Sabbagh A. S. Design and performance evaluation of a 3D printed small scale wind turbine blade. Energy Reports. 2022. Vol. 8. P. 101–108. URL: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.019

Ю.А. Нечитайло
к.т.н., доц.,
М.М. Харченко
здобувач РВО бакалавр
Державний біотехнологічний університет

АГРОВОЛЬТАЇКА: ПОЄДНАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ІЗ СІЛЬСЬКИМ ГОСПОДАРСТВОМ

Анотація. *Розглянуто агровольтаїку як інноваційний підхід до поєднання сонячної енергетики та сільського господарства. Висвітлено принципи функціонування агровольтаїчних систем, їхні переваги щодо ефективного використання земельних ресурсів, впливу на мікроклімат і врожайність, а також економічні й екологічні аспекти. Окреслено основні виклики впровадження та перспективи розвитку цього напряму.*

Ключові слова: *агровольтаїка; сонячна енергетика; сільське господарство; відновлювані джерела енергії; фотогальванічні системи; сталий розвиток; ефективність використання земель; мікроклімат; врожайність; екологічна стійкість.*

Агровольтаїка є інноваційним напрямом розвитку відновлюваної енергетики, що передбачає одночасне використання земельних ресурсів для виробництва сільськогосподарської продукції та генерації електроенергії за допомогою сонячних панелей. Такий підхід розглядається як ефективний інструмент забезпечення сталого розвитку в умовах зростання глобального попиту на енергію, посилення кліматичних змін і обмеженості придатних для обробітку земель [2]. Особливої актуальності агровольтаїка набуває в контексті необхідності скорочення викидів парникових газів та переходу до низьковуглецевої економіки.

Сутність агровольтаїчних систем полягає у просторовому поєднанні фотогальванічних модулів із сільськогосподарськими культурами або тваринництвом. Панелі можуть бути розміщені на підвищених конструкціях або встановлені з певними інтервалами, що дозволяє забезпечити достатній доступ сонячного світла до рослин (рис. 1). Такий підхід дає змогу адаптувати систему до різних типів агровиробництва – від вирощування овочевих культур до використання пасовищ для тварин. При цьому відбувається формування специфічного мікроклімату, який впливає на температуру ґрунту, рівень вологості, швидкість вітру та інтенсивність випаровування [4]. Дослідження свідчать, що часткове затінення, створене сонячними панелями, може мати як позитивний, так і негативний вплив на врожайність залежно від типу культур, кліматичних умов і параметрів системи.

Рисунок 1 – Схема агровольтаїчної системи (поєднання сонячних панелей і сільськогосподарських культур)

Зокрема, у посушливих і напівпосушливих регіонах зменшення інсоляції сприяє збереженню вологи в ґрунті, зниженню теплового стресу рослин і навіть покращенню якості продукції. Деякі культури, такі як салати, шпинат або ягоди, демонструють підвищення врожайності в умовах помірного затінення. Водночас світлолюбні культури, наприклад кукурудза або пшениця, можуть демонструвати зниження продуктивності за умов недостатнього освітлення, що потребує ретельного підбору агротехнологій [1]. Агровольтаїка має значний економічний потенціал. Поєднання двох видів діяльності на одній території дозволяє підвищити ефективність використання земельних ресурсів і забезпечити додаткові джерела доходу для фермерських господарств. Виробництво електроенергії може компенсувати ризики, пов'язані з несприятливими погодними умовами, сезонними коливаннями врожайності та нестабільністю аграрних ринків. Більше того, агровольтаїчні системи можуть сприяти розвитку локальних енергетичних громад і підвищенню енергетичної незалежності регіонів [3].

Важливим аспектом є також екологічний вплив агровольтаїки. Використання таких систем сприяє зменшенню деградації ґрунтів, оскільки знижується рівень випаровування та ерозії. Крім того, зменшується потреба у водних ресурсах для зрошення, що є критично важливим у регіонах із дефіцитом води. Агровольтаїка також може сприяти збереженню біорізноманіття, створюючи нові середовища існування для різних видів рослин і тварин [2].

Разом із тим впровадження агровольтаїчних систем супроводжується низкою викликів. До них належать значні початкові інвестиції, складність технічного проєктування та необхідність адаптації нормативно-правової бази. Важливим є також питання інтеграції таких систем у вже існуючу інфраструктуру сільського господарства. Необхідно враховувати параметри розміщення панелей, їхню висоту, кут нахилу, орієнтацію відносно сонця, а також сумісність із сільськогосподарською технікою та процесами механізації [1].

Розвиток агровольтаїки потребує міждисциплінарного підходу, який поєднує знання з агрономії, енергетики, екології та економіки. Наукові дослідження у цій сфері спрямовані на оптимізацію параметрів систем, розроблення нових матеріалів для сонячних панелей, а також моделювання впливу агровольтаїчних установок на навколишнє середовище. Це дозволяє підвищити ефективність таких систем і розширити сфери їх застосування. Агровольтаїка є перспективним напрямом інтеграції енергетичних і аграрних технологій, що дозволяє підвищити ефективність використання земельних ресурсів, забезпечити стабільність аграрного виробництва та сприяти екологічній стійкості. Подальші дослідження у цій сфері мають бути спрямовані на вдосконалення технологічних рішень, зниження вартості впровадження та оцінку довгострокових економічних і екологічних ефектів [2; 3].

Список використаних джерел

1. Agrivoltaics for sustainable land use: A critical review of synergistic and antagonistic effects // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032125011554
2. A multidisciplinary view on agrivoltaics: Future of energy and agriculture // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124002387
3. Comprehensive evaluation of agrivoltaics research: Breadth, depth, and insights for future research // Energies. 2025. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/18/17/4776
4. Integration of crops, livestock, and solar panels: A review of agrivoltaic systems // Agronomy. 2024. URL: https://www.mdpi.com/2073-4395/14/8/1824

Сергій Попович
Аспірант,
Мирослав Мальований
д.т.н, професор ,
Олена Попович
к.т.н., доцент
Національний університет «Львівська політехніка»

АДАПТАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ДО ЗМІНИ КЛІМАТУ ТА РОЗВИТОК ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Анотація. *У тезах досліджено особливості адаптації енергетичних систем до змін клімату та роль відновлюваних джерел енергії у забезпеченні енергетичної безпеки України. Проаналізовано основні бар'єри впровадження адаптаційних заходів, зокрема фінансові, технологічні та інституційні обмеження. Розглянуто проблеми дискретності енергетичних потоків відновлюваної енергетики та шляхи їх подолання за допомогою розподіленої генерації, комбінованих енергосистем і систем накопичення енергії..*

Ключові слова: *адаптація до зміни клімату, енергетичні системи, відновлювані джерела енергії, розподілена генерація, комбіновані енергосистеми, енергетична безпека, декарбонізація.*

У світовій енергетиці пріоритетним напрямом розвитку є виробництво енергії з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що дає змогу подолати енергетичні, екологічні та економічні проблеми сучасності [1]. Позитивні результати функціонування європейської енергетики за низьковуглецевим курсом підтверджують ефективність стратегічних рішень щодо розвитку ВДЕ [2]. Зважаючи на подібність викликів української та європейської енергетики, стратегічний розвиток енергетичної галузі України має враховувати європейський досвід. Оптимальним шляхом низьковуглецевого розвитку держави є перехід до використання ВДЕ [3].

У довгостроковій перспективі роль відновлюваної енергетики для України є пріоритетною завдяки значному потенціалу практично невичерпних та екологічно чистих ресурсів [4]. Розвиток науково-технічної бази відновлюваної енергетики з метою поступової заміни традиційних способів отримання енергії є одним із ключових завдань держави. Вітчизняна наука робить вагомий внесок у реалізацію Національного плану дій України з відновлюваної енергетики [9].

Однією з основних проблем широкого впровадження ВДЕ є дискретність енергетичних потоків, тобто періодичність надходження та змінність енергетичного потенціалу сонячної і вітрової енергетики, що не завжди відповідає сучасним вимогам стабільного енергопостачання споживачів. У зв'язку з цим виникає необхідність створення додаткових регулювальних потужностей для забезпечення безперебійного електропостачання у періоди низької генерації [5].

Сучасні підходи до вирішення цієї проблеми передбачають застосування короткотермінового прогнозування енергетичного балансу, врахування регіональних кліматичних особливостей, використання систем «розумного» регулювання енергопотоків та керування попитом [6]. Значну роль у забезпеченні стійкості енергосистем відіграє розвиток розподіленої генерації, що передбачає перехід від централізованого енергопостачання до локальних систем, орієнтованих на використання місцевих ресурсів та ВДЕ.

Розподілена генерація охоплює генерувальні установки, системи накопичення енергії, автоматизовані засоби управління, локальні електромережі та системи обліку. В умовах України такий підхід набуває особливого значення через необхідність підвищення енергетичної безпеки, стійкості інфраструктури та зменшення залежності від централізованих енергетичних систем [10].

Важливим напрямом розвитку є комбіноване використання різних видів ВДЕ. Географічне розосередження сонячних і вітрових електростанцій сприяє вирівнюванню сумарної потужності та зменшенню коливань генерації. Додатково ефективність енергосистем підвищується завдяки використанню акумуляторів енергії, які забезпечують зміщення енергопотоків у часі, зменшення втрат надлишкової енергії та стабілізацію навантаження [8].

Комплексне використання різних джерел енергії формує поняття комбінованої або гібридної енергосистеми. Такі системи поєднують ВДЕ та традиційні джерела енергії, автономні установки та централізовані електромережі. Для забезпечення належної якості електропостачання в комбінованих системах використовуються системи акумулювання енергії та сучасні засоби автоматизованого управління [7].

Адаптація енергетичних систем до зміни клімату є важливим елементом забезпечення їхньої довгострокової надійності, безпеки та економічної ефективності [12]. На відміну від оцінки кліматичних ризиків, яка спрямована на виявлення загроз та уразливостей, оцінка адаптаційного потенціалу визначає здатність енергетичних систем протидіяти негативним впливам та мінімізувати їх наслідки [13].

Стратегія адаптації в енергетиці передбачає систематизацію заходів за часовими горизонтами, рівнями управління та типами втручання. Вона повинна базуватися на результатах оцінки кліматичних ризиків і бути інтегрованою в програми розвитку та модернізації енергетичної інфраструктури [14].

Незважаючи на наявність сучасних технологічних рішень, адаптація енергетики стикається з фінансовими, технологічними та регуляторними бар’єрами. Значна частина енергетичної інфраструктури не відповідає сучасним кліматичним викликам, а процес модернізації потребує значних інвестицій [11]. В умовах України кліматичні ризики додатково посилюються військовими загрозами та необхідністю відновлення пошкоджених енергетичних об’єктів.

Водночас процес повоєнної відбудови створює можливість інтеграції принципів кліматичної адаптації у нову енергетичну інфраструктуру. Інтеграція адаптації в енергетичне планування передбачає врахування кліматичних ризиків під час проєктування нових об’єктів, модернізації мереж та формування енергетичної політики. Такий підхід забезпечує підвищення стійкості енергетичних систем, їх економічної ефективності та відповідність принципам декарбонізації [13].

Кращі техніко-економічні показники застосування ВДЕ досягаються при комбінованому виробленні електричної й теплової енергії з використанням різних джерел енергії, як відновлюваної, так і традиційної, а також систем зберігання енергії. Оптимальне співвідношення окремих елементів у комбінованих енергосистемах визначається з урахуванням різних факторів, залежно від вимог до певної системи, і в усіх випадках спрямовані на зменшення невизначеності процесів генерації.

Отже, розвиток відновлюваної енергетики та впровадження адаптаційних механізмів у стратегічне планування енергетичної галузі є необхідною умовою забезпечення енергетичної безпеки України. Використання розподіленої генерації, комбінованих енергосистем і

сучасних систем накопичення енергії сприятиме підвищенню стійкості енергосистем до кліматичних та безпекових викликів. Інтеграція кліматичної адаптації в процеси модернізації енергетичної інфраструктури дозволить забезпечити довгострокову надійність та ефективність функціонування енергетичного сектору.

Список використаних джерел

1. Krebs H.-A., Hagenweiler P. *Energy Resilience and Climate Protection: Energy Systems, Critical Infrastructures, and Sustainability Goals*. Cham : Springer Nature, 2022. 312 p.
2. Eslamian S., Eslamian F. (eds.). *Disaster Risk Reduction for Resilience: Climate Change and Disaster Risk Adaptation*. Cham : Springer, 2024. 488 p.
3. Diesendorf M. *Greenhouse Solutions with Sustainable Energy*. Sydney : UNSW Press, 2007. 402 p.
4. Brown M. A., Sovacool B. K. *Climate Change and Global Energy Security*. Cambridge : MIT Press, 2011. 368 p.
5. Nik V. M. Towards climate resilient urban energy systems: a review. *National Science Review*. 2020. Vol. 8, No. 3. P. nwaa134. DOI: 10.1093/nsr/nwaa134.
6. Craig D. et al. Overcoming the disconnect between energy system and climate modeling. *arXiv preprint*. 2022. URL: https://arxiv.org/abs/2205.15636 (дата звернення: 12.05.2026).
7. Karagiannakis G. et al. Fragility Modeling of Power Grid Infrastructure for Addressing Climate Change Risks and Adaptation. *arXiv preprint*. 2025. URL: https://arxiv.org/abs/2504.20056 (дата звернення: 12.05.2026).
8. Nyangon P. Strengthening Power System Resilience to Extreme Weather Events Through Grid Enhancing Technologies. *arXiv preprint*. 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2411.16962 (дата звернення: 12.05.2026).
9. Басок Б. І., Базєєв Є. Т., Кураєва І. В. Адаптація комунальної теплоенергетики до змін клімату. *Енергетика та екологія*. 2022. № 4. С. 45–58.
10. Костюк І. Заходи з адаптації енергетичної галузі до зміни клімату і прогнози щодо її розвитку до 2050 року. *Журнал головного енергетика*. 2023. № 9. С. 22–36.
11. .Борисяк О. В. Кліматичний менеджмент підприємств як інструмент зміцнення еколого-енергетичної безпеки. *Економічні інновації та енергетична безпека*. 2021. № 3. С. 13–25.
12. ESMAP. *Energy and Climate Adaptation*. Washington, D.C. : World Bank Group, 2023. 52 p. URL: https://www.esmap.org/Climate_Change_Adaptation (дата звернення: 12.05.2026).
13. International Energy Agency. *The Role of Energy in Climate Adaptation and Resilience*. Paris : IEA, 2023. 76 p. URL: https://www.iea.org/reports/the-role-of-energy-in-climate-adaptation-and-resilience (дата звернення: 12.05.2026).
14. IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge : Cambridge University Press, 2022. 1368 p. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/ (дата звернення: 12.05.2026).

Анастасія Тимченко
Здобувач РВО бакалавр факультету міжнародної торгівлі та права
Науковий керівник: Ганна Дугінець
д. е. н., професор, завідувач кафедри світової економіки
Державний торговельно-економічний університет

«ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ БІОВІДХОДІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА В УМОВАХ ЗЕЛЕНОГО ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ»

Анотація. *У тезах розглядається можливість отримання енергії з біовідходів сільськогосподарського виробництва в Україні за допомогою ідеї зеленого відновлення. Понад 170 млн т органічних відходів щорічно виробляється аграрним сектором, що є значним джерелом органічних відходів, які можуть бути використані для виробництва біогазу та біометану. Потенціал виробництва біогазу та біометану в Україні становить близько 21,8 млрд кубічних метрів на рік, що співставно або навіть перевищує обсяги видобутку природного газу, згідно з оцінками аналітичних центрів і профільних організацій. При цьому відходи сільського господарства, такі як гній, пожнивні рештки та побічна продукція рослинництва, складають приблизно 70% цього потенціалу. Обґрунтовано, що використання біовідходів не тільки змінює енергетичний баланс країни, але й сприяє декарбонізації економіки, зменшенню викидів парникових газів і підвищенню енергетичної безпеки. Післявоєнне відновлення розглядає розвиток біоенергетики як один із пріоритетних напрямів, оскільки він має економічні, екологічні та соціальні ефекти. Встановлено, що ефективне залучення біовідходів до енергетичного обігу може стати ключовим компонентом зеленої трансформації в Україні та її інтеграції до європейського енергетичного простору.*

Ключові слова: *біовідходи сільського господарства, біоенергетика, біогаз, біометан, енергетичний потенціал, відновлювані джерела енергії, енергетична безпека України.*

У результаті повномасштабної війни енергетичний сектор України значно змінився. Це призвело до більшого занепокоєння щодо безпеки електроенергії та підвищення потреби у внутрішніх відновлюваних джерел енергії. Актуальним стало питання про необхідність переходу до децентралізованих і стійких енергетичних систем через значні руйнування інфраструктури, нестабільність постачання енергії та зростання цін на паливо. У цьому контексті біоенергетика розглядається як один із основних напрямків забезпечення енергетичної автономії держави; особливо це стосується використання біовідходів виробництва сільського господарства. Навіть в умовах війни аграрний потенціал України залишається життєво важливим для стабільності економіки. Сільське господарство також виробляє велику кількість органічних відходів і побічних продуктів. Згідно з дослідженням, в аграрному секторі щорічно виробляється від 150 до 170 мільйонів тонн біовідходів. До них належать солома зернових культур, пожнивні рештки кукурудзи, відходи тваринництва, гній та інші органічні матеріали. Багато цих ресурсів не використано, що призводить до втрати потенційної енергії та негативного впливу на навколишнє середовище [1].

Одним із найбільш перспективних напрямків розвитку відновлюваної енергетики є перетворення біовідходів на енергетичний ресурс. За оцінками, технічно досяжний обсяг виробництва біогазу в Україні перевищує 20 млрд кубічних метрів на рік, з яких до 70% складаються з відходів сільського господарства. Це спонукає до часткового заміщення природного газу та зменшення залежності країни від енергетики [2]. Декарбонізація економіки також тісно пов’язана з розвитком біоенергетики. За рахунок заміщення викопного палива та зменшення неконтрольованого розкладання органічних відходів використання біовідходів

зменшує викиди парникових газів. Як стверджують, використання біогазових технологій не тільки робить виробництво більш екологічно чистим, але й створює додаткову економічну вартість через виробництво енергії та органічних добрив [3].

Досвід країн Європейського Союзу щодо розвитку біоенергетики в рамках політики «зеленого курсу» є важливим орієнтиром для України. Європейська біогазова асоціація (EBA, 2023) повідомляє, що виробництво біометану в ЄС продовжує зростати, і біометан вважається ключовим компонентом для досягнення кліматичної нейтральності. Європейські країни активно використовують державні механізми підтримки, стимулюють інвестиції та створюють інфраструктуру для транспортування відновлюваних газів. У контексті післявоєнного відновлення та інтеграції до європейського енергетичного простору цей досвід є надзвичайно корисним для України.

Окремо варто відзначити експортний потенціал біометану як одного з найбільш перспективних напрямів розвитку біоенергетики в Україні. За оцінками експертів, країна має ресурсну базу для виробництва близько 21,8–22 млрд м³ біометану на рік, що перевищує поточний обсяг видобутку природного газу. Водночас внутрішній ринок поки що не забезпечує достатньої економічної привабливості реалізації біометану, що зумовлює орієнтацію виробників на зовнішні ринки. Європейський Союз формує стійкий попит на відновлювані гази в межах політики декарбонізації, що відкриває для України значні експортні можливості. Поява перших поставок українського біометану до ЄС засвідчує реальність формування нового напряму енергетичного експорту та посилення позицій України на європейському енергетичному ринку [4].

Для узагальнення потенціалу використання біовідходів доцільно представити ключові показники у вигляді таблиці (табл. 1).

Таблиця 1 Оцінка потенціалу біовідходів сільського господарства України

Вид біовідходів	Орієнтовний обсяг, млн т/рік	Потенціал виробництва біогазу, млрд м³/рік
Солома зернових культур	30,6	8,5-9,5
Відходи кукурудзи (стебла, стрижні)	40,2	9,5-11
Відходи соняшнику (стебла, кошики)	21,0	3,5-4,5
Вторинні агровідходи (лушпиння, жом)	6,9	2,0-2,5
Відходи тваринництва (гній, органіка)	50–60	1-1,6

Джерело: складено автором на основі [5,6].

Згідно з аналізом наведених даних, рослинна біомаса є основним джерелом енергетичного потенціалу біовідходів сільського господарства України. Відходи кукурудзи (9,5–11 млрд м³/рік) і солома зернових культур (8,5–9,5 млрд м³/рік) забезпечують найбільший внесок у виробництво біогазу, оскільки вони утворюються в аграрному секторі. Крім того, оскільки соняшник займає значну частку посівних площ України, його потенціал становить від 3,5 до 4,5 млрд м³/рік. Вторинні агровідходи, такі як жом і лушпиння, забезпечують стабільний енергетичний внесок у розмірі від 2,0 до 2,5 млрд м³ біогазу на рік, хоча це менше, ніж інші джерела енергії. Незважаючи на найбільший фізичний обсяг (50–60 млн т/рік),

відходи тваринництва мають найнижчий вихід біогазу (1–1,6 млрд м3/рік), що пов'язано з їхньою меншою енергетичною щільністю. Таким чином, структура потенціалу явно демонструє перевагу рослинних біовідходів, оскільки вони складають значну частку потенційного обсягу виробництва біогазу. Це підкреслює, наскільки важливим є рослинництво для розвитку біоенергетики та наскільки важливим є використання рослинної біомаси в енергетичних технологіях України.

Таким чином, біовідходи сільськогосподарського виробництва є значним резервом, який може допомогти розвитку відновлюваної енергетики в Україні. Їх належне використання дає можливість отримати незалежність від енергетики, скоротити викиди парникових газів і вирішити проблему утилізації органічних відходів. Поєднуючи економічні та екологічні переваги, біоенергетика може стати одним із ключових драйверів сталого економічного розвитку післявоєнного відновлення, відкриваючи нові можливості для інтеграції України до європейського енергетичного простору.

Список використаних джерел

1.Токарчук Д. Потенціал отримання енергетичних ресурсів із біовідходів сільськогосподарських, переробних та інших підприємств. Наукові перспективи (Naukovì perspektivi). 2022. № 11(29). URL: https://doi.org/10.52058/2708-7530-2022-11(29)-253-266.

2. Служба новин. Україна може виробляти до 20 млрд кубометрів біометану на рік – прогноз. Агрополіт - гаряча агрополітика. URL: https://agropolit.com/news/29443-ukrayina-moje-viroblyati-do-20-mlrd-kubometriv-biometanu-na-rik--prognoz.

3. Яременко В. Залучення іноземних інвестицій в розвиток зеленого підприємництва (альтернативних джерел енергетики) в Україні в умовах війни та енергетичної безпеки. Економіка та суспільство. 2025. № 80. URL: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-80-59.

4. Маковій Ю. Україна може виробляти 22 млрд кубів біометану – більше, ніж добуває природного газу, – експерт – Delo.ua. Останні новини України та світу онлайн – delo.ua. URL: https://delo.ua/news/ukrayina-moze-viroblyati-22-mlrd-kubiv-biometanu-bilse-niz-dobuvaje-prirodnogo-gazu-ekspert-447146/.

5. Офіційний сайт Держенергоефективності – головного енергоменеджера країни. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. URL: https://saee.gov.ua.

6. Кизим М. О., Хаустова В. Є., Костенко Д. В. та ін. Економічна доцільність виробництва твердого біопалива з енергетичних культур в Україні = The economic feasibility of solid biofuels production from energy crops in Ukraine : монографія. Харків : ФОП Лібуркіна Л. М., 2023. 232 с.URL:https://www.researchgate.net/publication/383786724_ekonomicna_docilnist_virobnictva_tverdogo_biopaliva_z_energeticnih_kultur_v_ukraini_the_economic_feasibility_of_solid_biofuels_production_from_energy_crops_in_ukraine

7. Zhuk P. V. Agricultural waste in Ukraine: generation volumes and recycling issues. Socio-Economic Problems of the Modern Period of Ukraine. 2022. № 3(155). С. 21–28. URL: https://doi.org/10.36818/2071-4653-2022-3-4.

8. Дугінець Г., Таран М. Енергетична стійкість європейських країн: досвід для України. Економіка та суспільство. 2024. № 65. URL: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-65-118.

Юлія Тишик[1,2]
Здобувач РВО бакалавр
Андрущак А. С.[1], д.т.н., професор
Подгурська В. Я.[2], к.т.н., старший науковий дослідник
[1] Національний університет «Львівська політехніка»
[2] Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України

РОЗВИТОК ПАЛИВНО-КОМІРЧАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УКРАЇНІ

Анотація. *У роботі проаналізовано перспективи розвитку паливно-комірчаних технологій в Україні у контексті європейських стратегій розвитку водневої економіки та декарбонізації енергетичного сектору. Розглянуто сучасний стан розвитку водневої інфраструктури та реалізацію пілотних водневих хабів в Україні. Показано, що розвиток паливно-комірчаних технологій може стати важливим елементом децентралізованої енергетики та підвищення енергетичної стійкості України в умовах інтеграції до європейського енергетичного простору. Обговорено потенційні сфери застосування паливно-комірчаних технологій та основну проблематику їх впровадження.*

Ключові слова: *водень, паливна комірка, водневі долини, PEMFC, SOFC, декарбонізація.*

Сучасний етап розвитку водневих та паливно-комірчаних технологій в Україні перебуває на стадії формування нормативно-правової бази, затвердження стратегічної документації та розроблення довгострокових програм розвитку. У плані відновлення України до 2032 року очікується фінансування проєктів для закладення основ водневої економіки, а саме будівництво 15 ГВт електролізних потужностей та понад 30 ГВт генерувальних потужностей для виробництва дешевої електроенергії (ВДЕ) для виробництва водню, тестування та розвиток транспортної інфраструктури водню [1].

Наразі в Україні реалізуються два проєкти створення водневих хабів - у Закарпатській та Одеській областях. Розвиток інфраструктури базується на поетапному нарощенні потужностей шляхом електролізу: до 100 МВт на кожному об'єкті до 2028 року з подальшим масштабуванням до 200 МВт до 2030 року. Зокрема, у Закарпатському хабі на першій стадії очікується щорічна генерація 7 000 тонн "зеленого" водню та 55 880 тонн технічного кисню. Важливою складовою є когенераційний потенціал системи, що дозволить утилізувати до 26 000 Гкал скидного тепла на рік для потреб локальних громад. Фінальна фаза проєкту передбачає масштабування до 1500 МВт, що забезпечить рівень виробництва понад 104 000 тонн водню на рік [2]. Велика увага приділяється експортному потенціалу водню завдяки інтеграції української газотранспортної системи з енергетичною інфраструктурою Європейського Союзу. Участь України в European Clean Hydrogen Alliance передбачає гармонізацію нормативної бази, систем сертифікації та гарантій походження водню відповідно до стандартів ЄС.

Розвиток водневої економіки може забезпечити вирішення кількох стратегічних завдань для України. За оцінками міжнародних організацій, кожні 100 МВт встановленої електролізерної потужності створює 45 прямих та 160 непрямих робочих місць на етапі будівництва [3]. Потенційно масштабування водневого сектору потенційно забезпечить значні економічні надходження, а прогнозований дохід може досягати 7,2 млрд євро щорічно після 2034 року, проте загальний обсяг капіталовкладень, необхідних для створення 10 ГВт електролізних потужностей і супутньої інфраструктури, оцінюється у 32,882 млрд євро [4]. Однією з ключових переваг водневої економіки є можливість стабілізації енергосистеми, зменшення впливу добових коливань генерації відновлюваних джерел енергії (Duck curve) та

забезпечення декарбонізації енергетичного сектору. Використання водню як енергетичного акумулятора дозволяє компенсувати дефіцит та профіцит електроенергії в енергосистемі шляхом реалізації концепції Power-to-Gas-to-Power (P2G2P). Надлишкова електроенергія від ВДЕ може використовуватись для електролізу води з подальшим накопиченням водню та його повторним перетворенням в електроенергію за допомогою паливних комірок.

Потенційно для впровадження в Україні розглядають два типи паливних комірок, а саме з твердооксидним керамічним електролітом (SOFC) та з полімерним мембранним електролітом (PEMFC). PEMFC працюють при низькій робочій температурі (до 120 °C), високій питомій потужності та швидкому старті у робочий режим. Перспективними сферами застосування є транспортний сектор, резервне живлення критичної інфраструктури та автономні енергетичні системи. Найбільш перспективною сферою їх застосування є автобуси та вантажні автомобілі на водневих ПК, оскільки вони мають більшу щільність енергії, швидкість заправки та вищу вантажопідйомність, ніж акумулятори. Проте є певні обмеження для легкових автомобілів, які пов'язані з відсутністю інфраструктури та високою вартістю порівняно з електромашинами [5]. Однак на відміну від протонобмінних паливних комірок (PEMFC) твердооксидні паливні комірки (SOFC) оптимально використовувати у системах Power-to-Gas-to-Power, що дозволять накопичувати енергію та повторно її використовувати. Завдяки роботі у високотемпературному діапазоні 600–1000 °C SOFC забезпечують високий електричний ККД, який може перевищувати 60 %, а в когенераційному режимі сумарна ефективність системи досягає 80–90 %. Що дозволяє ефективно використовувати їх для стаціонарної генерації, локальних мікромереж та промислових енергетичних комплексів.

Таким чином, розвиток паливно-комірчаних технологій в Україні є перспективним напрямом адаптації європейських стратегій енергозбереження та декарбонізації енергетичного сектору. Використання водню у поєднанні з паливними комірками дозволяє реалізувати концепції довготривалого накопичення енергії, балансування генерації відновлюваних джерел енергії та підвищення стійкості децентралізованих енергетичних систем. Водночас основними перепонами залишаються висока вартість електролізерів та паливних комірок, відсутність водневої інфраструктури, а також проблеми масштабування виробництва та нормативно-правового забезпечення. Подальший розвиток водневих технологій в Україні значною мірою залежатиме від інтеграції з енергетичною політикою Європейського Союзу, міжнародного фінансування та розвитку власної науково-технічної бази у сфері електрохімічних і матеріалознавчих технологій.

Список використаних джерел

1. План відновлення України // Офіційний сайт Recovery. – Режим доступу: https://recovery.gov.ua/project?page=34&projectTypeId=6.

2. Проєкти водневої енергетики в Україні // H2U Hydrogen Ukraine. – Режим доступу: https://h2u.ua/ua/proekty/.

3. Фінансова складова стратегії розвитку водневої економіки України // Вчені записки : зб. наук. пр. – 2024. – № 36(3). – Режим доступу: https://vz.kneu.ua/archive/2024/36(3).21 .

4. Hydrogen energy in Ukraine: preconditions, potential and prospects for European integration // Економіка промисловості. – 2024. – № 4. – С. 49–64. – DOI: http://doi.org/10.15407/econindustry2024.04.049.

5. Передумови використання водню в Україні в енергетичній та автомобільній галузях // Двигуни внутрішнього згоряння – 2023. – № 1. – DOI: https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.1.02.

СЕКЦІЯ 2 | Інноваційні технології енергозбереження в електронній інженерії та енергетичних системах
SECTION 2 | Innovative Energy Saving Technologies in Electronic Engineering and Energy Systems

Богдан Басараба
здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
Ольга Шимчишин
к.т.н., доцент
Національний університет «Львівська політехніка»

ПАЛИВНІ КОМІРКИ ЯК ПЕРСПЕКТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ТРАНСПОРТУ

Анотація: *У роботі проаналізовано принципи дії, порівняльні характеристики основних типів паливних комірок (PEMFC, SOFC, MCFC, DMFC) та сучасні напрями їх застосування у транспортному секторі і стаціонарній енергетиці. Показано, що використання паливних комірок сприяє підвищенню енергоефективності, зменшенню викидів парникових газів і зміцненню енергетичної безпеки. Водночас широке впровадження технології стримується високою вартістю компонентів, недостатнім розвитком водневої інфраструктури та обмеженим виробництвом «зеленого» водню. Встановлено, що навіть у країнах ЄС масштабування водневих технологій відбувається повільніше за прогнозовані темпи, що зумовлено економічними та інфраструктурними бар'єрами.*

Ключові слова: *паливні комірки, водень, PEMFC, SOFC, декарбонізація, зелена енергетика, воднева стратегія ЄС, енергетична безпека України*

Глобальна енергетична система перебуває у стані трансформації, що зумовлено необхідністю зменшення викидів парникових газів, підвищення енергоефективності та переходу до низьковуглецевої енергетики. Одним із перспективних напрямків досягнення цих цілей є використання паливних комірок, які забезпечують безпосереднє перетворення хімічної енергії палива в електричну без процесу спалювання. Завдяки високому коефіцієнту корисної дії та мінімальним локальним викидам паливні комірки розглядаються як важливий елемент декарбонізації енергетики й транспорту.

Паливна комірка є електрохімічним пристроєм, у якому під час реакції між воднем та киснем генерується електрична енергія, а основним продуктом реакції є вода. На відміну від традиційних теплових машин, ефективність паливних комірок не обмежується циклом Карно, що дозволяє досягати коефіцієнта корисної дії (ККД) 50–65 %, а в когенераційних установках — до 85–90 % [1]. Основними елементами паливної комірки є анод, катод та електроліт, а для прискорення електрохімічних реакцій використовуються каталізатори. Напруга однієї комірки становить близько 0.7 В, тому для отримання практично корисної потужності їх об'єднують у батареї. Залежно від типу електроліту та робочої температури розрізняють низькотемпературні та високотемпературні паливні комірки, що визначає сферу їх застосування [2]. Вибір типу паливної комірки визначається умовами застосування. Ключові характеристики основних типів наведено в табл. 1 [3]. Найбільш поширеними є паливні елементи з полімерною електролітною мембраною (PEMFC) та твердооксидні паливні елементи (SOFC). PEMFC працюють за температур 60–80 °C, характеризуються компактністю та швидким запуском, що робить їх оптимальними для транспорту. Основним обмеженням є потреба у платиновому каталізаторі та чутливість до CO, що підвищує вартість системи [4]. Серійні автомобілі на паливних комірках – Toyota Mirai, Hyundai Nexo – демонструють запас ходу понад 400 км і час заправки 3-5 хвилин, що є суттєвою перевагою порівняно з акумуляторними електромобілями. Однак попри усі переваги таких транспортних засобів, інфраструктура для їхнього обслуговування та заправляння у світі вкрай обмежена, а в Україні

– повністю відсутня. На кінець 2024 року у світі діє лише 1 160 водневих заправних станцій, з яких 294 — у Європі (переважно в Німеччині), а в Україні їх немає жодної [5].

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика основних типів паливних комірок

Тип	Електроліт	Температура	Паливо	Застосування
PEMFC	Протонообмінна мембрана	60-80 °C	Водень	Транспорт, портативні
SOFC	Тверде оксидне	700-1000 °C	Водень, природний газ	Стаціонарна енергетика
PAFC	Фосфорна кислота	150-220 °C	Водень	Будівлі, ТЕЦ
AFC	Луговий розчин KOH	60-90 °C	Водень	Космос, спецтехніка
MCFC	Розплав карбонатів	~650 °C	Природний газ, біогаз	Великі електростанції
DMFC	Протонообмінна мембрана	20-90 °C	Рідкий метанол	Портативне живлення

SOFC мають вищий ККД та здатні працювати на різних видах палива, включаючи природний газ і біогаз [3]. SOFC працюють за температур до 1000 °C, що усуває потребу в дорогих каталізаторах та дозволяє внутрішній риформінг різних видів палива, однак обмежує застосування стаціонарними установками через повільний запуск [4].

Суттєвою перевагою паливних комірок є можливість використання водню як палива без утворення шкідливих продуктів згоряння. Саме тому розвиток водневих технологій є одним із пріоритетів Європейського Союзу в межах European Green Deal та Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe. Паливні комірки розглядаються як важливий компонент майбутньої водневої економіки, особливо у транспорті, децентралізованій генерації електроенергії та системах резервного живлення.

Паливні комірки є перспективною технологією з високим ККД і мінімальними викидами, здатною відіграти важливу роль у декарбонізації енергетики та транспорту. Проте їхнє широке впровадження наразі стримується значною вартістю компонентів і недостатньо розвиненою водневою інфраструктурою. Подолання цих бар'єрів є ключовою умовою для комерціалізації технології.

Список використаних джерел

1. Васильєв О. Д. Матеріалознавство для паливних комірок. *Успіхи матеріалознавства*. 2021. № 3. С. 4–12.
2. Fuel cell. *Encyclopedia Britannica*. 2026. URL: https://www.britannica.com/technology/fuel-cell (дата звернення: 06.05.2026).
3. Jalthar R. Fuel Cells: The Complete Guide – Types, Working Principles, Applications & Comparisons. *SunLith Energy*. 2025. URL: https://sunlithenergy.com/fuel-cells-types-working-uses-comparison/ (дата звернення: 04.05.2026).
4. Types of Fuel Cells. *U.S. Department of Energy*. 2025. URL: https://www.energy.gov/cmei/fuels/types-fuel-cells (дата звернення: 04.05.2026).
5. Stefan Leichsenring. There are only 1,160 hydrogen refuelling stations worldwide. *Motor1.com*. URL: https://www.motor1.com/news/750564/hydrogen-refuelling-stations-worldwide-map/.

Les Hotra
PhD Student,
Ihor Helzhynskyy
D.Sc., Prof.,
Lviv Polytechnic National University
Jacek Klimek
Ph.D., Assistant Professor,
Lublin University of Technology

INVESTIGATION OF FBG SPECTRAL CHARACTERISTICS IN SENSOR APPLICATIONS

Abstract: *The spectral characteristics of developed uniform FBGs were investigated and analysed. Almost linear dependencies of the Bragg wavelength, reflectivity, full width at half maximum (FWHM) and band width were obtained. The developed uniform FBGs can be used for sensor applications.*

Key words: *uniform fibre Bragg grating, spectrum, spectral characteristics*

In complex energy environments, it is important to monitor parameters such as strain and temperature. It is advisable to use sensors that are high-temperature and radiation-resistant. In this case, it makes sense to use fibre Bragg grating (FBG) sensors which are passive and do not consume energy. They can be used for energy-saving purposes in optimising energy production and distribution, e. g. to monitor the structural integrity of wind turbine blades, as well as components of hydroelectric dams including spillways, gates and turbines, which allows to detect deformation or damage at the initial stages and carry out the necessary measures to reduce operating costs [1]. These sensors are also often used to monitor the temperature of, for example, solar panels, oil and gas pipelines, offshore drilling equipment or in geothermal wells to monitor the temperature. Another area of application is smart buildings, in which sensors can optimise heating, cooling, and lighting systems as well as energy consumption [2]. In summary, the use of fibre-optic sensors contributes to early detection of potential failures and optimisation of equipment performance, to reduce costs and ensure a stable power supply. In order to develop temperature-independent FBG sensors including strain sensors, the spectral characteristics of FBGs should be investigated and analysed. The aim of the work was to investigate and analyse the spectral characteristics of developed uniform FBGs with various spectrum widths for sensor application.

Uniform FBGs were inscribed in optical fibres GF1 using UV excimer laser KrF with a pulse energy of 80mJ and a repetition rate of 20Hz in 30s by the phase mask technique. Fabricated FBG lengths were 3 mm, 6 mm, 9 mm, and 12 mm. The dependencies of the normalised optical power on wavelength for fabricated FBGs are depicted in Fig. 1.

As can be seen from Fig.1, there is a Bragg wavelength shift towards a decrease in wavelength with an increase in the FBG length. The slope of Bragg peak changes with FBG length, e. g. the slope is slight for an FBG length of 3 mm compared to the sharp slopes for FBG lengths of 6 mm, 9 mm and 12 mm. There is an almost linear dependence of the Bragg wavelength on FBG length (Fig.2).

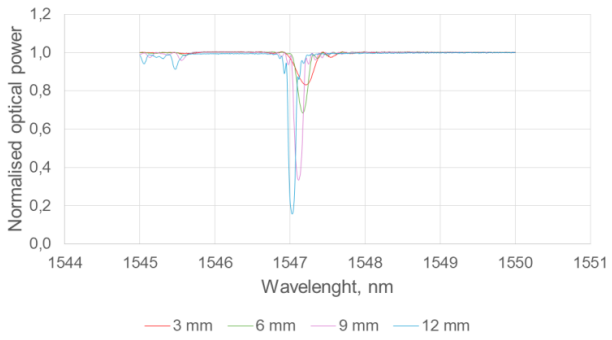


Figure 1 - Dependencies of the normalised optical power on wavelength for fabricated FBGs of 3 mm, 6 mm, 9 mm and 12 mm FBG lengths.

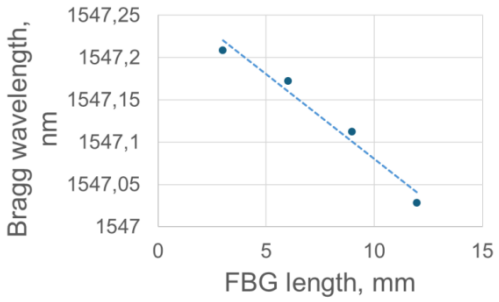
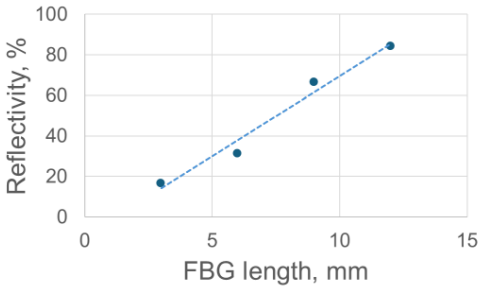
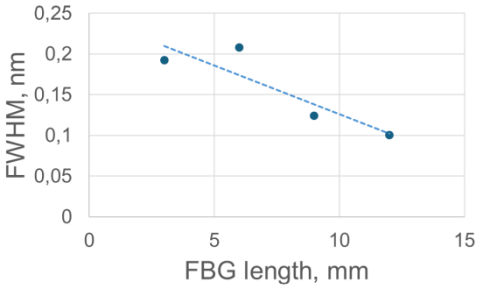


Figure 2- Bragg wavelength vs FBG length

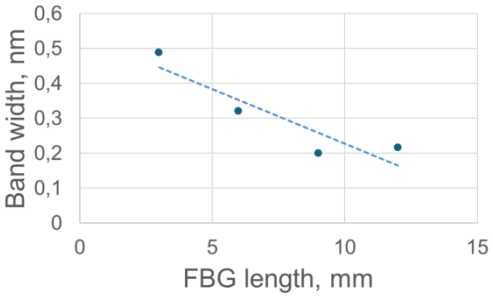
Almost linear dependencies of the full width at half maximum (**FWHM), reflectivity and band** width on FBG length were obtained for fabricated FBGs (Figs. 3).



a)



b)



c)

*Figure 3 - Dependencies of the **reflectivity (a),** full width at half maximum **(FWHM) (b), and band width** (c) on FBG length*

Summarising the results obtained it can be stated that by adjusting the grating length, it is possible to change the shape of the spectral characteristics of FBGs, including the slope of the Bragg peak, which allows the development of a sensor with characteristics for a specific application. For example, the selection a smaller or larger slope of the Bragg peak with allows for a slower or faster change of the sensor parameters. The linear character of the dependencies of FBG parameters on FBG length allows for their use in sensor applications.

References

1. https://www.ofscn.net/fbg-application/new-energy-industry.html
2. https://lumoscribe.com/deep-tech-articles/illuminating-smart-buildings-the-role-of-fbg-sensors/

Mariia Ivakh
PhD, Associate Professor
Oleksandr Tsovkh
PhD student
Lviv Polytechnic National University

IMPLEMENTATION OF ENERGY EFFICIENT ENGINEERING PRINCIPLES IN INTELLIGENT MOBILITY SUPPORT SYSTEMS

Abstract: *The article examines current approaches to optimizing energy consumption in modern intelligent mobility support systems devices, such as exoskeletons, smart prostheses and sensor networks in the context of the strict requirements of European legislation. The effectiveness of the transition of devices to the «deep sleep» state is substantiated, which allows significantly extending the autonomy of operation without loss of functionality.*

Keywords: *devices, sensor networks, «deep sleep», device's power.*

The current stage of development of intelligent mobility support systems technologies, such as exoskeletons, smart prostheses and sensor networks, poses two critical challenges for engineers: maximum autonomy of operation and compliance with strict environmental standards. The Energy Efficiency Directive establishes a strict framework for manufacturers of intelligent equipment. It stimulates the development of devices that consume a minimum of resources throughout the entire life cycle. For mobility systems, this means optimizing data transmission and implementing energy-saving communication protocols. The solution to these problems lies in the field of intelligent energy management and the implementation of energy-efficient engineering principles.

Regulation (EU) 2023/1791, which sets a vector for all energy-consuming systems, requires the implementation of «energy management» systems, which stimulate the development of sensors with a «deep sleep» function. Currently, providing energy to the entire mobility device system is one of the biggest engineering challenges [1].

The energy supply for intelligent mobility support systems must be mobile and stored in the device itself. Energy sources play a crucial role in supporting the operation of intelligent mobility support systems over a long period. Battery technologies dominate modern implementations [2]. Portable power supplies used in intelligent mobility support systems vary greatly in efficiency, durability, and weight. These battery parameters largely determine the capabilities of intelligent mobility support systems. In general, «the engineering challenge is therefore to incorporate adequate power, data storage, and processing capabilities on the wireless devices to balance the throughput and operational lifetime» [5].

Intelligent mobility support systems typically have a computation unit with storage, a communication unit, and several sensors onboard for their operation [3]. The main problem with power supply is the limited battery life of devices. Therefore, there is currently an active search for extended battery life, which forms the concept of low-energy support [4].

One of the most effective methods for saving energy in intelligent mobility support systems is the use of an algorithm for analyzing user activity. When the device detects movement or changes in parameters, the system’s power supply operates at maximum. As soon as activity stops, the system automatically reduces the frequency of requests. In case of prolonged inactivity, the device goes into deep sleep mode. In this state, power consumption is minimized to microamperes, and only critical components remain active, capable of «waking up» the system at the first signal of movement. This

approach allows you to extend the battery life from a single charge by 40–60%, which is vital for intelligent mobility support.

In general, optimization of the device's power consumption is achieved by using the energy-efficient deep sleep protocol and choosing a microcontroller with support for deep sleep modes. The use of a compact battery with a capacity of 250-300 *mAh* provides up to 8 hours of continuous operation with minimal device weight.

However, here the question arises in the balance between the frequency of reading information by sensors and the autonomous operation time of intelligent mobility support systems. Although modern sensors consume only microamperes in sleep mode, during active reading of data along 6 axes they require a stable voltage. In addition, the microcontroller spends significant energy on performing filtering algorithms (Butterworth, Kalman filters) in real time.

The use of modern electronics provides unique capabilities that were previously unavailable in the creation of intelligent mobility support systems. The use of user activity analysis algorithms is the foundation of energy efficiency in modern intelligent mobility support systems. Instead of linear energy consumption, the system uses a dynamic power profile that adapts to the context of use in real time. This approach not only saves battery life, but also transforms the device from a passive tool into an intelligent assistant that «understands» the user's physical state.

Thus, the combination of adaptive «smart sleep» technologies with the principles of the circular economy creates a new generation of intelligent mobility support. They not only provide high autonomy and accuracy for the user, but also meet the global goals of sustainable development, transforming complex electronics into environmentally responsible tools of the future.

References

1. Akiro, T.F. (2025). Engineering Challenges in Developing Exoskeletons for Mobility Assistance. *Newport international journal of scientific and experimental sciences,* 6(1),11-15. https://doi.org/10.59298/NIJSES/2025/61.1115

2. Anselmi, Z. & Evelyn, W.C. (2026). Energy Efficient Exoskeleton Systems Enabling Human Augmentation for Rehabilitation and Performance Enhancement Tasks. Journal of Bionic Systems Design. *Artificial Organs and Human Augmentation Technologies*, 1(1), 1-10. https://doi.org/1063/5.0308725

3. Hiremath, S., Yang, G., & Mankodiya, K. (2014). Wearable Internet of Things: Concept, architectural components and promises for person-centered healthcare. *Proc. 4th Int. Conf. Wireless Mobile Commun. Healthcare-Transforming Healthcare Through Innov. Mobile Wireless Technol,* 304–307.

4. Qaim, W.B., Ometov, A., Molinaro, A., Lener, I., Campolo, C., & Lohan, E. (2020). Towards Energy Efficiency in the Internet of Wearable Things: A Systematic Review, *IEEE Access,* 8, 175412-175435. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025270

5. Warren, S., & Natarajan, B. (2011). *Wireless Communication Technologies for Wearable Systems.* In: Bonfiglio, A., De Rossi, D. (eds) Wearable Monitoring Systems. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7384-9_3

Анастасія Карпова
здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
Діана Кіндзера
к.т.н., доцент
Національний університет «Львівська політехніка»

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СУШАРКИ КИПЛЯЧОГО ШАРУ ТА ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОЗАТРАТ

Анотація: *Розглянуто проблему підвищення енергоефективності сушарок киплячого шару. Показано, що основними напрямами підвищення їх енергоефективності є удосконалення конструкції, оптимізація гідродинамічних режимів, використання систем рекуперації теплоти та автоматизованого керування. Встановлено, що впровадження сучасних енергоощадних технологій дозволяє суттєво скоротити витрати теплової та електричної енергії, зменшити втрати теплоти з відпрацьованим сушильним агентом і підвищити загальну енергетичну ефективність сушильних установок.*

Ключові слова: *сушарка киплячого шару, енергоефективність, систем рекуперації теплоти, системи автоматизованого керування, зниження енергозатрат*.

Сушіння є одним із найважливіших тепло- та масообмінних процесів у хімічній, фармацевтичній, харчовій і біотехнологічній промисловості. Воно забезпечує зниження вологості матеріалів до необхідних технологічних параметрів, підвищує стабільність продукції під час зберігання та транспортування, а також сприяє покращенню якості кінцевого продукту. У промисловості застосовують різні типи сушильного обладнання, серед яких особливе місце займають сушарки киплячого шару завдяки високій інтенсивності тепло- і масообміну, рівномірності сушіння та можливості автоматизації процесу.

Сушарки киплячого шару широко використовують для сушіння зернистих, порошкоподібних та кристалічних матеріалів. Принцип їх роботи ґрунтується на створенні псевдозрідженого (киплячого) шару частинок матеріалу потоком теплового агенту. У такому стані частинки інтенсивно перемішуються, що забезпечує рівномірний розподіл температури, високу швидкість випаровування вологи та значну поверхню контакту між фазами. Завдяки цьому сушарки киплячого шару характеризуються високою продуктивністю з можливістю реалізації безперервного технологічного процесу.

Разом із цим процес сушіння належить до найбільш енергоємних технологічних процесів у промисловості. Основні енергетичні витрати пов’язані з необхідністю випаровування значної кількості вологи та нагріванням сушильного агенту. За оцінками, на процеси сушіння може припадати до 10–25 % загального енергоспоживання промислових підприємств залежно від специфіки виробництва. Значні витрати теплової та електричної енергії безпосередньо впливають на собівартість продукції, тому питання підвищення енергоефективності сушильного обладнання є одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасних технологічних ліній.

Однією з переваг сушарок киплячого шару є інтенсивний теплообмін між сушильним агентом і частинками матеріалу, що дозволяє скоротити тривалість процесу сушіння у порівнянні з барабанними або стрічковими сушарками. Водночас ефективність роботи таких апаратів значною мірою залежить від рівномірності розподілу повітряного потоку по площі газорозподільної решітки. Нерівномірний розподіл сушильного агента може призводити до

утворення застійних зон, локального перегріву матеріалу та перевитрат енергії. Тому важливе значення має правильний вибір конструкції решіток, геометричних параметрів апарата та швидкості подачі повітря. Оптимізація конструкції сушарки дозволяє забезпечити стабільний режим псевдозрідження, скоротити тривалість сушіння та підвищити ефективність використання теплової енергії.

Для підвищення енергоефективності сушарок киплячого шару широко застосовують методи комп'ютерного моделювання та CFD-аналізу (Computational Fluid Dynamics), які дозволяють досліджувати гідродинаміку руху газових потоків і поведінку частинок у шарі. Використання математичного моделювання дає змогу визначити оптимальні режими роботи сушарки, зменшити гідравлічний опір та підвищити ефективність тепло- і масообміну. Це сприяє скороченню витрат електроенергії на роботу вентиляторів та підвищує стабільність технологічного процесу.

Важливим напрямом удосконалення сушарок киплячого шару є автоматизація процесу сушіння. У сучасних установках використовують датчики температури, вологості, тиску та швидкості повітря, які забезпечують безперервний контроль параметрів процесу. Системи автоматизованого керування дозволяють регулювати температуру сушильного агенту, швидкість подачі повітря та тривалість сушіння залежно від вологості матеріалу. Після досягнення необхідної кінцевої вологості система автоматично зменшує подачу теплоти та коригує роботу вентилятора, що дозволяє уникнути перегріву продукту й перевитрат енергії. Впровадження автоматизованих систем керування забезпечує економію енергії на рівні 10–20 % та підвищує якість готової продукції.

Суттєвою проблемою у процесах сушіння є втрати теплоти з відпрацьованим сушильним агентом. Відпрацьоване повітря містить не лише водяну пару, а й дрібнодисперсні частинки матеріалу, що потребує встановлення систем очищення – циклонів, рукавних фільтрів або електрофільтрів. Робота очисного обладнання супроводжується додатковими енергетичними витратами. Одним із найбільш ефективних шляхів зниження енергоспоживання є впровадження систем рекуперації теплоти відпрацьованого сушильного агенту. Використання теплообмінників-рекуператорів дозволяє повторно використовувати теплоту відхідного теплового агенту для нагрівання свіжого потоку, що сприяє зменшенню витрат палива та скороченню теплового забруднення навколишнього середовища.

Перспективним напрямом розвитку енергоощадних сушильних технологій є використання теплових насосів для забезпечення роботи сушарок киплячого шару. Принцип роботи теплового насоса полягає у відбиранні теплоти відпрацьованого вологого повітря та передачі її свіжому сушильному агенту. На відміну від традиційної рекуперації, де тепло лише частково повертається через теплообмінник, теплонасосна система забезпечує замкнений цикл використання енергії. Одночасно відбувається охолодження та осушення відпрацьованого повітря, що дозволяє повторно використовувати його у процесі сушіння. Використання теплових насосів забезпечує суттєве скорочення витрат теплової енергії, та підвищення енергоефективності установки загалом.

Додатковим шляхом зниження енергозатрат є використання багатостадійних сушарок киплячого шару, у яких реалізується поетапне сушіння матеріалу за різних температурних режимів. Такий підхід дозволяє більш раціонально використовувати теплоту сушильного агенту, уникати перегріву продукту та зменшувати втрати енергії. Для термочутливих матеріалів доцільним є застосування сушіння у віброкиплячому шарі, що забезпечує інтенсифікацію процесу при нижчих температурах і менших витратах повітря.

Зниження енергоспоживання у процесах сушіння має безпосередній вплив на економічну ефективність виробництва. Для фармацевтичних препаратів, хімічних реагентів, мінеральних добрив та харчових добавок витрати енергії становлять значну частку собівартості продукції. Тому впровадження енергоефективних сушарок киплячого шару, систем рекуперації теплоти та автоматизованого керування забезпечує швидку окупність інвестицій. Крім того, скорочення споживання енергоресурсів сприяє зменшенню викидів CO_2 та відповідає сучасним екологічним вимогам і принципам сталого розвитку промисловості.

Висновки

Сушарки киплячого шару є одним із найбільш ефективних типів сушильного обладнання завдяки високій інтенсивності тепло- і масообміну, рівномірності сушіння та можливості реалізації безперервних технологічних процесів. Їх використання забезпечує скорочення тривалості сушіння та підвищення якості готової продукції.

Показано, що основними напрямами підвищення енергоефективності сушарок киплячого шару є удосконалення конструкції, використання систем рекуперації теплоти, автоматизованого керування та теплових насосів. Важливу роль також відіграє застосування комп’ютерного моделювання для оптимізації гідродинамічних режимів та інтенсифікації процесів тепло- і масоперенесення.

Встановлено, що впровадження сучасних енергоощадних технологій дозволяє суттєво скоротити витрати теплової та електричної енергії, зменшити втрати теплоти з відпрацьованим сушильним агентом і підвищити загальну енергетичну ефективність сушильних установок. Комплексне вдосконалення сушарок киплячого шару сприяє зниженню собівартості продукції, зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище та забезпечує відповідність сучасним вимогам ресурсозбереження і сталого розвитку промисловості.

Список використаних джерел

1. Mujumdar, A. S. (2014). Handbook of Industrial Drying. (4th ed.).
2. Товажилиський Л.Л. , Готлінська А. П. , Лещенко В.О. , Нечипоренко І.О., Чернишов І.С. Процеси та апарати хімічної технології, ч. 1. Харків: НТУ 'ХІП', 2007. -616с.
3. Дубинін А. І. Процеси та апарати хімічної технології: навч. посіб з курсового проектування / А. І. Дубинін, Р. І. Гаврилів, І. О. Гузьова; за ред. А. І. Дубиніна – Львів : Видавництво львівської політехніки, 2012. – 360 с.
4. Ткаченко С. Й., Співак О. Ю. Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2007. - 76 с.

Олег Климкевич
аспірант,
Богдан Лукасевич
аспірант
Ігор Герман
аспірант
Богдан Булавінець
Аспірант
Тетяна Булавінець
д.філ., доцент
Христина Іванюк
д.т.н.
Національний університет «Львівська політехніка»

МОДИФІКАЦІЯ ОРГАНІЧНИХ СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЛЬНИХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НАНОЧАСТИНКАМИ СРІБЛА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ

Анотація: *досліджено вплив позиціонування наночастинок срібла (AgNP) на електролюмінесцентні характеристики органічних світловипромінювальних гетероструктур (OLED). Проведено порівняльний аналіз двох архітектур OLED: ITO/AgNP/HIL/HTL/EML/EBL/ETL/Cs_2CO_3/Al та ITO/HIL/HTL/AgNP/HTL(ультратонкий)/EML/EBL/ETL/Cs_2CO_3/Al. Встановлено, що локалізація AgNP на межі ITO/HIL забезпечує ефективніше покращення електролюмінесцентних параметрів і зростання зовнішньої квантової ефективності порівняно зі структурою, у якій наночастинки розташовані поблизу емітерного шару. Отримані результати пояснюються оптимізацією інжекції носіїв заряду та зменшенням безвипромінювальних втрат у структурі з AgNP на межі ITO/HIL.*

Ключові слова: *OLED, наночастинки срібла, плазмонний резонанс, органічні гетероструктури, електролюмінесценція*

Органічні світловипромінювальні діоди є перспективними елементами сучасної оптоелектроніки завдяки низькому енергоспоживанню, високій контрастності та можливості створення гнучких дисплейних систем[1,2]. Одним із напрямів підвищення ефективності OLED є використання металевих наночастинок, здатних формувати локалізований поверхневий плазмонний резонанс та підсилювати електромагнітне поле в активній області пристрою[3]. У роботі було досліджено дві OLED-гетероструктури з різним розташуванням AgNP. Перша структура мала конфігурацію: ITO/AgNP/HIL/HTL/EML/EBL/ETL/Cs_2CO_3/Al.

У даній архітектурі AgNP розташовувалися безпосередньо на поверхні ITO перед шаром інжекції дірок. Таке позиціонування сприяє зменшенню енергетичного бар'єру на межі ITO/органічний шар та покращенню діркової інжекції. Крім того, локалізоване плазмонне поле забезпечує ефективніший транспорт носіїв заряду та покращення їх рекомбінації в емітерному шарі. Внаслідок цього спостерігається підвищення яскравості випромінювання, зовнішньої квантової ефективності та зниження робочої напруги OLED.

Друга структура мала вигляд: ITO/HIL/HTL/AgNP/HTL(ультратонкий)/EML/EBL/ ETL/Cs_2CO_3/Al.У цьому випадку AgNP були введені поблизу емітерного шару та відокремлені від нього ультратонким HTL-шаром. Незважаючи на можливість плазмон-екситонної взаємодії, надмірне наближення металевих наночастинок до EML може призводити до

безвипромінювального гасіння екситонів і передачі енергії на поверхню металу. У результаті виникають додаткові втрати енергії, що обмежують ефективність електролюмінесценції. Ультратонкий HTL-шар лише частково компенсує ці втрати, виконуючи функцію буферного прошарку між AgNP та EML.

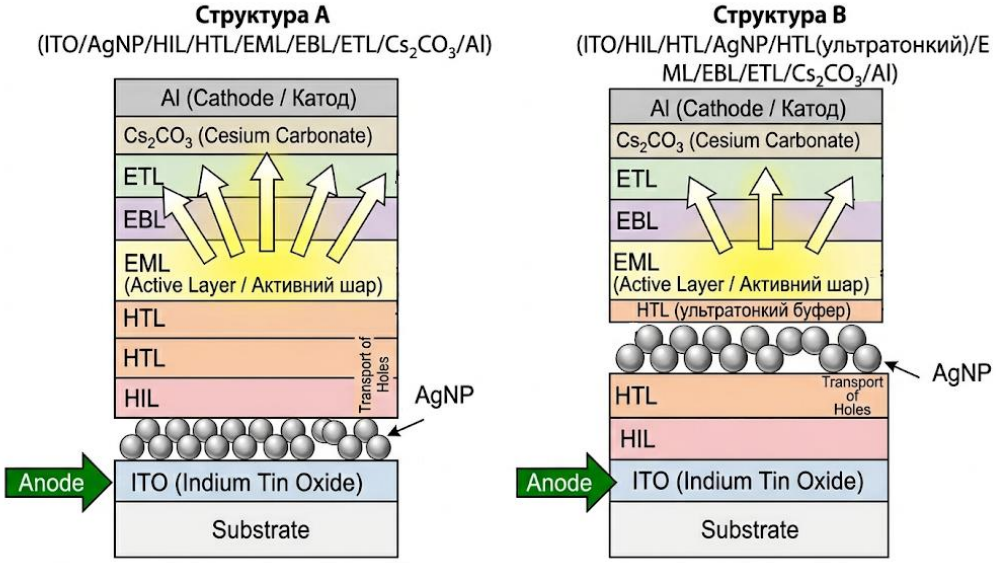


Рисунок 1 - Схематичне зображення досліджуваних OLED-гетероструктур:
***а)** конфігурація з розташуванням наночастинок срібла (AgNPs) на межі ITO/HIL;*
***б)** конфігурація з розташуванням AgNPs поблизу емітерного шару (EML).*

Порівняльний аналіз показав, що структура з AgNP на межі ITO/HIL характеризується більш вираженим підсиленням електролюмінесценції, нижчою напругою ввімкнення та вищою стабільністю параметрів випромінювання. Водночас розташування AgNP поблизу емітерного шару супроводжується збільшенням безвипромінювальних процесів та менш ефективним використанням енергії екситонів.

Отримані результати свідчать про те, що оптимізація положення наночастинок срібла є важливим фактором для підвищення ефективності OLED-гетероструктур. Використання AgNP на межі ITO/HIL є перспективним підходом для створення високоефективних органічних світловипромінювальних пристроїв.

Список використаних джерел

1. Fusella M.A. et al. Plasmonic enhancement of stability and brightness in organic light-emitting devices // *Nature*. 2020. Vol. 585. P. 379–382.
2. Jayabharathi J., Sarojpurani E., Thanikachalam V. Far-field enhancement by silver nanoparticles in organic light emitting diodes // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2017. Vol. 56. P. 11956–11964.
3. Shin J.B. et al. Efficient green organic light-emitting diodes by plasmonic silver nanoparticles // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2016. Vol. 28. P. 103–106.

Подяка (Acknowledgement)

Автори висловлюють щиру подяку Міністерству освіти і науки України за фінансову підтримку в межах науково-дослідного проєкту «Розробка плазмонних наноструктурованих підкладок для посилення сигналу SERS при виявленні вибухових речовин» (2024–2026), № DB/SERS 0124U000823.

Iryna Kremer
PhD, Associate Professor
Rostyslav Tymkovych
PhD student
Lviv Polytechnic National University,

INTEGRATION OF ENERGY HARVESTING TECHNOLOGIES INTO REHABILITATION CONTROL SYSTEMS IN THE CONTEXT OF THE EUROPEAN GREEN DEAL

Abstract: *Approaches to creating autonomous systems to control the rehabilitation process for persons with disabilities within the framework of the European Green Deal and the Digital Decade 2030 strategies are considered. The feasibility of using Energy Harvesting technology to power low-power electronic devices is substantiated. The advantages of integrating System-on-Chip solutions for dynamic power management are described. It is substantiated that the implementation of domestic systems based on these technologies will contribute to increasing the availability of rehabilitation services and ensuring the autonomy of control devices in Ukraine.*

Keywords: *Energy Harvesting, energy consumption, sensor systems*.

Within the framework of the European Green Deal initiatives, which were officially presented to the European Parliament on December 11, 2019, and the Digital Decade 2030 strategy, global attention is increasingly focused on sustainable development and renewable energy in all areas of public knowledge [3]. It is now important to ensure that these achievements are inclusive and accessible to every segment of society, including persons with disabilities.

Innovative electronic, objective means and devices for controlling the rehabilitation process, ensuring high quality and effectiveness of rehabilitation effects, and regulating and reducing energy consumption under dynamic changes in external influences. Therefore, given that the European approach to energy saving is based on three principles: energy independence, digitalization (eHealth) and environmental friendliness of materials, special relevance is given to the creation of energy-efficient control devices that combine high autonomy with minimal energy consumption. European Green Deal Stimulates the development of devices with Low-power electronics, which is critical for continuous control systems.

The energy efficiency of autonomous devices is determined by their ability to minimize energy consumption [6]. In modern sensor systems, this issue is solved by implementing new methods and optimization algorithms [2]. Adaptation of European strategies in the context of rehabilitation control devices is a point of intersection of electronic technologies, energy efficiency and social inclusion.

One of the leading trends in European engineering is the introduction of Energy Harvesting technology, a promising energy source for low-power devices. It is based on the conversion of solar, thermal, radio-frequency and kinetic energy of the environment into electricity [5]. In particular, the use of piezoelectric elements allows you to transform the kinetic energy of the movement of the subject of control into a resource for powering sensors and accumulating charge in low-power mobile devices.

To ensure the autonomy of the systems, the use of Energy Harvesting modules is provided, which allows you to abandon stationary power sources. The module, connected to a piezoelectric source, rectifies the voltage and accumulates it on an external capacitor optimized for working with

sources with high output resistance, such as piezoelectric, solar, or magnetic conversions. As shown in the study [1], the implementation of Energy Harvesting technologies is critically important for ensuring the autonomy and energy efficiency of modern control devices.

Since the level of accumulated energy is constantly changing, the system requires not fixed settings, but dynamic control of input characteristics in real time. For this purpose, solutions of the System-on-Chip or System-in-Package class are used [4]. Such systems integrate energy harvesting modules, voltage conversion, power management and wireless communication units in one housing. This allows to significantly reduce the dimensions of the devices, minimizing energy losses and simplifying the design. This becomes especially relevant against the backdrop of the rapid growth of demand for compact, lightweight and ergonomic devices.

The use of energy harvesting systems not only increases the comfort of operation, allowing to significantly extend the service life of devices without recharging [1], but also solves a number of environmental problems. In particular, it contributes to reducing the volume of electronic waste, since minimizing the need to replace batteries slows down the accumulation of waste that is difficult to recycle. Therefore, the use of kinetic, thermal, or solar energy of the human body contributes to the transition to environmentally friendly technologies for powering electronic control devices.

The implementation of EU technical regulations on energy labeling and the development of domestic systems based on Energy Harvesting technology will reduce the cost of devices compared to imported analogues. Important that Energy Harvesting corresponds to the concept of sustainable development, as it allows you to abandon disposable galvanic batteries. For Ukraine, this will be a step towards improving the quality not only of improving the quality of control of the rehabilitation process, but also of ensuring the stability of the systems in any conditions.

References

1. Ali, A., Shaukat, H., S. Bibi, W.A. Altabey, M., & Noori, S.A. (2023). Kouritem Recent progress in energy harvesting systems for wearable technology. *Energy Strateg. Rev*, 49, 101124. https://doi.org/ 10.1016/j.esr.2023.101124

2. Bharathi, S. A., & Seyezhai, R.(2023). Energy harvesting for self-powered wearable device applications. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.342.

3. *European Commission* (2019). The European Green Deal. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2019) 640 final.

4. James, L. (2023). Energy Harvesting for Low-Power Electronics: Scaling SoC and SiP Solutions. *Journal of Microelectronics and Electronic Components*, 15(2), 45-58.

5. Naidu, M.C., Dhote, & Dr.D.S. (2025). Development of Energy-Harvesting Wearable Biomedical Devices: Designing Self-Powered Sensors for Continuous Health Monitoring. *Int. J. Sci. Res. Comput. Sci. Eng. Inf. Technol*, 11(1), 728–732. https://doi.org/10.32628/CSEIT2511113

6. Shekari, M, Naderi, G., Moghari,S., Naqvi, M., & Khonakdar, H.A. (2025). Piezoelectric Materials for Energy Harvesting in Wearables. *Polymer Engineering & Science, 12*, 6451–6478. https://doi.org/10.1002/pen.70186.

Ірина Кремер
к.т.н., доцент,
Олександр Проскурняк
здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
Національний університет «Львівська політехніка»

ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС СИНХРОННОГО ДЕТЕКТУВАННЯ ОПТИЧНОГО ВІДГУКУ РІДКОКРИСТАЛІЧНОГО ГАЗОВОГО СЕНСОРА З ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ ПАРАЗИТНИХ ВПЛИВІВ

Анотація: *Описано програмно-апаратний комплекс синхронного детектування оптичного відгуку рідкокристалічного газового сенсора на основі мікроконтролера STM32. Обґрунтовано застосовність диференціальної двоканальної схеми для апаратної компенсації нестабільності джерела світла, температурного дрейфу та фонового засвічення при реєстрації слабких оптичних сигналів холестеричного чутливого елемента.*

Ключові слова: *рідкокристалічний сенсор газів, двоканальна оптична реєстрація, мікроконтролер STM32, синхронне детектування, диференціальне вимірювання, холестерична фаза.*

Сучасний етап розвитку технологій моніторингу довкілля та промислової безпеки нерозривно пов'язаний із масовим впровадженням компактних газових сенсорів. Сьогодні критично важливим є забезпечення селективності, чутливості та довготривалої стабільності вимірювання концентрацій летких сполук в умовах значних паразитних впливів. Особливе місце серед сенсорних платформ посідають рідкокристалічні сенсори газів, які формують яскраво виражений оптичний відгук через зсув спектра селективного відбиття від холестеричної надмолекулярної структури.

Використання традиційних одноканальних фотометричних схем реєстрації не дозволяє забезпечити необхідні метрологічні характеристики через високу вразливість до паразитних факторів. Нестабільність інтенсивності світлодіодного джерела досягає від одного до трьох відсотків за годину навіть за умови стабілізованого живлення, а температурний дрейф спектральних характеристик створює систематичну похибку, яка повністю маскує корисний сигнал від низьких концентрацій аналіту.

Для подолання цих метрологічних обмежень розроблено спеціалізований програмно-апаратний комплекс двоканальної оптичної реєстрації. Апаратна платформа базується на одночасному формуванні двох оптичних сигналів від спільного джерела світла — вимірювального, що взаємодіє з аналітом, та опорного, який характеризує параметри самого джерела без впливу газового середовища. Фізична конструкція реалізована з максимальною симетрією оптичних трактів та селективним підбором пари кремнієвих фотодіодів, що забезпечує ефективну апаратну компенсацію спільних паразитних впливів.

Стабілізація джерела випромінювання здійснюється спеціалізованим інтегральним драйвером світлодіода зі стабілізацією струму через інтерфейс SPI, що забезпечує підтримання заданого прямого струму з відносною похибкою менше одного відсотка та мінімізує паразитні модуляції корисного сигналу. Перетворення слабких струмових сигналів фотодіодів виконується прецизійними трансімпедансними передпідсилювачами на основі малошумних операційних підсилювачів зі вхідними струмами зміщення на рівні десятків пікоампер.

Програмно-апаратна архітектура керування побудована на базі мікроконтролера STM32 з ядром ARM Cortex-M. Застосування режиму одночасного перетворення двох незалежних аналого-цифрових перетворювачів у поєднанні з апаратними таймерами гарантує строго синхронну дискретизацію сигналів обох каналів з часовим розузгодженням не більше ста наносекунд. Контролер прямого доступу до пам'яті повністю звільняє центральний процесор для реалізації алгоритмів цифрового синхронного детектування та нормування каналів у режимі реального часу.

Програмна реалізація алгоритму обробки сигналів у мікроконтролері базується на цифровому перемноженні масивів даних вимірювального та опорного каналів на опорну функцію, що генерується синхронно з модуляцією джерела світла. Отримані добутки піддаються цифровій фільтрації низьких частот за допомогою каскаду ФІХ-фільтрів (фільтрів із імпульсною характеристикою кінцевої тривалості), які ефективно придушують високочастотні шуми та наводки промислової частоти 50 Гц. Фінальний етап обробки полягає у математичному обчисленні відношення амплітуд вимірювального та опорного сигналів. Таке програмне нормування дозволяє повністю ліквідувати залишкову нестабільність інтенсивності випромінювання та ізолювати виключно корисний оптичний відгук холестеричної матриці на присутність аналіту.

Такий комплексний інженерний підхід забезпечує апаратне послаблення синфазних флуктуацій інтенсивності джерела світла на тридцять-сорок децибел та зниження впливу температурного дрейфу на один-два порядки порівняно з одноканальними системами, що дозволяє досягати відносної похибки вимірювання менше одного відсотка та задовольняти сучасні метрологічні вимоги до автоматизованих систем моніторингу газового середовища.

Подяка

Цю роботу було підтримано дослідницьким проектом, що фінансувався з державного бюджету (проєкт ДБ/ФОРС: “Функціональні первинні перетворювачі сенсорних пристроїв на основі рідкокристалічних матеріалів для використання в екстремальних умовах”, 0126U001141)

Список використаних джерел

1. STM32F4 Series of High-Performance MCUs. *STMicroelectronics*. 2026. URL: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f4-series.html (дата звернення: 02.05.2026).
2. OPA381: Precision, Low Power, Transimpedance Amplifier. *Texas Instruments*. 2026. URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa381.pdf (дата звернення: 03.05.2026).
3. Zhang D., Wu Z., Zong X. Flexible and self-powered temperature sensors based on liquid crystal materials. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2019. Vol. 301. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400519314558 (дата звернення: 02.05.2026).
4. Liquid Crystal Based Sensors for Environmental Monitoring. *Advanced Optical Materials*. 2019. Vol. 7, Iss. 12. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adom.201900974 (дата звернення: 03.05.2026).

Ірина Кремер
д.т.н., доцент,
Сметанюк Михайло
здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
Національний університет «Львівська політехніка»

АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ РЕЗИСТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ДЛЯ ДИНАМІЧНОГО ТЕСТУВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ

Анотація: *Описано розробку та практичну реалізацію апаратно-програмного комплексу для автоматизованого тестування перехідних процесів імпульсних джерел живлення на основі мікроконтролера STM32. Обґрунтовано застосовність гібридного підходу із використанням масивів планарних безіндуктивних резисторів та комутуючих N-канальних польових транзисторів, що працюють виключно у ключовому режимі під керуванням інтегрованого драйвера LTC7004 із вбудованою схемою помпування заряду. Запропоновано програмні алгоритми формування гнучких випробувальних профілів навантаження (меандр, поодинокі імпульси, ступінчастий режим) із частотою комутації до 100 кГц.*

Ключові слова: *імпульсні джерела живлення, динамічне тестування, мікроконтролер STM32, драйвер верхнього ключа, швидкість наростання струму, перехідні процеси.*

Стрімкий розвиток сучасної мікропроцесорної техніки, систем зв’язку та обчислювальних платформ висуває підвищені вимоги до енергоефективності та стабільності систем їхнього електроживлення. Сучасні інтегральні мікросхеми характеризуються динамічним споживанням енергії із надшвидким переходом від енергозберігаючих режимів до максимальної продуктивності, що супроводжується миттєвими стрибками струму. За таких умов імпульсні джерела живлення (ІДЖ) повинні миттєво адаптуватися до змінних умов без критичних коливань вихідної напруги. Саме тому контроль їхніх динамічних характеристик, зокрема реакції на різку зміну струму навантаження під час перехідних процесів, є критично важливим етапом їхнього проектування та сертифікації [1].

Використання традиційних пасивних навантажень не дозволяє імітувати реальні умови роботи сучасних пристроїв через високу паразитну індуктивність дротяних реостатів та температурний дрейф опору. Під час стрибків струму індуктивність обмотки створює гігантський опір, перетворюючи миттєвий фронт на повільне експоненційне наростання струму. Водночас класичні активні електронні навантаження в лінійному режимі супроводжуються колосальним виділенням тепла на кристалі транзистора, що створює небезпечний ризик виникнення локального перегріву та деструктивного вторинного пробою.

Для подолання цих фізичних обмежень розроблено спеціалізований пристрій тестування перехідних процесів, який підключається безпосередньо до вихідних клем ІДЖ. Апаратна платформа базується на масивах безіндуктивних планарних резисторів, які комутуються N-канальними польовими транзисторами виключно у швидкодіючому ключовому режимі. Фізична конструкція пристрою реалізована на багатошаровій друкованій платі з жорстко зафіксованою та оптимізованою товщиною діелектрика в 1 мм, що дозволяє максимально знизити паразитну індуктивність силових кіл [1-2].

Керування силовою частиною у конфігурації верхнього ключа здійснюється за допомогою високотехнологічного інтегрованого драйвера LTC7004. Його вбудований генератор помпування заряду самостійно формує високу напругу керування затвором, що

забезпечує миттєве примусове перезаряджання паразитної ємності великими імпульсними струмами та коефіцієнт заповнення імпульсів до 100%.

Програмно-апаратна архітектура керування побудована на базі мікроконтролера STM32. Застосування високошвидкісних багатоканальних аналого-цифрових перетворювачів у поєднанні з апаратними таймерами гарантує генерацію керуючих сигналів з наносекундною точністю без втручання центрального процесора. Для передачі величезних масивів вимірювальних даних в оперативну пам'ять використовується контролер прямого доступу до пам'яті, що повністю виключає виникнення будь-яких програмних затримок.

Програмне забезпечення мікроконтролера реалізує гнучке формування випробувальних профілів навантаження, включаючи режими циклічного прямокутного меандра, поодиноких імпульсів заданої тривалості та ступінчастого нарастання струму. Завдяки інтегрованому цифро-аналоговому перетворювачу та гнучкому налаштуванню констант таймерів користувач має можливість незалежно задавати амплітуду верхнього та нижнього рівнів струму, а також частоту комутації в діапазоні до 100 кГц. Крім того, вбудовані алгоритми безпеки здійснюють безперервний поцикловий моніторинг температури силових ключів та вихідної напруги тестованого джерела, що дозволяє миттєво заблокувати роботу драйвера LTC7004 у разі виникнення аварійних режимів або короткого замикання [3-4].

Під час експериментальної верифікації розробленого комплексу було проведено дослідження динамічних характеристик комерційних імпульсних перетворювачів при стрибкоподібній зміні навантаження від 10% до 90% від номінальної потужності. Отримані осцилограми перехідних процесів продемонстрували повну відсутність паразитних коливальних процесів, які зазвичай викликані індуктивністю вимірювальних кіл. Комплекс зафіксував амплітуду динамічного просідання та викиду напруги з роздільною здатністю 12 біт, що дозволило з високою точністю розрахувати час відновлення вихідної напруги ІДЖ та оцінити якість роботи контуру зворотного зв'язку досліджуваних пристроїв.

Такий інженерний підхід повністю усуває проблему затримки перемикання і дозволяє системі досягати екстремально високих значень швидкості наростання струму, які вимірюються амперами на мікросекунду, задовольняючи найсуворіші світові вимоги до верифікації ІДЖ.

Список використаних джерел

1. Analog Devices. (2026). DC2750A: Linduino compatible 4-channel gas sensor demonstration board. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/dc2750af.pdf
2. Technical University of Denmark. (2026). Thin film-based amperometric gas sensors. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/3855664/Jakobsen.pdf
3. EVBUM2101/D: TND6041/D evaluation board user’s manual (2026). https://www.onsemi.com/pub/collateral/evbum2101-d.pdf
4. Power Electronics News. (2026). Four tips on the uses of electronic loads. https://www.powerelectronicsnews.com/four-tips-on-the-uses-of-electronic-loads/

Tetiana Bulavinets
PhD, Assoc. Prof.,
Khrystyna Ivaniuk
D.Sc.,
Iryna Yaremchuk
D.Sc., Prof.,
Pavlo Stakhira
D.Sc., Prof.,
Natalia Kuzyk
PhD student
Lviv Polytechnic National University

EFFICIENT UNDOPED ORGANIC LIGHT-EMITTING DIODES BASED ON A NOVEL DONOR-ACCEPTOR TADF EMITTER

Abstract: *This study examines novel thermally activated delayed fluorescence (TADF) emitter compounds designed to maximize internal quantum efficiency. Photophysical characterisation confirms radiative decay, validating successful exciton harvesting via a delayed-emission channel. To evaluate electroluminescent performance, an undoped OLED device was fabricated, These findings demonstrate the emitter's operational stability and strong viability for next-generation optoelectronic applications.*

Keywords: *Organic light-emitting diode, Heterostructure, TADF.*

The continued advancement of flexible, wearable, and stretchable electronics, crucial for untethered applications such as continuous health monitoring, biomedical imaging, and electronic skins-relies heavily on the development of highly energy-efficient technologies [1]. Conventional inorganic light-emitting diodes struggle to meet the strict power and form-factor constraints of these next-generation devices due to their mechanical rigidity and high energy consumption. In contrast, organic light-emitting diodes (OLEDs) satisfy these modern demands by combining inherent flexibility and possible biocompatibility with exceptional energy efficiency and low-power manufacturability [2]. However, the extensive integration of organic optoelectronics into modern digital infrastructure necessitates the continuous development of versatile, highly efficient emissive materials. Harnessing the full potential of thermally activated delayed fluorescence (TADF) through optimized molecular design offers a promising pathway to maximizing internal quantum efficiency and minimizing power dissipation [1-3].

This study aims to provide an up-close examination of novel emitter material. The decay curves clearly exhibit multi-exponential behaviour. This confirms that a significant portion of the excitons is being harvested through a delayed emission channel, which aligns with the TADF mechanism expected for this material. These properties confirm its operational stability as a TADF emitter capable of maximizing internal quantum efficiency.

To evaluate its electroluminescent potential, an undoped OLED device architecture was fabricated. The resulting diode exhibited an emission peak, ELmax at 556 nm. Performance characterization revealed a maximum external quantum efficiency (EQE) of 3.36% and a peak brightness of 4547 cd/m2. Furthermore, the device attained a maximum current efficiency of 9.63 cd/A and a power efficiency of 5.46 lm/W.

Acknowledgement

This work was approved and financially supported by the Ministry of Education and Science of Ukraine under the grant program of the National Research Foundation, number 0124U003833

Віталій Макух,
здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня,
Мар'ян Малиняк
здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня,
Ольга Шимчишин
к.т.н., доцент
Національний університет «Львівська політехніка»

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ВІДНОСНО СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Анотація: *У роботі обґрунтовано актуальність впровадження систем динамічного позиціонування для мінімізації оптичних втрат та підвищення ефективності генерації електроенергії. Метою дослідження є проєктування автономного контролера активного трекера на базі мікроконтролера Arduino Nano. У результаті створено лабораторний прототип системи автоматичного стеження, що забезпечує коригування положення панелі на основі диференціального аналізу освітленості. Розроблена система характеризується стабільною роботою за умов низької інтенсивності сонячного випромінювання та оснащена модулем контролю енергоживлення.*

Ключові слова: *сонячний трекер, Arduino Nano, фоторезистор, автоматизація, енергоефективність, сервопривід, фотоелектрична панель.*

У сучасних умовах глобальної трансформації енергетичного сектору перехід до відновлюваних джерел енергії є одним із пріоритетних напрямів сталого розвитку. Сонячна енергетика розглядається як екологічно безпечне та практично невичерпне джерело енергії, здатне зменшити залежність від викопних видів палива. Однією з основних технічних проблем стаціонарних фотоелектричних установок є фіксоване положення панелей, яке не дозволяє ефективно компенсувати зміну положення Сонця протягом доби. Це призводить до зниження коефіцієнта корисної дії системи та втрат частини потенційної енергії сонячного випромінювання [1].

Ефективність роботи фотоелектричної панелі значною мірою визначається кутом падіння сонячного випромінювання на її поверхню. Відповідно до закону косинуса, освітленість поверхні зменшується зі збільшенням кута між напрямком сонячного променя та нормаллю до поверхні панелі. Зростання цього кута супроводжується підвищенням коефіцієнта відбиття та зниженням густини енергетичного потоку, що негативно впливає на вихідну потужність системи. Для мінімізації зазначених втрат доцільним є використання систем автоматичного стеження за Сонцем – сонячних трекерів [2].

Сучасні системи позиціонування поділяються на одноосьові та двохосьові залежно від кількості ступенів свободи. Одноосьові системи забезпечують орієнтацію панелі у напрямку схід–захід та дозволяють підвищити ефективність генерації приблизно на 20-25 %. Двохосьові трекери додатково враховують зміну висоти Сонця над горизонтом, що дає змогу збільшити продуктивність фотоелектричної системи до 35-45 % [3].

Для визначення положення джерела випромінювання застосовують астрономічні, сенсорні та комбіновані методи [4]. Для малопотужних та навчальних установок найбільш економічно доцільним та простим у реалізації є сенсорний метод на базі диференціального аналізу сигналів фоторезисторів, що дозволяє системі гнучко адаптуватися до локальних умов освітленості без потреби у GPS-орієнтуванні.

У межах даної роботи реалізовано сенсорний метод, який базується на порівнянні сигналів від фоторезисторів. Такий підхід є економічно доцільним, простим у реалізації та не потребує використання GPS-модулів або складних математичних моделей.

Розроблений сонячний трекер являє собою мехатронну систему, у якій мікроконтролер Arduino Nano виконує функції оброблення сигналів та керування виконавчим механізмом. Для визначення рівня освітленості використано фоторезистори типу GL5528, опір яких змінюється залежно від інтенсивності падаючого світла. Сигнали з датчиків надходять на аналогові входи мікроконтролера у вигляді напруги, сформованої подільниками напруги. Порівняння значень освітленості дозволяє визначити напрямок максимального світлового потоку та сформувати команду на поворот панелі.

Як виконавчий механізм застосовано сервопривід безперервного обертання, керування яким здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції. Зміна параметрів імпульсного сигналу забезпечує регулювання напрямку та швидкості обертання приводу. Для живлення системи використано літієву акумуляторну збірку типу 2S із вбудованим модулем BMS, що забезпечує захист від глибокого розряду та перевантаження. Додатково реалізовано USB-вихід для живлення зовнішніх пристроїв.

Програмне забезпечення розроблено мовою C++ із використанням середовища Arduino IDE. У програмі реалізовано алгоритм згладжування сигналів шляхом усереднення значень АЦП, що дозволяє зменшити вплив шумів та підвищити стабільність роботи системи. Для запобігання безперервному обертанню приводу за умов нестабільного освітлення впроваджено обмеження кількості циклів пошуку положення Сонця. Також реалізовано режим енергозбереження, у якому система автоматично припиняє активне стеження при недостатньому рівні освітленості.

Практичні випробування лабораторного прототипу підтвердили працездатність і стабільність розробленої системи. Під час експериментальних випробувань система демонструвала стабільне відстеження положення джерела світла за різних рівнів освітленості та змінної хмарності. Середній час реакції сервоприводу на зміну напрямку випромінювання становив близько 1-2 с. Використання алгоритму усереднення сигналів дозволило зменшити вплив шумів АЦП та уникнути хаотичних переміщень приводу. Використання сонячного трекера дозволяє підвищити ефективність роботи фотоелектричних панелей у середньому на 20-40 % порівняно зі стаціонарними конструкціями. Завдяки модульній архітектурі та простоті реалізації система може бути використана як основа для подальшого вдосконалення автономних та промислових фотоелектричних установок.

Список використаних джерел:

1. Що таке сонячна енергія та як вона працює? – [Електронний ресурс]. – https://sonergia.com.ua/shho-take-sonyachna-energiya-ta-yak-vona-pratsyuye/

2. Сонячні трекери для електростанцій. – [Електронний ресурс]. – https://220volt.com.ua/storage/catalog_products/169558/instruction/738.pdf

3. Hafez A.Z., Soliman A., El-Metwally K.A., Ismail I.M. *Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 91. P. 754-782.

4. Hafez A.Z., Soliman A., El-Metwally K.A., Ismail I.M. *Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 91. P. 754-782.

Мищишин Денис Ярославович
аспірант
Івах Марія Степанівна
к.т.н., доцент,
Національний університет «Львівська політехніка»

ДІЕЛЕКТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ РІДКОКРИСТАЛІЧНИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ LCD-ДИСПЛЕЇВ

Анотація: *У роботі розглянуто можливість підвищення енергоефективності LCD-дисплеїв шляхом оптимізації діелектричних властивостей рідкокристалічних композитів на основі нематика 5CB з хіральними піридиновими домішками. Проаналізовано вплив зростання діелектричної анізотропії на порогову напругу Фредерікса та енергоспоживання керуючої електроніки. На основі літературних даних виконано теоретичну оцінку зниження порогової напруги при допуванні 5CB композитами LC1 та LC2.*

Ключові слова: *рідкі кристали, 5CB, LCD-дисплеї, діелектрична анізотропія, енергоефективність, рідкокристалічні композити.*

Зниження робочої напруги рідкокристалічної комірки є одним із підходів до підвищення енергоефективності LCD-дисплеїв. Ключовим параметром, що визначає робочу напругу LCD у планарній комірці (клітинка Фредерікса), є діелектрична анізотропія, що визначається як:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp} \tag{1}$$

Порогова напруга перемикання описується виразом:

$$V_{th} = \pi\sqrt{\frac{K_{11}}{\varepsilon_0 \Delta\varepsilon}}\ , \tag{2}$$

де K_{11} − константа пружності розгину. Збільшення $\Delta\varepsilon$ призводить до зменшення порогової напруги перемикання, що потенційно може сприяти зниженню енергоспоживання драйверів пікселів [1, 2].

Перспективним напрямом є введення хіральних молекулярних домішок у нематичні рідкокристалічні матриці. Метою роботи є теоретичне обґрунтування можливості зниження енергоспоживання LCD-дисплеїв шляхом збільшення діелектричної анізотропії рідкокристалічних композитів на основі 5CB, а також подальша експериментальна перевірка.

У роботі розглянуто рідкокристалічні композити на основі нематика 5CB з хіральними сполуками LC1 та LC2 у концентраціях 2 і 5 мас.% [3, 4]. Діелектричні властивості таких систем досліджують методом імпедансної спектроскопії у діапазоні 1 кГц − 10 МГц.

Встановлено, що введення домішок призводить до зростання $\Delta\varepsilon$ від 7,29 (чистий 5CB) до 8,20 при 5 мас.% LC1 та до 8,58 при 5 мас.% LC2 (~18%) [3]. На основі цих значень оцінено вплив на порогову напругу: підставляючи $\Delta\varepsilon = 7.29 => 8.587.29$ у формулу Фредерікса і фіксуючи $K_{11} = 6.2$ пН для 5CB, отримаємо зниження порогової напруги:

$$1 - \sqrt{\frac{7.29}{8.58}} \approx 7.8\% \tag{3}$$

Для типових LCD-комірок із пороговою напругою $V_{th}{\sim}1 - 2\ B$це дає практичну економію $\sim 0.08 - 0.16\ B$на піксель. Композити 5CB/LC1 та 5CB/LC2 є перспективними для

подальшої оптимізації діелектричних параметрів LCD. Фазовий стан суміші є одним із ключових обмежувальних факторів. POM-дослідження підтверджують збереження нематичної фази в усіх досліджуваних концентраціях (2 і 5 мас.%) [3]. Перехід до смектичної фази є критичним обмеженням через погіршення рухливості та часу відгуку. Фазові переходи в рідкокристалічних композитах є чутливими до зовнішніх впливів і складу системи, а перехід до ізотропного або смектичного стану обмежує практичне застосування [5].

Діелектрична релаксація та вибір робочої частоти є важливими для ефективної роботи LCD. Процеси діелектричної релаксації у РК-матеріалах відбуваються в діапазоні 10 кГц − 1 МГц і визначають рівень діелектричних втрат при перемиканні [2]. Показано, що LC1 зміщує частоту релаксації f_r у бік вищих значень (~1,5 МГц), тоді як LC2 — у бік нижчих (~42 кГц) [3]. Низьке значення f_r для LC2 (~42 кГц) потенційно обмежує використання таких композитів у високочастотних AC-схемах через зростання діелектричних втрат поблизу області релаксації. Добір добавки з оптимальним f_r дозволяє мінімізувати діелектричні втрати у робочому діапазоні частот конкретного типу дисплея, що знижує енергетичні втрати в комірці. Низька іонна провідність також є важливою для запобігання деградації орієнтаційного шару та паразитному енергоспоживанню [6].

Теоретичний аналіз показав, що введення хіральних добавок LC1 та LC2 у нематичну матрицю 5CB збільшує діелектричну анізотропію на ~18%, що теоретично відповідає зниженню порогової напруги перемикання Фредерікса приблизно на 7,8% ($\sim 0.08 - 0.16\ B$ на піксель). При цьому зберігається нематична фаза в усьому досліджуваному концентраційному діапазоні. Добавка LC1 є більш перспективною з точки зору діелектричних втрат завдяки вищій частоті релаксації. Отримані результати обґрунтовують доцільність подальшого експериментального дослідження композитів 5CB/LC1 та 5CB/LC2 як матеріалів для енергоефективних LCD-дисплеїв/

Список використаних джерел

1. Lagerwall J.P.F., Scalia G. A new era for liquid crystal research // Curr. Appl. Phys. — 2012. — Т. 12. — С. 1387–1412.

2. Dhar R. Frequency and temperature-dependent dielectric properties of liquid crystal systems // J. Mol. Liq. — 2024. — Т. 413. — Стаття 125941.

3. Canli N.Y. та ін. Investigation of dielectric properties of 5CB and chiral pyridine based liquid crystal composites // Indian J. Phys. — 2025. — Т. 99, № 9. — С. 3331–3340.

4. Vardar D. та ін. Synthesis and mesomorphic properties of chiral pyridine-based calamitic compounds // Liq. Cryst. — 2021. — Т. 48. — С. 850–862.

5. Mykytyuk Z., Barylo G., Kremer I., Ivakh M., Kachurak Y., Kogut I. Features of the transition to the isotropic state of the liquid crystal sensitive element of the gas sensor under the action of acetone vapor // Physics and Chemistry of Solid State. — 2022. — Т. 23, № 3. — С. 473–477.

6. Gangwar L.K. та ін. Electro-optic and dielectric study of ferroelectric liquid crystal // J. Appl. Phys. — 2019. — Т. 125. — Стаття 125108.

Ihor Nechyporuk
Bachelor student,
Natalia Kuzyk
Assistant
Lviv Polytechnic National University

ENHANCING THE DURABILITY OF PEROVSKITE SOLAR CELLS THROUGH METHODS OF ENCAPSULATION

Abstract: *In this review the milestone progress of development and commercialization of the perovskite solar cells (PSCs) and their relevance is summarized. The adaptability of perovskite solar cells to flexible substrates, coupled with their low-cost production technology make them promising materials for solar energy. The problem that caused reduction of their energy efficience and appropriateness to sustainable technologies is conditioned by degradation of perovskite solar cells were evaluated and divided into several categories. Study provided efficient methods of elongating PSCs life for commercial benefit.*

Keywords: *heterostructure, perovskite, solar cells, organic, photovoltaic.*

According to the European Green Deal 2050, the transition to carbon-neutral energy requires the implementation of technologies that are not only environmentally friendly throughout the entire life cycle, but also efficient.

There are more than ten years since the discovery of perovskite solar cells (PSCs). The number of studies on perovskite semiconductor materials and devices, and in particular PSCs, continue to grow exponentially. Although the efficiency of PSCs exceeded 25.5%. In the quest for superior and more economical alternative energy sources. perovskite solar cells occupy a prominent position. Notably, the relatively elevated efficiency of PSCs, when compared to organic solar cells, renders them appealing for further investigation and practical implemantation.

Despite the theoretically recorded efficiency of 25%, the main obstacle to the commercialization of PSCs remains their sensitivity to moisture, oxygen and ultraviolet [3]. The problems that cause the degradation of perovskite solar cells can be divided into two categories. The first is (1) intrinsic instability, which on the one hand includes structural, chemical and thermal instability, mainly caused by the chemical composition. On the other hand, it includes instability caused by defects. It is reported that defects that exist in the layers of perovskite, at grain boundaries and interfaces, can create pathways for easier ion migration, which causes a phase transition and leads to a decrease in the performance of the cell. The second category is (2) extrinsic instability, which includes environmental factors such as moisture, oxygen and ultraviolet (UV) rays and can directly destroy the perovskite architecture [1, 2].

Encapsulation is critically necessary to protect the active layers from the external environment. Currently, encapsulation is the most effective strategy for protecting devices from external outdoor conditions. This typically involves sandwiching the device between barrier materials [3].

Encapsulation methods for perovskite solar cells (PSCs) are divided into two main architectural strategies: (1) thin-film encapsulation (TFE) and (2) edge seal. TFE is a method in which a thin film as encapsulant is deposited on top of the module. And an edge seal method in which sealant is placed around the module [1].

Even though certain compounds allow to withstand oxygen, moisture, UV radiation, and even hail, hot-sealed adhesives are inappropriate for long-term application on heat-sensitive hybrid

perovskite materials or adjacent functional layers. While perovskite layers are commonly treated at temperatures below 150 °C, the organic hole transporting layer is typically manufactured at room temperature, meaning it could be compromised during the lamination process which occurs at ~140.

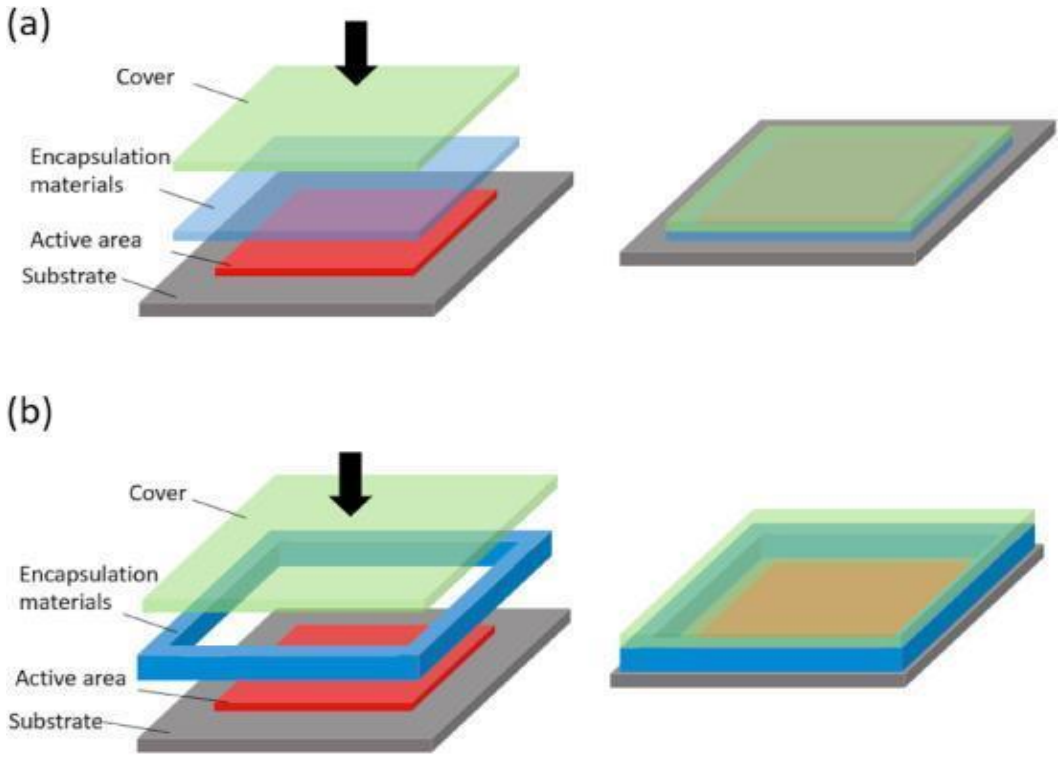


Figure 1 - Methods of encapsulation PSC

In addition, certain films are vulnerable to external damage, which is why the service life of such TFEs remains relatively short. The use of an edge sealing material applied around the cell avoids direct contact with the perovskite layers, thus minimizes the risk of the sealant reacting with them. The use of rigid edge sealing materials is ineffective, as this will help avoid cracking during temperature changes [1].

Based on the understanding of the nature of degradation mechanisms in PSCs, a number of synthetic approaches have been introduced including doping, compositional and dimensional engineering, grain boundary modification, and the development of new functional materials for electron and hole transportation layers. [2].

Such a comprehensive approach to improving internal charge collection and protection from external degradation may allow perovskite technologies to become a full-fledged ecological replacement for fossil silicon.

References

1. Li, J., Xia, R., Qi, W., Zhou, X., Cheng, J., Chen, Y., ... & Zhang, X. (2021). Encapsulation of perovskite solar cells for enhanced stability: Structures, materials and characterization. Journal of Power Sources, 485, 229313

2. Correa-Baena, J. P., Saliba, M., Buonassisi, T., Grätzel, M., Abate, A., Tress, W., & Hagfeldt, A. (2017). Promises and challenges of perovskite solar cells. Science, 358(6364), 739-744.

3. Glowienka, D., et al. “Degradation of perovskite solar cells: Insights from accelerated testing versus outdoor aging in two climate zones.” Solar Energy, Vol. 303, 2026.

Юлія Нечитайло
к.т.н., доц.,
Владислав Бодров
Здобувач РВО бакалавр
Державний біотехнологічний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ

Анотація: *Розглянуто сучасні підходи до оптимізації режимів роботи електродвигунів у промисловості з метою підвищення енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат. Проаналізовано основні фактори, що впливають на енергоспоживання електроприводів, а також досліджено методи регулювання їх роботи. Запропоновано використання інтелектуальних систем керування та частотного регулювання як ефективних засобів оптимізації.*

Ключові слова: *Електродвигун, енергозбереження, частотний перетворювач, оптимізація, електропривод.*

На етапі розвитку промислового виробництва електродвигуни виступають ключовими перетворювачами енергії, споживаючи, за оцінками, від 60% до 70% всієї електроенергії, генерованої потреб промисловості [1]. В умовах глобального тренду на декарбонізацію та перманентного зростання вартості енергоресурсів, підвищення енергетичної ефективності електроприводів стає стратегічним завданням для забезпечення конкурентоспроможності підприємств. Це особливо актуально для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, які в силу своєї конструктивної простоти та надійності превалюють у насосних, вентиляційних та компресорних установках. Основною причиною низьких показників енергоефективності є невідповідність встановленої потужності двигуна. Робота електроприводу у режимах недовантаження (нижче 50% від номінальної потужності) веде до різкого зниження коефіцієнта потужності $cos\ \phi$ і ККД, що з переважанням постійних втрат у сталі (магнітні втрати) над змінними (електричними) втратами в обмотках [4].

Як показує залежність на рис. 1, робота у зоні малих навантажень характеризується нераціональним споживанням реактивної потужності з мережі. Крім того, серйозну проблему становлять пускові режими. Прямий пуск асинхронного двигуна супроводжується 5-7-кратним перевищенням номінального струму, що викликає ударні механічні навантаження на вал та підшипники. Відповідно до технічних регламентів з експлуатації електромашин, інтенсивне нагрівання ізоляції у такі моменти скорочує її ресурс відповідно до термічного закону зносу [3].

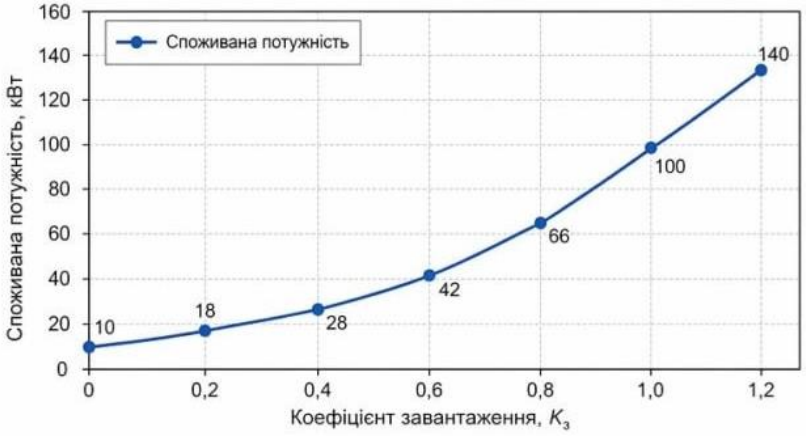


Рисунок 1 - Залежність споживаної потужності від коефіцієнта завантаження

Ефективність роботи системи визначається сукупністю технічних та експлуатаційних факторів. Експериментально встановлено, що при зниженні навантаження менше 50% від номінальної коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна різко падає [4]. На рис. 2 продемонстровано типову структуру втрат, аналіз якої дозволяє виділити пріоритетні напрямки модернізації.

Рисунок 2 - Структура енергетичних втрат в асинхронному електродвигуні

Впровадження частотно-регульованого електроприводу (ЧРП) визнано найефективнішим методом оптимізації механізмів з квадратичною моментною характеристикою. Відповідно до законів подібності для відцентрових машин, споживана потужність пропорційна кубу частоти обертання:

$$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$$

Зниження швидкості обертання вентилятора лише на 20% дозволяє знизити енергоспоживання майже вдвічі. На рис. 3 наочно показано перевагу переходу від механічного регулювання (заслінки, клапани) до електричного. Крім прямої економії використання ЧРП дозволяє реалізувати функції «м'якого» пуску, повністю нівелюючи негативні ефекти, описані в [3], і знижуючи навантаження на локальну енергосистему [5].

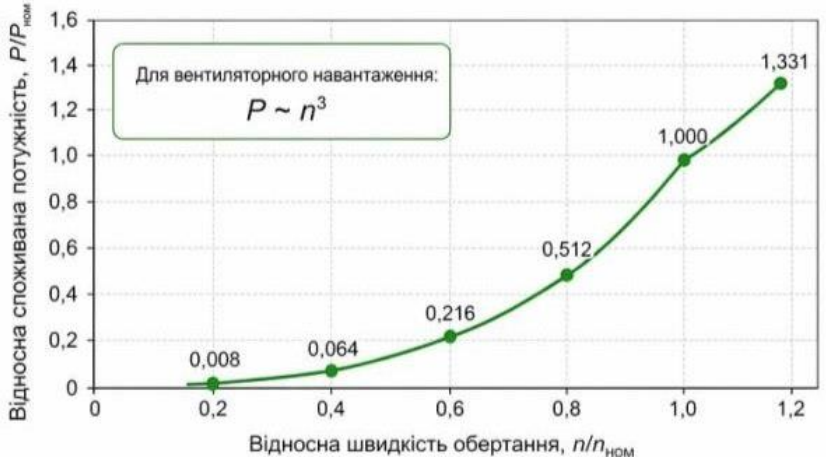


Рисунок 3 - Залежність споживаної потужності від швидкості обертання двигуна

Сучасна парадигма «Індустрія 4.0» передбачає перехід до інтелектуальних систем управління (ІСУ), які інтегрують у собі методи машинного навчання та передиктивної аналітики. На відміну від класичних ПІД-регуляторів, ІСУ здатні адаптуватися до параметрів об'єкта, що змінюються, в реальному часі.

Структура представлена на рис. 4, включає сенсорний шар (датчики струму, вібрації, температури) і обчислювальний блок, що реалізує алгоритми пошуку точки максимальної ефективності (Maximum Efficiency Tracking). Такі системи дозволяють не тільки заощаджувати до 30% електроенергії, а й здійснювати моніторинг стану обладнання (Condition Monitoring), передбачаючи можливі поломки до їхнього фактичного настання [7].

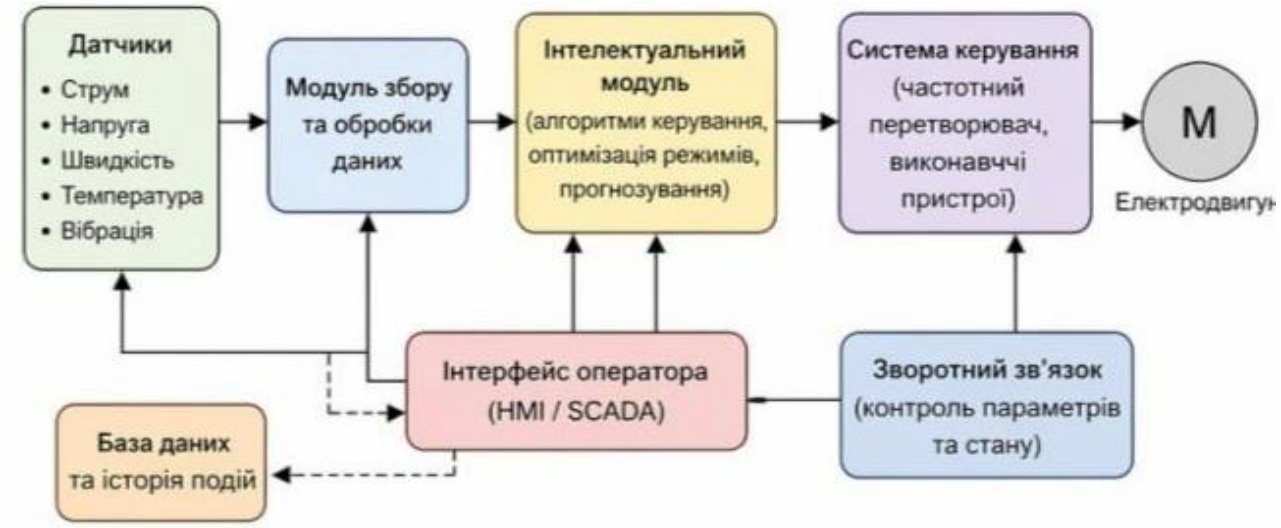


Рисунок 3 - Узагальнена структура інтелектуальної системи керування електроприводом

Запропонована структура комплексної оптимізації враховує не лише поточні параметри навантаження, а й сукупну вартість володіння (ТСО) обладнанням. Запропонований підхід базується на синергії частотної модуляції та нейромережевих моделей прогнозування технологічного циклу. В результаті дослідження підтверджено, що системна оптимізація режимів роботи електродвигунів є фундаментальним фактором підвищення енергоефективності промислового сектора. Реалізація запропонованих заходів дозволяє забезпечити значний економічний ефект та підвищити екологічну стійкість виробництва за рахунок зниження непрямих викидів CO_2.

Список використаних джерел

1. Копилов І. П. Електричні машини. Київ: Вища школа, 2018. 607 с.
2. Бойко В. С. Енергозбереження в електроприводах. Харків: ХНУРЕ, 2020. 312 с.
3. Chapman S. J. Electric Machinery Fundamentals. New York: McGraw-Hill, 2012. 688 p.
4. Терехов В. М. Асинхронні двигуни: аналіз та експлуатація. Львів: Політехніка, 2019. 256 с.
5. Bose B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 738 p.
6. Плахотник В. В. Захист електродвигунів у промислових мережах. Київ: НТУУ «КПІ», 2021. 198 с.
7. International Energy Agency. Energy Efficiency 2022. Paris: IEA, 2022. 280 p.

Богдан Оніщук
аспірант
Ірина Кремер
к.т.н., доцент
Національний університет «Львівська політехніка»

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИЙ БОРТОВИЙ РК-ОПТИЧНИЙ ГАЗОВИЙ СЕНСОР ДЛЯ БПЛА З АДАПТИВНИМИ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ТА GPS-ПРИВ'ЯЗКОЮ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ

Анотація: *Розглянуто БПЛА-версію рідкокристалічного оптичного газового сенсора для моніторингу аміаку та ацетону. Пристрій забезпечує GPS-прив'язку вимірювань, автономний запис на MicroSD та адаптивне керування енергоспоживанням у трьох режимах, що зменшує споживання з ~85 до ~12 мА.*

Ключові слова: *БПЛА, рідкий кристал, газовий сенсор, GPS, енергоефективність, моніторинг атмосфери.*

Оперативний моніторинг газового забруднення атмосфери є актуальним завданням для промислової безпеки, екологічного контролю та цивільного захисту. Стаціонарні вимірювальні станції не дозволяють охопити великі площі й виявити локальні осередки викидів токсичних речовин у реальному часі. Застосування безпілотних авіаційних систем (БАС) забезпечує мобільний просторово розподілений моніторинг із прив'язкою кожного вимірювання до географічних координат [1]. Водночас обмежений ресурс акумуляторної батареї (АКБ) БПЛА визначає жорсткі вимоги до енергоефективності бортового обладнання.

У попередній роботі [2] авторами розроблено оптичну сенсорну систему детектування газових слідів на основі рідкокристалічного (РК) чутливого перетворювача з двоканальним оптичним трактом та температурною компенсацією. Схема пристрою містить мікроконтролер Arduino Nano V3, видимий RGB-канал (WS2812 / TCS34725, 450–630 нм), ІЧ-канал (3535IR / InGaAs NIP300, 900–1700 нм) з трансімпедансним підсилювачем AD8065ARZ, сенсор температури та вологості DHT11. Для застосування у складі БПЛА схему доопрацьовано: вилучено дисплей як зайвий споживач енергії, натомість додано GPS-модуль Neo-6M (UART, координати lat/lon/alt з точністю ±2,5 м), MicroSD-модуль (SPI, запис CSV) та дільник напруги (ADC) для контролю АКБ.

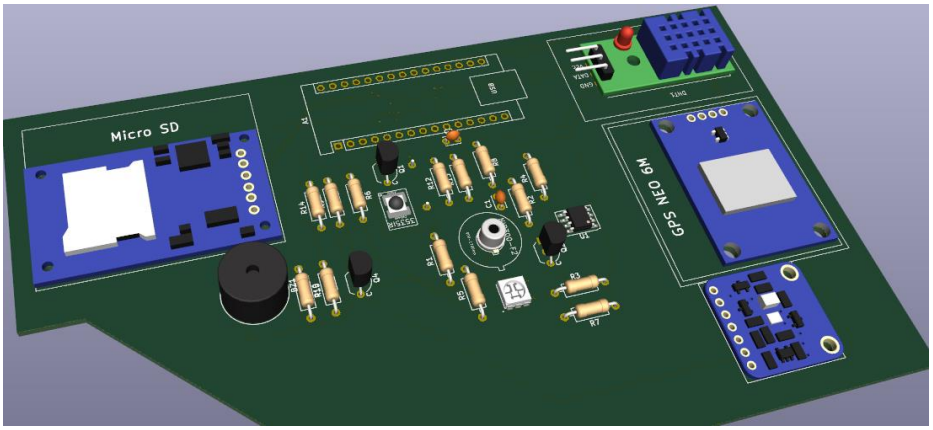


Рисунок 1 – 3D-модель PCB бортового РК-оптичного газового сенсора для БПЛА

Кожне вимірювання записується мікроконтролером на MicroSD-карту у форматі CSV із полями: мітка часу UTC, координати lat/lon/alt, оптичний відгук видимого та ІЧ-каналів, температура, вологість, рівень АКБ та поточний режим роботи. GPS-модуль Neo-6M передає дані через UART у форматі NMEA 0183; парсяться речення $GPRMC та $GPGGA для отримання координат з точністю ±2,5 м. Запис здійснюється синхронно з вимірюванням оптичного сигналу після отримання валідного GPS-фіксу.

Рівень заряду АКБ визначається через дільник напруги на аналоговому вході A0. Система перемикається між трьома режимами: NORM (> 50 % АКБ) — обидва канали активні, 1 вим./с, ~85 мА; ECO (20–50 %) — лише видимий канал, 1 вим./5 с, ~42 мА; CRIT (< 20 %) — глибокий sleep-mode, 1 вим./30 с, ~12 мА. Таким чином споживання скорочується у понад 7 разів порівняно з нормальним режимом.

Після завершення місії CSV-файл обробляється скриптом Python (pandas, folium): координати та оптичний сигнал використовуються для побудови треку польоту з кольоровим маркуванням рівня забруднення — від зеленого (фон) до червоного (перевищення порогу), що дозволяє ідентифікувати осередки викидів без складної інтерполяції.

Запропонований пристрій вперше поєднує GPS-прив'язку вимірювань, автономний запис на MicroSD та адаптивне керування енергоспоживанням. Відмова від дисплея й перехід у sleep-mode скорочують споживання з ~85 до ~12 мА, суттєво подовжуючи час автономної роботи на борту БПЛА. Перспективою є польові випробування та оцінювання просторової роздільної здатності залежно від висоти і швидкості польоту.

Список використаних джерел

1. Burgués J., Marco S. Environmental chemical sensing using small drones: A review. Science of The Total Environment. 2020. Vol. 748. P. 141172. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141172
2. Оніщук Б. А., Кремер І. П. Розроблення оптичної сенсорної системи детектування газових слідів з температурною компенсацією. Інновації та науковий потенціал світу: зб. наук. праць VIII Міжнар. наук. конф., Харків, 3 квітня 2026 р. С. 194–195. https://doi.org/10.62731/mcnd-03.04.2026.004
3. Mykytyuk Z., Barylo H., Kremer I. et al. Nonlinear features of the transition of a liquid crystalline mixture into an isotropic state under the action of alcohol vapors. Physics and Chemistry of Solid State. 2023. Vol. 24, No. 1. P. 64–69. https://doi.org/10.15330/pcss.24.1.64-69
4. Kachurak Y. M. Liquid crystal sensitive elements of optical sensors based on nematic LC E7 and cholesteric LC CB15 as a detector of acetone and alcohols: PhD thesis, specialty 171. Lviv Polytechnic National University. Lviv, 2024.
5. Mykytyuk Z. M., Barylo H. I., Kremer I. P. et al. Sensitive liquid crystal composites for optical sensors. Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2024. Vol. 768, No. 2. P. 1–8. https://doi.org/10.1080/15421406.2023.2235865
6. Gvozdovskyy I. A., Kachurak Y. M., Vashchenko P. V. et al. Liquid crystal sensors for detection of volatile organic compounds. Functional Materials. 2023. Vol. 30, No. 2. P. 303–308. https://doi.org/10.15407/fm30.02.303

Leonid Ozirkovskyi
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Pavlo Bratiuk
PhD student,
Lviv Polytechnic National University

BEHAVIOR ANALYSIS OF RENEWABLE ENERGY SYSTEM COMPONENTS IN ENERGY-SAVING STRATEGIES

Abstract: *Using technology based on structural automata modeling is proposed to expand the scope for analyzing the behavior of switching voltage converters. Using the duty cycle as an integral parameter allows for adaptive control of energy conversion, thereby enhancing efficiency under various operating conditions. Integrating the analysis of physical energy conversion processes with intelligent algorithms that control component behaviour in renewable energy systems improves energy saving strategies.*

Key words: *duty cycle, structural-automata model, switching voltage converters, adaptive control.*

One of the basic components of modern electronic devices and renewable energy systems is the switched voltage converters (SVC) based on pulse width modulation (PWM) principles.

In classical PWM-based topologies, the electrical properties of SVC depend on the amount of energy accumulated in the inductive storage device, and the dynamics of its conversion. The process of accumulating and converting energy is controlled by a PWM parameter known as the 'duty cycle'.

In [1], an original method is proposed for converting energy from direct current voltage sources in to pulse energy, which expands the capabilities of PWM for regulating and optimizing the operating modes of SVC, particularly in terms of energy efficiency. Figure 1 shows a screenshot of the Multisim environment during analysis of a step-up SVC topology designed using this method. In this topology, separate switches (Q1 and Q2) provide independent control of energy accumulation in inductive (L1) and capacitive (C1) energy storage devices, as well as the simultaneous transfer of accumulated energy to the load (R5). The relationship between the duty cycle and the formation of energy conversion modes, as well as its impact on the dynamics of these modes, is deepened in this topology. This makes the duty cycle an instrumental parameter that integrates the control of physical energy conversion processes with comprehensive optimization algorithms. The result is a balance between the efficiency and adaptability of SVC.

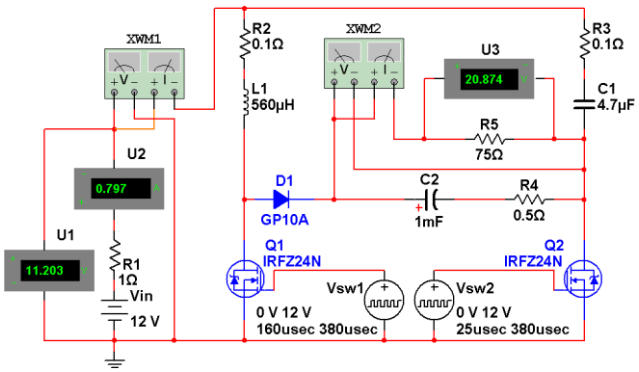


Figure 1 - Multisim simulation of independent control using switches Q1 and Q2 to adjust the duty cycles t_{L1}/T and t_{C1}/T, respectively, taking into account losses in the storage devices L1 and C1.

Using the duty cycle as a basis therefore enables intelligent algorithms to be implemented for

the simultaneous regulation of the SVC electrical parameters and control of their operating modes. This is achieved by monitoring a range of indicators, such as temperature, reliability, efficiency, energy savings and more. This makes the duty cycle a versatile tool for flexibly controlling the behavior of SVC under varying operating conditions.

To study the behavior of the SVC with the topology in Figure 1, a basic structural-automata model was developed by applying the technology of analytical modeling of algorithms for the behavior of radio-electronic systems [2]. Figure 2 shows a graph of the changes in SVC states 1–7 when the threshold values of three controlled P_N parameters are reached under the influence of random factors, for example, fluctuations in the illumination intensity of solar panels (A) and the battery discharge rate (B). The intensity of state changes is controlled by adjusting the duty cycles t_{L1}/T and/or t_{C1}/T of the L1 and C1 energy storage devices using switches Q1 and Q2, respectively.

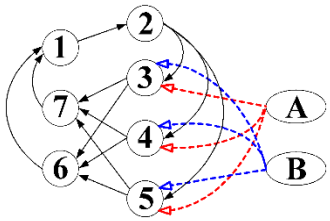


Figure 2 - Graph of states of the structural-automata model for the topology shown in Figure 1: "1" – energy accumulation in storage devices L1 and C1; "2" – simultaneous transfer of accumulated energy to load R5; "3", "4", and "5" – monitoring of the values of parameters P_1, P_2, and P_3, respectively; "6" and "7" – regulation of duty cycles t_{C1}/T and t_{L1}/T under conditions of fluctuating solar panel illumination intensity "A" and varying battery discharge rates "B".

The proposed approach combines an analysis of the SVC electrical parameters with an analysis of dynamic processes resulting from changes in operating conditions, both internal and external. This opens up new opportunities to improve the SVC and optimize the efficiency of renewable energy systems, the parameters of which vary on both the load side and the primary power source side. Using the duty cycle as a universal parameter to integrate mathematical modeling of physical energy conversion processes with analytical modeling of the algorithms that control their behavior provides a new level of controllability and efficiency.

In particular, it allows for: optimizing energy efficiency through adaptive duty cycle control; reduce losses in power components through precise control of energy accumulation and conversion processes; use smart control algorithms to adapt energy saving modes to destabilizing factors; improve response behavior to changes in operating conditions, etc. In the future, this will facilitate the development of energy-saving strategies and innovative components for renewable energy systems. Smart SVCs will adapt their parameters in real time to changes in internal and external operating conditions, ensuring maximum energy efficiency in distributed generation networks.

References

1. Bratiuk, P., Ozirkovskyi, L. (2023). *Method of increasing efficiency, mean of control and tool of analysis of the use energy of power source pulse laser range finder*, Automation of Technological and Business Processes, 15(3), 2023, 9-19.
2. Volochiy, B., Mandziy, B., Ozirkovskyi, L. (2012). *Extending the features of software for reliability analysis of fault-tolerant systems*. Computational Problems of Electrical Engineering, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 113-121.

Pavlo Stakhira
D.Sc., Prof.
Mykhailo Shchetinin
PhD student
Lviv Polytechnic National University

NUMERICAL SIMULATION OF ELECTRON - CHARGE TRANSPORT IN ORGANIC THIN FILM

Abstract: *simplified analytical models for charge transport in organic thin films, such as Mott-Gurney law ($J \propto V^2$), fail to capture critical device physics, including diffusion currents and finite injection barriers under high electric fields. This work presents a robust numerical implementation of the Drift-Diffusion (DD) model coupled with the Poisson equation to investigate charge transport in organic semiconductors.*

Keywords: *OLED, Numeric Simulation, Drift-Diffusion, Poisson, Charge Transport.*

To accurately predict the optoelectronic behavior if organic semiconductor devices, we must precisely model both their electrostatic and charge transport properties. The electrostatic potential $\psi(x)$ across the active layer is governed by the 1D Poisson equation. Fundamentally, this equation represents Gauss's law for electricity applied to a continuous medium, mapping how the spatial distribution of net volumetric charge density alters the local electric field. In the context of organic light-emitting diodes (OLEDs), the Poisson equation provides the essential electrostatic feedback loop.

$$\frac{d}{dx}\left(\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{d\psi}{dx}\right) = q(n-p) \tag{1}$$

As carriers are injected from the metallic electrodes, they form a dense space-charge cloud near the interfaces. The continuity equation presents the dynamic balance and spatial evolution of free carrier concentrations within the device under steady-state conditions.

$$\begin{aligned} \frac{1}{q}\frac{dJ_n}{dx} &= R(n,p) - G(x) \\ -\frac{1}{q}\frac{dJ_p}{dx} &= R(n,p) - G(x) \end{aligned} \tag{2}$$

here J_n and J_p represent the electron and hole current densities, respectively, while $R(n,p)$ and $G(x)$ denote the net recombination rate and external generation rate.

Although the analytical drift-diffusion equations are well-known, solving them numerically on a discrete grid introduces instabilities. Standard central-difference approximations fail when the local electric field exceeds the thermal voltage scale. In this drift-dominated regime, the numerical system produces severe artificial oscillations and non-physical negative carrier concentrations. To eliminate this instability, we employ the classical Scharfetter-Gummel discretization scheme.

Unlike simplified analytical models, such as Mott-Gurney law, our approach accounts for both drift and diffusion components. The steady-state behavior of electron transport is described by the Poisson equation (3) and the electron continuity equation (4) [1, 2]:

$$\frac{d}{dx}\left(\epsilon_0 \epsilon_r \frac{d\psi}{dx}\right) = qn \tag{3}$$

$$\frac{1}{q}\frac{dJ_n}{dx} = 0 \quad (4)$$

Where ψ is the potential, n is electron concentration, q is elementary charge, $\epsilon_0\epsilon_r$ is permittivity.

The system of non-linear equations is solved self-consistently using the Gummel iteration scheme. To ensure numerical stability under high electric fields (> 10^5 V/cm), we employed the Scharfetter-Gummel (SG) [4] discretization technique for the continuity equation. An asymmetric adaptive grid refinement strategy was implemented to accurately capture the steep carrier concentrations gradients at the metal-organic interfaces.

The simulator was validated using experimental data from an Alq_3 thin film (length is 215 nm) with a measured electron mobility $\mu = 3.404 \cdot 10^{-7}$ cm^2 $V^{-1}s^{-1}$ by susceptance spectroscopy [3]. Numerical results demonstrate a significant deviation from the classic $J \propto V^2$ relationship at low voltages (< 3V) due to the dominant diffusion current, and at high voltages (> 8V) where the current becomes injection-limited. The model achieved a high degree of correlation with experimental I-V characteristics, providing a deeper insight into the transition between Injection-Limited (IL) and Space-Charge-Limited Current (SCLC) regimes.

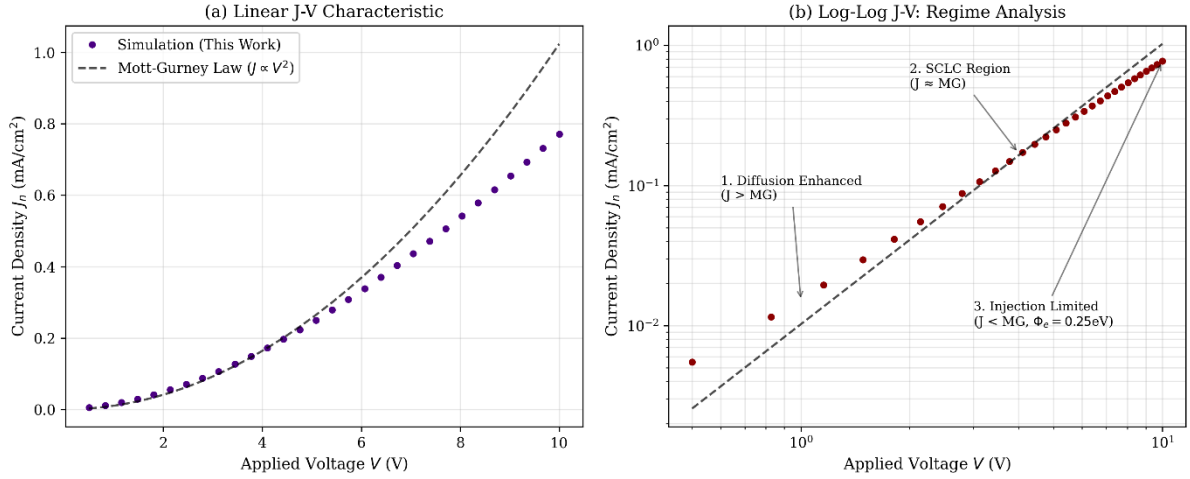


Figure 1 - J-V characteristics for the 215 nm Alq_3. a) Linear scale comparison between the developed numerical framework and classical Mott-Gurney theory (dashed line). b) Log-log plot highlights the transition between distinct physical transport regimes.

Acknowledgement

The research presented in this paper was funded by the National Science Foundation (NSF) (Grant No 0124U003833).

References

1. Qin, Z., Zhang, Y., & Guo, J. (2024). SCAPS simulation and DFT study of ultra-thin lead-free perovskite solar cells based on RbGeI3. Optics Communications, 554, 130187.
2. Doan, D. H., Glitzky, A., & Liero, M. (2019). Analysis of a drift–diffusion model for organic semiconductor devices. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik, 70(2), 55.
3. Gartland, Jr, E. C. (1993). On the uniform convergence of the Scharfetter–Gummel discretization in one dimension. SIAM journal on numerical analysis, 30(3), 749-758.
4. Takagi, K., Abe, S., Nagase, T., Kobayashi, T., & Naito, H. (2015). Characterization of transport properties of organic semiconductors using impedance spectroscopy. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 26(7), 4463

СЕКЦІЯ 3 | Енергоефективні процеси та матеріали в хімічній інженерії та технологіях
SECTION 3| Energy-Efficient Processes and Materials in Chemical Engineering and Technologies

Vyzdryk O.T.
Master student
Atamanyuk, V.M.
DSc, professor
Chyzhovych R.A.
PhD, assistant
Lviv Polytechnic National University

INVESTIGATION OF DISTILLERY STILLAGE DUST SEPARATION EFFICIENCY IN A CYCLONE USING CFD MODELING METHODS

Abstract. *This paper evaluates the separation efficiency of corn alcohol distillery stillage dust in a cyclone using CFD simulations. Results for the base model indicate a collection rate of 91.07% due to the low organic particle density. To improve performance, the study investigates a geometric modification of the inlet through an internal profiling baffle that narrows the flow passage. Numerical experiments with 120 mm and 60 mm widths demonstrate that, while efficiency reaches 92.48%, hydraulic resistance increases exponentially. The 120 mm width is identified as the optimal design, balancing a 91.90% recovery rate with acceptable energy consumption.*

Keywords: *Cyclone separator, corn distillery stillage, CFD modeling, ANSYS Fluent, geometric optimization, separation efficiency, pressure drop, organic dust, circular economy.*

The current stage of development of the food industry and the agro-industrial complex is inextricably linked to the transition to the principles of zero-waste production (the circular economy). Food industry enterprises, particularly distilleries, generate significant volumes of secondary organic raw materials, such as corn distillery stillage. The technology for its processing requires mandatory drying; however, this process entails the problem of intensive entrainment of fine organic dust. Emissions from such a product not only violate sanitary and environmental standards but also cause direct economic losses due to the irreversible loss of valuable biomass.

Cyclones are traditionally used for dry gas cleaning; however, separating stillage dust is complicated by its low true density (313.5 kg/m³), which results in high aerodynamic lightness. To improve the separation efficiency of this system, computational fluid dynamics (CFD) was applied using the ANSYS Fluent software package. The RNG k-epsilon model was used to describe the turbulent structure of the swirling flow, while the dynamics of solid particles were modeled using the Euler-Lagrangian approach (DPM).

Numerical modeling of a standard CN-15 cyclone (900 mm in diameter) at a gas velocity of 20.8 m/s showed that the base collection efficiency is 91.07%. An analysis of the velocity magnitude distribution contours (Fig. 1) clearly demonstrates the structure of the aerodynamic field.

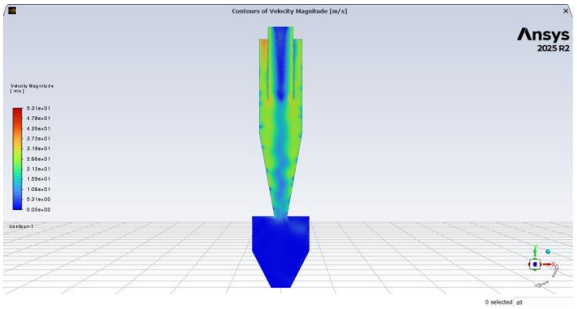


Figure 1 - Velocity magnitude distribution in the longitudinal section of the base model of the CN-15 cyclone

Insufficient initial velocity and the presence of flow expansion zones at the inlet prevent the generation of strong centrifugal force in the near-wall region. As a result, ultra-light organic particles do not have time to settle on the walls, are picked up by the central upward vortex, and are secondarily entrained from the apparatus.

To intensify the separation process, the inlet pipe was modernized by installing an internal profiling baffle that gradually narrows the flow passage width. A parametric study of variants with passage widths of 120 mm and 60 mm revealed patterns in changes in the apparatus's performance indicators (Fig. 2).

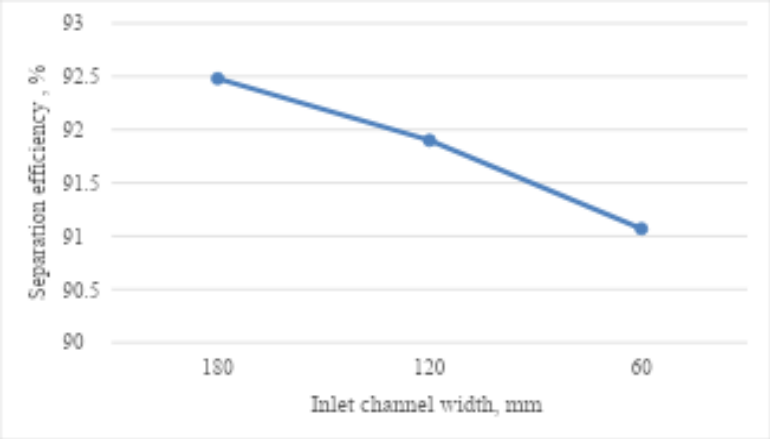


Figure 2 - Dependence of separation efficiency on the inlet channel width

It was established that narrowing the inlet channel to 120 mm creates a pronounced converging effect, locally accelerating the gas-particle flow. This acceleration enhances tangential velocity and the resulting centrifugal force in the near-wall zone, thereby increasing separation efficiency to 91.90% with only a moderate, industrially acceptable increase in aerodynamic resistance (1810 Pa). Conversely, the maximum channel narrowing to 60 mm provides the highest overall collection efficiency of 92.48%. However, this minor gain in dust recovery is accompanied by an exponential, critical increase in hydraulic losses to 4780 Pa. Such an excessive pressure drop would require installing high-capacity exhaust fans, leading to disproportionate electricity consumption and making this option economically impractical for large-scale industrial applications.

Consequently, the obtained results confirm that the most rational modernization strategy is the installation of an internal profiling baffle with a 120 mm passage width. This geometric optimization not only accelerates the inlet flow but also ensures a highly stable descending vortex structure, effectively minimizing the risk of secondary particle entrainment. Ultimately, this configuration significantly improves the dust-collection efficiency of ultra-light secondary organic raw materials, achieving an optimal balance between maximizing product recovery and maintaining energy consumption levels within strictly acceptable limits for the enterprise.

Perspectives for further research involve performing a more detailed multi-objective optimization by narrowing the search intervals between the previously studied configurations. Specifically, investigating the intermediate range of 80–110 mm for the inlet passage width will enable precise identification of the global optimum.

The authors express their gratitude to the Virtual Center for Collective Use of ANSYS Software at Lviv Polytechnic National University for their assistance in conducting this scientific research.

Ірина Гузьова
д.т.н., доцент,
Ігор Малінін
Здобувач РВО магістр
Анастасія Шнер
здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
Національний Університет «Львівська політехніка»

ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУШІННЯ СТАЦІОНАРНОГО ШАРУ АДСОРБЕНТУ

Анотація. *Авторами запропонований метод підвищення процесів регенерації активованого вугілля. Технологія підвищення ефективності сушіння полягає в тому, що накопчена енергія в верхніх шарах адсорбенту буде використовуватися для сушіння нижніх шарів. Це дасть змогу понизити загальну температуру шару, не використовуючи енергію теплового агенту, скоротити як час сушіння так і час охолодження і, як наслідок - зменшити енергетичні затрати на процес.*

Ключові слова*: адсорбент, енергозбереження, тепломасообмін, сушіння*

Один з етапів регенерації адсорбентів – процес висушування, що відбувається у колоні шляхом фільтрації газового потоку крізь пористу структуру стаціонарного шару адсорбенту за рахунок перепаду тисків (розрідження або надлишкового тиску). Механізм такого методу пов'язаний з тим, що сушіння відбувається не по всій висоті шару, а лише на деякій висоті верхніх шарів. В результаті з'являється шар сухого матеріалу, який участі в тепломасообміні не приймає, а тільки нагрівається і акумулює в себе значну кількість енергії, яка не використовується.

Механізм фільтраційного сушіння також підтверджується експериментальними даними зміни температури теплового агенту під час фільтраційного сушіння в часі за висотою шару активованого вугілля марки БАУ-А. (рис. 1). Моменти досягнення рівноважної вологості кожного шару активованого вугілля зображені на рис. 2.

В результаті апроксимації експериментальних даних (рис. 2) степеневою функцією отримана розрахункова залежність (1).

$$H = 1.1 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^{1.4} \tag{1}$$

Рівняння (1) дає змогу розрахувати висоту сухого шару активованого вугілля в будь-який момент часу і, відповідно, час досягнення рівноважної вологості будь-якої ділянки, в межах досліджуваних висот шару.

Важливо визначити, який шлях проходить тепловий агент до повного насичення вологою, тобто визначити мінімальну висоту шару вологого матеріалу h_{min}, яка забезпечувала б раціональне використання теплового агенту [1]:

$$h_{\min} = \frac{2 \cdot \upsilon_0 \cdot \rho \cdot c}{\alpha \cdot \sigma} \tag{2}$$

ϑ_0- фіктивна швидкість гарячого теплового агенту, м/с; ρ- густина теплового агенту, кг/м^3; с - теплоємність теплового агенту, Дж/(кг · К); α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м^2 · К); σ- питома поверхня шару адсорбенту, м^2/м^3.

Коефіцієнт тепловіддачі α для вологого активованого вугілля визначається з критеріального рівняння, одержаного авторами [1]:

$$Nu = 0{,}033 \cdot \mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr}^{0{,}33} \tag{3}$$

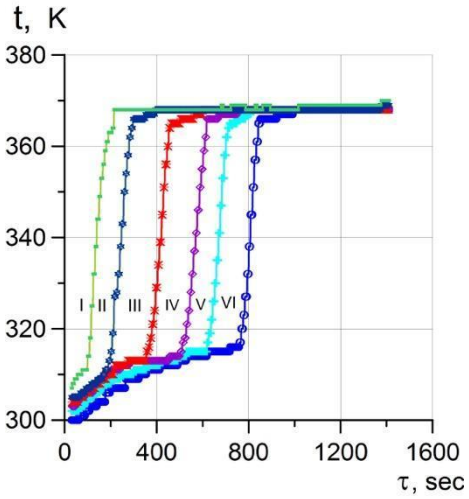


Рисунок 1 – Зміна температури теплового агенту під час фільтраційного сушіння в часі по висоті шару адсорбенту. I – 0.03 м; II – 0.06 м; III – 0.1 м; IV – 0.13 м; V – 0.16 м; VI – 0.18 м

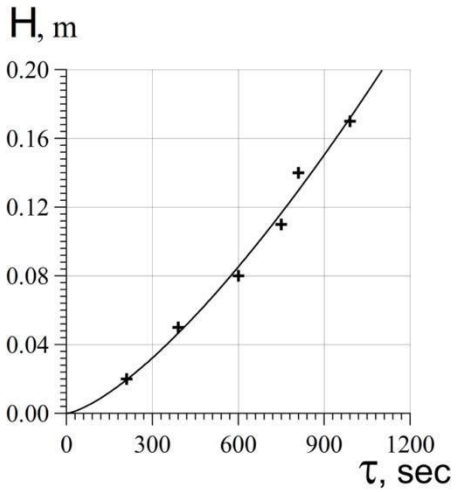


Рисунок 2 – Залежність висоти шару від часу досягнення ним рівноважної вологості

Підставляючи числові значення, що визначені шляхом експериментальних та теоретичних досліджень у залежність (2) отримаємо: $h_{min} = 0.055$ – числове значення мінімального шляху, який проходить тепловий агент крізь шар вологого активованого вугілля за умов проведення експерименту до повного свого насичення вологою.

Користуючись залежністю (1) знаходимо мінімальний час повного насичення теплового агенту вологою: $\tau_{min} = 0.055$. Це значення підтверджується результатами експерименту, представленого на рис. 1. Період повного насичення теплового агенту вологою триває 450 с (рис. 1, крива II). Тобто, після 440 –450 с можливе припинення подачі теплового агенту і, з метою сушіння нижніх вологих шарів, використання енергії сухого гарячого шару h_{min}.

Отже, підвищення ефективності сушіння полягає в тому, що в певний момент часу (в нашому випадку 440 –450 с) припиняється профільтровування гарячого теплового агенту та починається процес охолодження. Це дозволяє скоротити як час сушіння так і час охолодження та зменшити економічні затрати а процес.

Список використаних джерел

1. Atamanyuk V., Huzova I. & Gnativ Z. (2018). Intensification of drying process during activated carbon regeneration. Chemistry & Chemical Technology, 12(2), 263–271. https://doi.org/10.23939/chcht12.02.263.

Роман Денисюк,
аспірант
Наталія Бернацька
к.т.н., провідний інженер
Ірина Типіло
к.х.н., завідувач лабораторії
Олександр Лось
д.т.н., науковий співробітник
Володимир Сидорчук
к.х.н., старший науковий співробітник
Володимир Старчевський
д.т.н., проф.
Національний університет «Львівська політехніка»

НАНОДИСПЕРСНІ ПЕРОВСКІТНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ТИТАНАТІВ І НІОБАТІВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ДОВКІЛЛЯ: ЗАЛЕЖНІСТЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВІД СПОСОБУ СИНТЕЗУ

Анотація. *Розглянуто перспективи застосування нанодисперсних перовскітних матеріалів ($BaTiO_3$, $LiNbO_3$, $AgNbO_3$) для очищення довкілля від стійких органічних забруднювачів, важких металів та мікробіологічних забруднень. Показано, що спосіб синтезу є визначальним чинником формування питомої поверхні, фазового складу та дефектної структури матеріалів.*

Ключові слова: *перовскіти, $BaTiO_3$, $LiNbO_3$, $AgNbO_3$, сонохімічний синтез, механохімічна активація, фотокаталіз, п'єзо-фотокаталіз, очищення стічних вод, PFAS.*

Стрімке зростання антропогенного навантаження на водні та ґрунтові ресурси вимагає розробки ефективних технологій очищення довкілля від стійких органічних забруднювачів – антибіотиків, синтетичних барвників, пестицидів, перфтороалкільних сполук (PFAS) та важких металів [1-5]. Перспективним напрямом є використання нанодисперсних перовскітних матеріалів типу ABX_3: титанату барію ($BaTiO_3$), ніобату літію ($LiNbO_3$) та ніобату срібла ($AgNbO_3$), які поєднують напівпровідникові, сегнетоелектричні та п'єзоелектричні властивості [1, 3-5].

Встановлено, що спосіб синтезу є ключовим фактором, що визначає питому поверхню, фазовий склад та дефектну структуру матеріалу, а відтак - його придатність до конкретних екологічних застосувань. Сонохімічний синтез $AgNbO_3$ із дрібнодисперсного Nb_2O_5 (355 нм) забезпечує питому поверхню до 156 м²/г (прекурсор) та 45 м²/г після термообробки при 600 °C – у 45–150 разів більше, ніж при твердофазному синтезі. Матеріали з питомою поверхнею понад 30 м²/г демонструють на 40–60 % вищу константу фотодеградації сульфаметоксазолу (98 % за 8 год, видиме світло) порівняно з мікронними аналогами.

Механохімічна активація (МХА) суміші анатазу і $BaCO_3$ формує розвинену дефектну структуру $BaTiO_3$ з підвищеною щільністю кисневих вакансій та іонообмінних центрів - оптимальну для адсорбції важких металів (Pb^{2+}, Cd^{2+}, Cr^{6+}) та генерації гідроксильних радикалів •OH. У поєднанні з відпалом при 700 °C МХА-матеріали зберігають тетрагональну фазу $BaTiO_3$ з вираженим п'єзоефектом, що забезпечує 6–7-кратне синергічне підсилення фотокаталітичної деградації барвників у режимі п'єзо-фотокаталізу.

Оксалатний метод (прекурсор ТОБ) забезпечує чисту тетрагональну фазу $BaTiO_3$ при помірній питомій поверхні (20–25 м²/г), що є оптимальним для мікробіологічного знезараження (понад 99,9 % інактивації E. coli за 60 хв у системі п'єзо-фотокаталізу). Рідкофазні методи (темплатний синтез, гідротермальний) надають контроль над одновимірними морфологіями – нанодроти та наноаркуші $AgNbO_3$ демонструють підвищену ефективність при деградації пестицидів та PFAS-сполук завдяки покращеному переносу заряду. «Зелений» синтез з рослинними екстрактами відкриває перспективи для децентралізованих систем очищення сільськогосподарських стоків.

Перспективними напрямами подальших досліджень є: фотокаталітичне відновлення CO_2 на $LiNbO_3$/Au-гетероструктурах (швидкість $CO_2 \rightarrow CO$: 18,5 мкмоль/(год·г)), фотокаталітичне виробництво H_2 (150–400 мкмоль/(год·г) на $LiNbO_3$ з кокаталізаторами), фотоелектрохімічний сенсорний моніторинг антибіотиків (ліміт виявлення ципрофлоксацину - 0,05 нМ на сенсорі $BaTiO_3$/g-C_3N_4), а також знешкодження мікропластику методом п'єзокавітаційного окиснення.

Отже, сонохімічний синтез $AgNbO_3$ забезпечує питому поверхню до 156 м²/г і підвищену на 40–60 % ефективність фотодеградації антибіотиків у видимому світлі. Механохімічна активація $BaTiO_3$ формує дефектну структуру, оптимальну для адсорбції важких металів та п'єзо-фотокаталізу з 6 -7 - кратним синергічним підсиленням. Оксалатний метод забезпечує чисту тетрагональну фазу для мікробіологічного знезараження, рідкофазні методи — контроль одновимірних морфологій для деградації пестицидів і PFAS, «зелений» синтез — масштабовані рішення для децентралізованих систем очищення.

Список використаних джерел

1. Mohtaram M. S. et al. Application of $BaTiO_3$-based catalysts for piezocatalytic, photocatalytic and piezo-photocatalytic degradation. *Arabian Journal of Chemistry*. 2023. Vol. 16. Art. 104903.
2. Ahmad S. et al. Pharmaceutical pollutants removal by barium titanate. *Environmental Science and Pollution Research*. 2025. DOI: 10.1007/s11356-025-37159-9.
3. Старчевський В. Л. Синтез та властивості нанодисперсних перовскітних матеріалів. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2024.
4. Lu C. et al. Degradation of sulfamethoxazole by $AgNbO_3$ mediated by persulfate. *RSC Advances*. 2022. Vol. 12. P. 31432–31441.
5. Fu Q. et al. Visible-light-driven $AgNbO_3$/Bi_2MoO_6 S-scheme photocatalyst. *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 481. Art. 148523.

Діана Кіндзера
к.т.н., доцент
Аліна Дептак
здобувач РВО бакалавр
Національний університет «Львівська політехніка»

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ПРОЦЕСИ ТА МАТЕРІАЛИ В ХІМІЧНІЙ ІНЖЕНЕРІЇ: ЄВРОПЕЙСЬКИЙ ДОСВІД ТА МОЖЛИВОСТІ АДАПТАЦІЇ В УКРАЇНІ

Анотація. *Досліджено підходи до підвищення енергоефективності хімічних виробництв у ЄС, зокрема використання енергоощадних технологій та функціональних матеріалів. Особливу увагу приділено адаптації європейського досвіду в Україні, зокрема застосуванню мембранного електролізу.*

Ключові слова: *енергоефективність, хімічна інженерія, мембранні технології, електроліз, воднева енергетика, ресурсозбереження.*

На сучасному етапі розвитку промисловості питання енергозбереження є одним із ключових напрямів технологічного прогресу. Особливо актуальним воно є для підприємств хімічної галузі, де виробничі процеси характеризуються високим рівнем енергоспоживання. У країнах Європейського Союзу впровадження енергоефективних технологій є складовою стратегії сталого розвитку та переходу до низьковуглецевої економіки [1]. Хімічна промисловість споживає значні обсяги теплової та електричної енергії в процесах синтезу, ректифікації, сушіння, електрохімічних перетворень та очищення продуктів. Для зниження енергетичних витрат у європейській практиці активно використовуються інноваційні теплообмінні системи, каталізатори нового покоління, функціональні мембранні матеріали та автоматизовані системи керування технологічними процесами [2]. Одним із найбільш перспективних напрямів є використання мембранних технологій. Мембранні процеси забезпечують ефективне розділення компонентів із меншими енергетичними витратами порівняно з традиційними методами, такими як дистиляція або екстракція [3]. Перспективним прикладом сучасної енергоефективної технології є використання PEM-електролізерів (Proton Exchange Membrane) для отримання водню. Дана технологія активно впроваджується в країнах ЄС в межах розвитку водневої енергетики. Принцип роботи полягає у розкладанні води на водень та кисень під дією електричного струму з використанням полімерної мембрани. Основними перевагами технології є висока енергоефективність, компактність обладнання, швидке регулювання потужності та отримання водню високої чистоти [4]. Для України впровадження подібних технологій є перспективним напрямом модернізації хімічної промисловості. Адаптація європейських стратегій енергозбереження сприятиме зменшенню енергоємності виробництв, підвищенню конкурентоспроможності підприємств та інтеграції української промисловості в європейський технологічний простір [1, 4]. Таким чином, використання енергоефективних процесів і сучасних матеріалів у хімічній інженерії є важливою умовою сталого розвитку промисловості та енергетичної безпеки держави.

Список використаних джерел

1. European Commission. A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe. Brussels, 2020.
2. Бондаренко В. М. Енергоощадні технології в хімічній пром-ті. Київ: Техніка, 2021. 256с.
3. Кухар В. П. Мембранні процеси в хімічній технології. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2022. 198 с.
4. International Energy Agency. Global Hydrogen Review 2024. Paris, 2024.

Ihor Mudryy
PhD, Associate Professor,
Iryna Kirakevych
PhD, Associate Professor,
Mykhailo Frechka
Postgraduate student,
Lviv Polytechnic National University

RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES FOR INSTALLING SHEET PILE FOUNDATIONS USING FIBER-REINFORCED CONCRETE

Abstract: *Modern construction under conditions of dense urban development requires engineering solutions aimed at reducing material consumption, minimizing excavation works, and limiting the impact of new construction on adjacent buildings and structures. One of the promising approaches is the use of slab-sheet pile foundations, in which the sheet pile wall simultaneously performs the functions of excavation support and a permanent structural element of the foundation system. This study considers a resource-saving technology for the staged construction of slab-sheet pile foundations using fiber-reinforced concrete. The proposed approach makes it possible to reduce material consumption through the integration of the sheet pile wall into the load-bearing foundation system, reduction of conventional reinforcement, and optimization of foundation slab thickness.*

Keywords: *slab-sheet pile foundation, fiber-reinforced concrete, resource saving, sheet pile wall, dense urban development, monolithic structures.*

The technology of slab-sheet pile foundation construction is based on a phased execution process, which ensures stability of the excavation and minimizes soil displacement during construction [1-2]. At the initial stage, sheet pile elements are installed along the perimeter of the future excavation to provide lateral soil retention and protection of adjacent structures. Subsequently, excavation is carried out in stages with temporary fixation of sheet pile elements where necessary. After reaching the design depth, local sections of the foundation slab are concreted sequentially, followed by reinforcement and concreting of adjacent zones until a continuous monolithic slab is formed. In this system, sheet piles are integrated into the permanent foundation structure, which reduces the need for additional retaining systems, shortens construction time, and improves the overall efficiency of foundation works in constrained urban conditions [3-4].

Fiber-reinforced concrete is considered an efficient structural material for monolithic slab-sheet pile foundations due to its improved crack resistance, reduced shrinkage deformations, enhanced impact toughness, and increased durability [5-6]. Dispersed fiber reinforcement ensures a more uniform stress distribution in the concrete matrix and decreases the risk of microcrack formation, which is especially important under complex geotechnical conditions and uneven loading [7].

Experimental studies demonstrated that the actual bearing capacity of sheet pile elements under horizontal loading significantly exceeded the design values by nearly 90 %. At a design load of 20 kN, the recorded deflection was only 0.5 mm, whereas failure occurred at loads exceeding 38 kN. These results confirm the reliability of the proposed structural solution.

Comparative analysis showed that the use of slab-sheet pile foundations with fiber-reinforced concrete allows reducing material consumption by approximately 12 % and the total construction cost by 8 % compared with traditional excavation support systems and conventional foundation

technologies. In addition, transportation costs, excavation volumes, and future maintenance expenses are reduced.

The obtained results confirm the feasibility of using fiber-reinforced concrete as a resource-efficient material for slab-sheet pile foundations in dense urban areas. The proposed technology can be recommended for projects requiring increased reliability, durability, and reduced material and energy consumption during construction.

Conclusions

1. The use of slab-sheet pile foundations enables combining the functions of excavation support and load-bearing foundation structures, thereby reducing the material intensity of the system.
2. The application of fiber-reinforced concrete improves crack resistance, durability, and reliability of foundations while reducing the need for conventional reinforcement.
3. The staged construction technology minimizes the impact on adjacent buildings and reduces overall construction costs.
4. The proposed technology is promising for implementing resource-saving and sustainable construction principles in Ukraine.

References

1. DBN V.1.2-12:2008. Construction in Dense Urban Areas. Safety Requirements. Ministry of Regional Development of Ukraine, Kyiv, 2008.
2. DBN V.2.1-10:2018. Bases and Foundations of Structures. Basic Design Provisions. Ministry of Regional Development of Ukraine, Kyiv, 2018.
3. Mudryy, I. Choosing the optimal place on the construction site for installing the tower crane using information technologies. Lecture Notes in Civil Engineering. – Vol. 604: 4th International scientific conference EcoComfort and current issues of civil engineering, P. 386-395, Lviv, 2024.
4. Blikharskyy, Y., Khmil, R., Selejdak, J., Katunský, D., Blikharskyy, Z. RC Beams with an middle phase of reinforcement damage. System safety: Human – Technical facilyty – Environmental, No. 6 (1), pp. 184-191 (2024).
5. Timchenko, R., Krishko, D., Savenko, V., Belkov, O., Garkusha, A., Kokovich, A. Stress-strain state of slab-pile foundation. Journal of Kryvyi Rih National University, 21(2), 37–43, 2023.
6. Sanytsky, M., Rusyn, B., Kirakevych, I., Kaminskyy, A. Architectural self-compacting concrete based on nano-modified cementitious systems. In: Proceedings of the International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering, P. 372–380, 2023.
7. Sobala, D., Rybak, J. Steel sheet piles – Applications and elementary design issues. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 245, 2017.

Анна Іванишин
здобувач РВО бакалавр
Діана Кіндзера
к.т.н., доцент
Національний університет «Львівська Політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СПІРАЛЬНИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ У ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСАХ ТА СИСТЕМАХ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

Анотація. *Розглянуто особливості застосування та шляхи підвищення енергоефективності спіральних теплообмінників, які широко використовуються в хімічній, харчовій а також у системах очищення та утилізації теплоти стічних вод. Охарактеризовано механізм інтенсифікації теплоперенесення, який досягається завдяки криволінійному руху потоків і мінімізації застійних зон.*

Ключові слова: *енергоефективність, очищення стічних вод, інтенсифікація теплообміну.*

Спіральні теплообмінники (СТ) широко застосовуються у системах очищення та утилізації теплоти стічних вод енергетичних і промислових об'єктів завдяки здатності ефективно працювати із забрудненими, високов'язкими середовищами. Однією з переваг СТ є здатність до самоочищення під час роботи. Криволінійний рух потоку та відсутність застійних зон зменшують інтенсивність утворення відкладень на поверхнях теплообміну. Це дозволяє підтримувати стабільні теплотехнічні характеристики апарата та знижує витрати енергії, пов'язані із забрудненням поверхні теплообміну.

СТ складається з двох металевих листів, згорнутих у спіральні канали, між якими відбувається передача теплоти між теплоносіями. Така конструкція формує криволінійний рух потоків, що сприяє турбулізації та інтенсифікації процесів теплоперенесення. Однією з основних переваг СТ є високий ступінь використання поверхні теплообміну. Завдяки спіральній геометрії потоку забезпечується рівномірний розподіл теплоносіїв по каналах та зменшується ймовірність утворення застійних зон, що дозволяє підвищити коефіцієнт тепловіддачі та знизити теплові втрати у порівнянні з традиційними теплообмінниками. Важливим напрямом підвищення енергоефективності СТ є оптимізація гідродинамічних режимів руху теплоносіїв. Підвищення швидкості руху потоків сприяє турбулізації прикордонного шару та інтенсифікації теплообміну. Оптимальний режим роботи визначають із урахуванням співвідношення між інтенсивністю теплопередачі та витратами енергії на перекачування середовищ. Використання систем автоматизованого керування дозволяє підтримувати оптимальні режими роботи теплообмінника, своєчасно виявляти забруднення каналів та мінімізувати перевитрати енергії.

Висновки. Підвищення енергоефективності роботи СТ у виробничих процесах та системах очищення стічних вод досягається шляхом оптимізації гідродинамічних режимів, впровадженням систем рекуперації теплоти та автоматизованого керування технологічними процесами.

Список використаних джерел

1. Спіральний теплообмінник: види та переваги. https://shepetivka.com.ua/statti/rekla/korysne-chtyvo/4779-spiralnyi-teploobminnyk-vydy-ta-perevahy.html
2. Теплообмінники для стічних вод. https://teplo-polis.com.ua/ua/teploobminniki-dlja-stichnih-od/
3. Спіральні теплообмінники для технологічних процесів https://opeks.ua/ua/spiralni-teploobminniki-dlya-texnologichnix-procesiv/?

Діана Кіндзера
к. т. н., доцент
Павло Капущак
здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
Національний університет «Львівська політехніка»

НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ПРОЦЕСАХ РЕКТИФІКАЦІЇ

Анотація. *Розглянуто проблему низької енергоефективності технологічних процесів як перешкоди конкурентоспроможності української продукції та інтеграції до ЄС. Основну увагу приділено ректифікації — найпоширенішому й енергоємному процесу хімічної технології. Систематизовано джерела енергозбереження: підвищення ККД колони, рекуперація тепла, пов'язані теплові потоки та очищення сировини. Показано, що їх комплексне застосування забезпечує мінімізацію енерговитрат без втрати якості продуктів.*

Ключові слова: *енергоефективність, енергозбереження, ректифікація, рекуперація, хімічна інженерія.*

Низька енергоефективність технологічних процесів є одним з визначальних факторів кризових явищ в економіці. Неспроможність вітчизняної продукції конкурувати із зарубіжними товарами пояснюється тим, що в собівартості продукції значну частину складають витрати енергетичних ресурсів. Це є перепоною на шляху входження до світової системи господарювання української економіки. Зважаючи на можливість вступу України до Євросоюзу, питання енергоефективності та енергозбереження стає особливо актуальним.

Хімічна технологія оперує широким спектром процесів, серед яких великого поширення здобула ректифікація. Переходячи безпосередньо до ректифікації, варто зазначити, що вона десятиліттями залишається ключовою у галузі хімічної промисловості. Велика частина усіх процесів розділення у нафтопереробці, спиртовому виробництві, органічному синтезі базується саме на ректифікації. Причина такої популярності — універсальність, здатність працювати з величезними об'ємами рідких сумішей і отримувати продукти високої чистоти.

Однак зворотним боком цієї ефективності є колосальне споживання енергії. Ректифікація базується на повторному випаровуванні та конденсації фаз, тому вона потребує постійного підведення теплоти до куба колони та відведення теплоти через дефлегматор.

Одним з найбільш очевидних джерел енергозбереження при ректифікації є зниження флегмового числа, яке досягається через підвищення ефективності контактних пристроїв. Що вищий ККД колони, то менша кількість пари має бути повернута у вигляді зрошення, а це безпосередньо зменшує навантаження на кип'ятильник. До цього ж блоку внутрішніх резервів апарата належить зниження гідравлічного опору колон, адже надлишковий перепад тиску змушує витрачати додаткову енергію на компресію або підвищувати температуру в кубі, що знижує рушійну силу теплопередачі. Завершує цей рівень рекуперація тепла і холоду, коли скидні потоки не виводяться з системи, а повертаються для підігріву сировини чи проміжних технологічних середовищ.

На рівні всієї технологічної схеми визначальним є перехід до комплексів із пов'язаними тепловими потоками, де тепло конденсації парів верху однієї колони використовують для випаровування кубового залишку іншої, досягаючи мінімізації сумарних енерговитрат. Використання тепла парів верху колони не як відходу, а як повноцінного енергоресурсу для

живлення інших апаратів, перетворює традиційну схему на замкнений енерготехнологічний цикл.

Замикають перелік джерел економії заходи, які часто недооцінюють на практиці, а саме очищення сировини та теплоносіїв від дисперсної фази. Присутність механічних і нерозчинних домішок веде до забруднення теплообмінних поверхонь, падіння коефіцієнтів теплопередачі та непомітного, але постійного зростання витрати гріючої пари, тому попередня фільтрація для відділення дисперсної фази є фактично інвестицією в стабільно високу енергоефективність установки.

Висновок

Отже, енергоефективність ректифікаційних процесів не зводиться до якогось одного універсального рішення, а формується як багаторівнева система заходів. На рівні окремого апарата – це підвищення ККД, зниження гідравлічного опору та рекуперація внутрішніх теплових потоків. На рівні технологічної схеми – перехід до комплексів із взаємопов'язаними тепловими потоками та повторним використанням тепла. Увагу також необхідно приділити очищенню сировини й теплоносіїв. Лише поєднання зазначених технологічних рішень дає змогу досягти справді глибокої мінімізації енерговитрат без шкоди для якості кінцевих продуктів.

Список використаних джерел

1. Енергоефективні технології : навчальний посібник / А. С. Мандрика та ін.; за заг. ред. А. С. Мандрики. – Суми : Сумський державний університет, 2021. – 330 с.

2. Клименко В. В. Кравченко В. І., Телюта Р. В. Енергозбереження в технологічних процесах та установках: Навчальний посібник. - Кропивницький : ПП Ексклюзив-систем, 2020.

3. Гарєв Л. А., Рябова І. Б. Інтенсифікація рекуперативного теплообміну в процесах виробництва ректифікованого етилового спирту. Інтегровані технології та енергозбереження, 2024, № 2. https://doi.org/10.20998/2078-5364.2024.2.01

4. Ткаченко П., Євдокимова А., Євдокимов А. Впровадження енергоефективних технологій в діяльності. Вісник СумДУ. Серія Економіка, 2023, С. 38-45. https://doi.org/10.21272/1817-9215.2023.2-05

Діана Кіндзера
к.т.н., доц.
Ольга Когут
здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
Національний університет «Львівська політехніка»

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ПРОЦЕСИ ТЕПЛООБМІНУ У ВИРОБНИЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЯХ ХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Анотація. *Розглянуто актуальні питання підвищення енергоефективності технологічних процесів у хімічній промисловості за рахунок оптимізації процесів теплообміну та впровадження систем рекуперації теплової енергії. Охарактеризовано принципи роботи та конструктивні переваги кожухотрубних теплообмінників як базового обладнання для раціонального використання вторинних енергоресурсів. Показано, що за оптимальних геометричних параметрів накаток, економія енергії на транспортування теплоносіїв може перевищувати 16%. Проаналізовано енергоефективну принципову схему ректифікаційної установки безперервної дії, де комплексна інтеграція кожухотрубних апаратів забезпечує суттєве зниження споживання пари, мінімізацію теплових втрат та зменшення експлуатаційних витрат підприємства. Зроблено висновок про важливість автоматизації та використання нових матеріалів для забезпечення сталого розвитку промисловості.*

Ключові слова: *Хімічна промисловість, енергоефективність, рекуперація теплоти, кожухотрубний теплообмінник, інтенсифікація теплообміну, профільовані труби, ректифікаційна установка, сталий розвиток.*

Хімічна промисловість є однією з базових галузей сучасного промислового комплексу, яка забезпечує виробництво широкого спектра продукції для енергетики, машинобудування, аграрного сектору, медицини та інших сфер господарської діяльності. Її розвиток характеризується високою наукоємністю виробництва, значними енергетичними витратами та складністю технологічних процесів. У сучасних умовах особливого значення набуває підвищення енергоефективності виробничих систем, що обумовлено необхідністю раціонального використання енергетичних ресурсів, зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище та забезпечення сталого розвитку промисловості [1].

Енергоефективні процеси в технологіях сучасних підприємств хімічної промисловості є одним із пріоритетних напрямів їх розвитку, оскільки забезпечують раціональне використання енергетичних ресурсів, зниження енергоємності виробництва та підвищення економічної ефективності технологічних процесів. В умовах глобальних енергетичних викликів і необхідності переходу до принципів сталого розвитку особливого значення набуває впровадження інноваційних технологічних рішень, спрямованих на оптимізацію процесів теплообміну, удосконалення конструкцій теплообмінного обладнання та науково обґрунтований вибір параметрів роботи технологічних систем з метою мінімізації енергоспоживання.

Одним із ключових напрямів підвищення енергоефективності в хімічній інженерії є вдосконалення процесів теплообміну та інтеграція сучасних систем автоматизованого контролю й керування технологічними процесами. Значного поширення набувають технології рекуперації теплової енергії та створення замкнених виробничих циклів, які забезпечують повторне використання вторинних енергетичних ресурсів і зменшення втрат теплоти. У

поєднанні з використанням відновлюваних джерел енергії це сприяє формуванню екологічно безпечних та енергоощадних виробництв.

Впровадження енергоефективних процесів теплообміну у виробничих технологічних лініях різних галузей промисловості, зокрема хімічної, є важливим чинником зниження собівартості продукції та підвищення конкурентоспроможності підприємств. Важливе місце серед обладнання технологічних ліній займають теплообмінні апарати, серед яких найбільшого поширення набули кожухотрубні теплообмінники. Їх застосування є важливою складовою сучасних енергоощадних технологій, оскільки забезпечує ефективну передачу теплової енергії між технологічними середовищами та сприяє раціональному використанню енергетичних ресурсів.

Принцип роботи кожухотрубного теплообмінника ґрунтується на передачі тепла через поверхню труб між двома теплоносіями з різними температурними параметрами. Один теплоносій рухається всередині трубного пучка, тоді як інший циркулює у міжтрубному просторі кожуха. Така конструкція забезпечує інтенсивний теплообмін, високий коефіцієнт теплопередачі та стабільність роботи обладнання.

Особливого значення кожухотрубні теплообмінники набувають у системах рекуперації теплової енергії. Використання теплоти відпрацьованих технологічних потоків для повторного нагрівання сировини або робочих середовищ дозволяє суттєво зменшити енергетичні витрати підприємства, скоротити споживання палива та мінімізувати теплові втрати. В умовах постійного зростання вартості енергетичних ресурсів і необхідності впровадження екологічно безпечних технологій рекуперація теплоти є одним із ключових напрямів енергозбереження у промисловості.

Підвищення ефективності кожухотрубних теплообмінників досягається шляхом оптимізації конструктивних параметрів, інтенсифікації гідродинамічних режимів та використання сучасних матеріалів із високими показниками теплопровідності й корозійної стійкості [2]. Використання легованих сталей, спеціальних сплавів і сучасних теплоізоляційних матеріалів забезпечує підвищення надійності обладнання, збільшення терміну його експлуатації та зменшення теплових втрат [3]. Важливим є також оптимальний вибір швидкостей руху теплоносіїв, що сприяє підвищенню коефіцієнта тепловіддачі та інтенсифікації процесів теплоперенесення.

Крім того, доцільною є інтенсифікація процесів теплообміну шляхом встановлення сегментних перегородок (диско-кільцевих, спіральних), які забезпечують рівномірний розподіл потоків, зменшують утворення застійних зон, підвищують ефективність теплообміну [4].

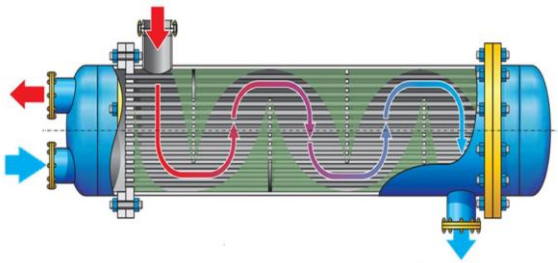


Рисунок 1 – Рух потоку в міжтрубному просторі теплообмінника із сегментними перегородками [4]

Доцільним є також використання труб із внутрішнім рельєфом, зокрема з кільцевими або гвинтовими виступами, які турбулізують пристінкову зону потоку та інтенсифікують

процес теплоперенесення. Інтенсифікація теплообміну за ламінарного або турбулентного режимів руху теплоносіїв дозволяє збільшити кількість теплоти, переданої через одиницю площі поверхні теплообміну [5, 6]. За оптимальних геометричних параметрів виступів на трубах h/D = 0,1 та S/h = 6,6 (рис. 2) економія енергії на транспортування теплоносіїв через кожухотрубний теплообмінник може перевищувати 16 % [6].

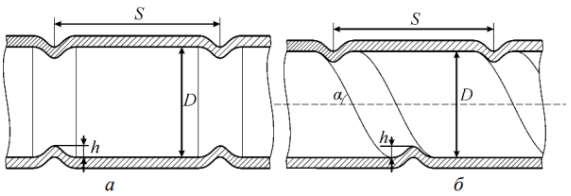


Рисунок 2 – Схеми накаток на трубах теплообмінника та характерні розміри [5]: а) накатка кільцевого типу; б) накатка гвинтового типу

У хімічній промисловості широко застосовують процеси ректифікації для розділення багатокомпонентних сумішей, що здійснюється шляхом багаторазової протитечійної взаємодії парової та рідинної фаз. Представлена технологічна схема ректифікаційної установки (рис. 3) характеризується високою енергоефективністю завдяки раціональному використанню теплообмінного обладнання та організації процесів рекуперації теплової енергії. Установка забезпечує ефективне використання теплоти технологічних потоків шляхом попереднього нагрівання вихідної суміші, конденсації парів та охолодження готових продуктів.

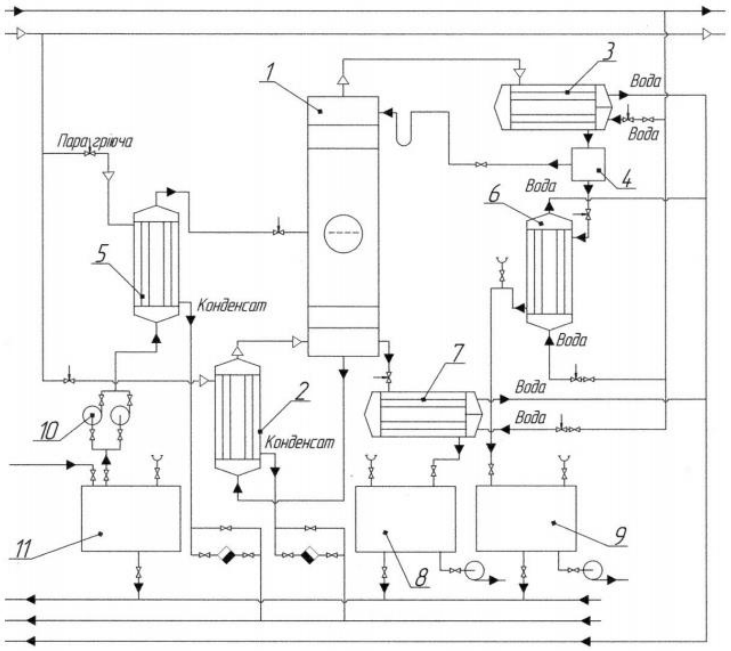


Рисунок 3 – Принципова схема ректифікаційної установки безперервної дії: 1 – ректифікаційна колона; 2, 3, 5, 6, 7 – теплообмінники кожухотрубного типу; 4 – розподільник; 8 – ємність для кубового залишку; 9 – ємність для дистиляту; 10 – насос; 11 – ємність вихідної суміші

Важливу роль у забезпеченні енергоощадності схеми відіграють теплообмінні апарати – підігрівач, кип’ятильник, дефлегматор та холодильники, які забезпечують передачу теплоти між робочими середовищами з мінімальними втратами енергії. Застосування кожухотрубних

теплообмінників забезпечує високий коефіцієнт теплопередачі, надійність роботи обладнання та стабільність технологічного процесу. Використання теплоти відпрацьованих потоків для нагрівання сировини дозволяє зменшити витрати енергоносіїв, скоротити споживання пари та підвищити загальний коефіцієнт корисного використання енергії. Додатково теплоізоляція обладнання сприяє зниженню втрат теплоти у навколишнє середовище та підвищенню енергетичної ефективності установки.

Висновки

Енергоефективність процесів теплообміну є одним із визначальних чинників підвищення техніко-економічних показників підприємств хімічної промисловості. Використання сучасних теплообмінних систем дозволяє зменшити енергоємність технологічних процесів, скоротити витрати енергоносіїв та підвищити рівень екологічної безпеки виробництва.Встановлено, що застосування кожухотрубних теплообмінників у поєднанні з системами рекуперації теплоти забезпечує ефективне використання вторинних енергетичних ресурсів і сприяє суттєвому зниженню теплових втрат у технологічних лініях. Підвищення ефективності роботи теплообмінного обладнання досягається шляхом оптимізації конструктивних параметрів, удосконалення гідродинамічних режимів руху теплоносіїв та використання труб із профільованою поверхнею, що забезпечують інтенсифікацію процесів теплоперенесення. Показано, що інтеграція енергоощадного теплообмінного обладнання у ректифікаційні установки дозволяє підвищити коефіцієнт корисного використання енергії, зменшити споживання пари та знизити експлуатаційні витрати підприємства. Важливим напрямом подальшого розвитку енергоефективних технологій є впровадження комплексних систем автоматизованого керування процесами теплообміну, застосування сучасних конструкцій теплообмінників і використання нових матеріалів із високими теплофізичними характеристиками. Це створює передумови для формування ресурсоефективних та екологічно безпечних виробництв відповідно до сучасних вимог сталого розвитку промисловості.

Список використаних джерел

1. Bulatova O. V. (2015). Transformation of the global market under global shifts: basic prerequisites for the development of the chemical industry. Scientific Bulletin of Uzhhorod National University. Series: International Economic Relations and the World Economy. Issue 3. P. 46–50. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvuumevcg_2015_3_13

2. Енергозбереження в теплопостачанні: текст лекцій для студентів спеціальності “Теплоенергетика”/М.Ф. Боженко. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. - 199 с.

4. Кожухотрубні теплообмінники в промисловості: навіщо потрібні і де використовуються? URL: https://ankort.com/ua/kozhukhotrubni_teploobminnyky_v_promyslovosti/

5. Abraham J.P., Sparrow E.M., Tong J.C.K. Heat transfer in all pipe flow regimes: laminar, transitional/intermittent and turbulent. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2009. Vol. 52. P. 557-563.

6. Власенко М. М. Наукові праці ДонНТУ, серія: «Електротехніка і енергетика». 2024, №1(30), С. 65-71.

Iryna Kirakevych
PhD, Associate Professor
Lviv Polytechnic National University

ENERGY-EFFICIENT HIGH-STRENGTH SELF-COMPACTING CONCRETES WITH SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIALS FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION

Abstract. *The paper presents the results of research on energy-efficient high-strength self-compacting concretes based on superplasticized rapid-hardening cementitious systems containing supplementary cementitious materials. The developed self-compacting concrete mixtures were characterized by high workability and stability, corresponding to slump-flow class SF2 (660-730 mm), viscosity class VS2 (T500 = 5-8 s), passing ability class PJ1 (8-9 mm), and segregation resistance class SR1 (10–15%). The obtained concretes achieved compressive strength classes B60–B65 and demonstrated rapid early strength development under normal curing conditions. The developed materials were characterized by high density, low water absorption, increased water resistance (W12-W20), frost resistance (F300-F400), corrosion resistance, and atmospheric durability. Improved mechanical properties were also observed, including increased modulus of elasticity, reduced Poisson's ratio, and significantly lower shrinkage deformations. The results confirm the effectiveness of supplementary cementitious materials and superplasticized cementitious systems for producing sustainable, durable, and energy-efficient self-compacting high-strength concretes suitable for modern construction and post-war infrastructure reconstruction.*

Keywords: *self-compacting concrete, high-strength concrete, supplementary cementitious materials, energy efficiency, durability, sustainable construction.*

The development of energy-efficient and durable construction materials is an important task for sustainable construction and post-war reconstruction of infrastructure. Self-compacting concrete (SCC) is considered one of the most перспективних materials due to its ability to ensure high workability without mechanical vibration, which reduces energy consumption during placing and improves construction quality [1-3].

This study investigates high-strength self-compacting concretes based on superplasticized rapid-hardening cementitious systems containing supplementary cementitious materials. The designed SCC mixtures were characterized using special technological test methods. Experimental results demonstrated that the developed mixtures satisfy the requirements for self-compacting concretes and are characterized by slump-flow class SF2 with a spread diameter of 660-730 mm, viscosity class VS2 with T500 of 5-8 s, passing ability class PJ1 with blocking step PJ of 8-9 mm, and segregation resistance class SR1 with segregation index SR of 10-15% [4].

The obtained high-strength SCCs achieved compressive strength classes B60–B65 and exhibited rapid strength development under normal curing conditions, with a strength gain ratio fcm2/fcm28 = 0.63. The developed concretes were characterized by average density of 2350-2430 kg/m³ and low water absorption of 1.1–1.3%, indicating a dense and refined microstructure [5].

Durability characteristics confirmed high performance of the developed materials. The concretes demonstrated enhanced water resistance (W12-W20), frost resistance (F300-F400), corrosion resistance coefficient KC6 = 1.1, and improved atmospheric resistance. In comparison with conventional superplasticized concretes, the modulus of elasticity increased from 40.2 to 52.0 GPa, while Poisson's ratio decreased from 0.20 to 0.17. Additionally, shrinkage deformations after 28 days under air-dry conditions were reduced by 2.7 times [6].

The obtained results indicate that the use of superplasticized rapid-hardening cementitious systems with supplementary cementitious materials enables the production of energy-efficient high-strength self-compacting concretes with improved technological properties, mechanical performance, and durability. Such materials are promising for sustainable construction and resilient infrastructure development [7-8].

Experimental studies have established the multifunctional effect of finely dispersed aluminosilicate and carbonate mineral additives in cementitious systems under conditions of increased flowability (270-410 mm). This effect is manifested through a stabilizing function at the stage of obtaining a rheologically active and homogeneous mixture due to filling the intergranular space, the “fine powder” effect, transformation of free water into adsorption-bound water, and formation of an initial weakly bound coagulation structure. As a result, the volumetric bleeding coefficient of cementitious systems decreases by two times, while the water-retaining capacity increases by 9.7% compared to Portland cement CEM I 42.5. The structure-forming function of polycomponent mineral additives consists in ensuring the formation of additional hydration products, which contributes to the targeted development of the cement matrix microstructure.

References

1. European Federation of National Associations Representing for Concrete. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use. Farnham, UK, 2005. 63 p.

2. ASTM International. ASTM C1611/C1611M-23: Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. West Conshohocken, PA, 2023.

3. ASTM International. ASTM C1621/C1621M-23: Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring. West Conshohocken, PA, 2023.

4. Sanytsky M., Rusyn B., Kirakevych I., Kaminskyy A. Architectural self-compacting concrete based on nano-modified cementitious systems // Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv – Košice – Rzeszów. Proceedings of CEE. 2023. P. 372–380. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44955-0_37.

5. Hohol M., Sanytsky M., Rusyn B., Kirakevych I. The Effect of TiO2 Nanomodifiers on Photocatalytic Activity and Mechanical Properties of Gypsum Plasters // Lecture Notes in Civil Engineering. Proceedings of EcoComfort 2024. 2024. P. 157–165. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-67576-8_14.

6. Kropyvnytska T., Kirakevych I., Rusyn B. Rapid Hardening High Strength Self-Compacting Concretes for the Fortifications // Lecture Notes in Civil Engineering. 2025. Vol. 781. P. 179–185. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-032-06850-7_18.

7. Durability enhancement of self-compacting concrete using blended supplementary cementitious systems // Structural Concrete. 2024. Vol. 25, No. 2. P. 1567–1581.

8. Shrinkage reduction and elastic properties of high-strength self-compacting concrete modified with mineral additives // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2025. Vol. 19. Article 27.

Alina KOSTIUK
PhD student
Volodymyr ATAMANYUK
Professor
Zoriana HNATIV,
Associate Professor
Lviv Polytechnic National University

DETERMINATION OF ENERGY CONSUMPTION FOR FILTRATION DRYING OF WILD CARROT POMACE

Abstract. *The study presents an experimental evaluation of energy consumption in the filtration drying of wild carrot pomace for the production of an alternative solid fuel. The relationship between kinetic parameters (drying rate, process duration) and total energy demand for heating and overcoming the hydrodynamic resistance of the material layer is analyzed. Based on the effects of the fixed-layer height, drying air temperature, and filtration velocity, energy-efficient operating conditions for the process are established.*

Keywords**:** *kinetics, energy consumption, filtration drying, stationary layer, wild carrot pomace.*

Relevance. A significant portion of plant-based waste in Ukraine consists of pharmaceutical industry residues, in particular, wild carrot pomace formed after the extraction of target compounds. It is typically disposed of in landfills, which leads to the formation of harmful leachate and negative environmental impacts [1].

A rational method for the utilization of wild carrot pomace is the production of fuel briquettes. For this purpose, the biomass must be dried to a moisture content not exceeding 14 wt.% [2], which increases both the storage stability of the raw material and the calorific value of the fuel.

For drying dispersed plant materials, the filtration method in a fixed layer is considered effective [3], as it is characterized by high process intensity. However, results obtained for other materials (brewer's spent grain, veneer) cannot be directly applied to wild carrot pomace due to its specific structural properties [4, 5]. In addition, for industrial implementation, it is important to evaluate not only the drying kinetics but also the energy consumption of the process.

Experimental part. Total specific energy consumption for filtration drying Q consists of specific thermal energy consumption Q_t (for heating the drying agent) and specific electrical energy consumption $Q_{\Delta P}$ (fan work to overcome the hydrodynamic resistance of the material layer):

$$Q = Q_t + Q_{\Delta P}$$

The material studied was wild carrot pomace from a local pharmaceutical production, with an initial moisture content of 41.5%. Experiments were conducted on a laboratory-scale setup at drying-agent temperatures of 40-80 °C, filtration velocities of 1.2-3.1 m/s, and fixed-layer heights of 40-100 mm. Drying was carried out until a final moisture content of 5% was reached.

Kinetic analysis showed that increasing the temperature and velocity of the drying agent increases process intensity and shortens drying time. However, increasing the velocity above 2.2 m/s causes a sharp rise in the layer's hydrodynamic resistance and higher electrical energy consumption, while temperatures above 60 °C increase heat losses and reduce the unit's thermal efficiency.

With an increase in the fixed-layer height, the drying rate decreases due to a longer mass transfer path and extended process time. At the same time, a higher layer improves utilization of the thermal potential of the agent, thereby reducing specific heat consumption.

The results of determining energy consumption for filtration drying of wild carrot pomace are presented in Table 1.

Table 1. ***Energy consumption for filtration drying of wild carrot pomace***

H, m	T, K	⟩, kg/m^3	υ_0, $\frac{m}{s}$	G_m, kg	$\tau_к$, c	Q_t, kJ	$Q_{\Delta P}$, kJ	$Q_t+Q_{\Delta P}$, kJ	$(Q_t+Q_{\Delta P})/G_m$ $\frac{kJ}{kg}$	$(Q_t+Q_{\Delta P})/G_m$ $\frac{kJ}{kg\ H_2O}$
For different layer heights										
0,100	333	1,138	1,975	0,325	720	493,009	437,27	930,279	2717,967	13478,398
0,080	333	1,138	1,975	0,260	780	534,093	424,643	958,736	3508,64	11858,207
0,060	333	1,138	1,975	0,190	660	451,925	328,479	780,404	3909,839	11842,246
0,040	333	1,138	1,975	0,130	480	328,673	206,943	535,616	3921,628	**11283,253**
For different temperatures										
0,060	353	1,073	1,975	0,260	540	523,211	319,885	843,096	3088,489	**8900,929**
0,060	343	1,105	1,975	0,260	660	548,436	384,306	932,742	3408,273	9929,125
0,060	333	1,138	1,975	0,260	780	534,093	424,643	958,736	3508,64	11858,207
0,060	323	1,173	1,975	0,260	1620	857,709	884,536	1742,245	6366,924	18540,438
0,060	313	1,210	1,975	0,260	2400	874,185	1205,532	2079,717	7535,207	22696,901
For different heat agent velocities										
0,060	333	1,138	2,815	0,260	660	644,26	909,05	1553,31	5683,327	21078,979
0,060	333	1,138	2,395	0,260	720	597,919	722,311	1320,23	4824,697	17289,549
0,060	333	1,138	1,975	0,260	780	534,093	424,643	958,736	3508,64	11858,207
0,060	333	1,138	1,555	0,260	900	485,124	256,463	741,587	2707,807	8888,733
0,060	333	1,138	1,135	0,260	1260	495,58	143,047	638,627	2338,008	**7598,179**

Conclusions. The kinetics of filtration drying of wild carrot pomace were studied, and the energy consumption of the process was determined. It was established that increasing the temperature and velocity of the drying agent intensifies the drying process; however, excessive increase of these parameters leads to higher energy consumption. Optimal process conditions were identified under which the minimum specific energy consumption is achieved, ensuring energy efficiency and the potential for industrial production of fuel briquettes.

References

1. Wójcik, W., & Pawłowska, M. (Eds.). (2021). Biomass as a raw material for the production of biofuels and chemicals. Routledge.

2. Guibunda, F. A., Waita, S., Nyongesa, F. W., Snyder, G. J., & Chaciga, J. (2024). Optimizing biomass briquette drying: A computational fluid dynamics approach with a case study in Mozambique. Energy, 360, 100012. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.100012

3. Potapov, V., Yakushenko, Ye., & Hrytsenko, O. (2021). Eksperymental'ni doslidzhenia k'inetyky temperatury f'il'tratsiin'oho sushinnia pid diieiu pidvyshchenoho tysku. *Scientific Works, 85*(1). https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2064

4. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrska, V., Barabakh, S., & Hnativ, Z. (2024). Kinetic regularities of the filtration drying of barley brewer's spent grain. Chemistry & Chemical Technology, 18(1), 66-75. https://doi.org/10.23939/chcht18.01.066

5. Mykichak, B. M., Khanyk, Ya. M., Kindzera, D. P., & Yarosh, Ya. D. (2008). Kinetyka f'iltratsiinoho sushinnia. Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy, 18(3),148-156

Marta Kulpa
bachelor student
Oleksandr Kuzyk
assistant
Lviv Polytechnic National University

REDUCING THE ENERGY INTENSITY OF MASS TRANSFER PROCESSES: ENERGY-SAVING MODES OF MECHANICAL MIXING DURING SALT DISSOLUTION

Abstract.*This study addresses the energy inefficiency of "blind mixing" during industrial salt dissolution. Experimental dissolution kinetics of inorganic salts (including boric acid, sodium tetraborate, and ammonium tetrafluoroborate) were analyzed using a three-bladed agitator at 293–323 K and speeds of 1.67–6.67 s^{-1}. Results reveal a nonlinear relationship: increasing rotation from 1.67 to 3.33 s^{-1} significantly improves mass transfer, while higher speeds yield negligible benefits and waste energy. To optimize costs, highly reliable criterion equations (Sh = f(Re, Sc)) were developed with a 5–10% error margin. These models enable precise calculation of mixing times, eliminating unproductive energy consumption and supporting sustainable industrial development.*

Keywords: *energy efficiency, mass transfer, mechanical mixing, dissolution kinetics, critical suspension rate, criterion equations.*

Introduction. In the context of European integration and Ukraine's implementation of the goals of the European Green Deal [1], the issue of improving the energy efficiency of industrial production is becoming critical. One of the key problems of modern chemical technology is the high specific energy intensity of solution preparation processes. According to international studies [2, 3], mechanical mixing in solid-liquid systems is one of the most energy-consuming processes, which is often accompanied by excessive energy dissipation, which does not lead to a proportional acceleration of mass transfer.

According to the concept of process intensification [4], the adaptation of energy-saving modes requires an accurate determination of the regularities of dissolution kinetics to minimize the operating time of the equipment. As a rule, at domestic enterprises of the chemical, pharmaceutical and water treatment industries, dissolution processes are carried out at fixed, inflated agitator rotation speeds. These speeds significantly exceed the critical suspension rate *Njs*, substantiated in classical works [5] and supplemented by modern hydrodynamic studies [6]. This leads to the effect of "blind mixing", when the solid phase has already passed into solution, or when the thickness of the diffusion layer has reached its minimum, and electricity continues to be spent exclusively on overcoming hydraulic resistance and generating macroturbulence.

Research materials and methods. To establish the optimal parameters of mass transfer and search for ways to reduce energy costs, the kinetics of dissolution of a number of inorganic compounds widely used in industry were investigated: boric acid, sodium tetraborate and ammonium tetrafluoroborate. In accordance with modern approaches to modeling multiphase systems [7], experiments were carried out in an apparatus equipped with a standard three-bladed agitator. In order to cover a wide range of technological conditions, the research was carried out in temperature intervals of 293–323 K and at discrete agitator rotation speeds of 1.67, 3.33, 5.00 and 6.67 s^{-1}.

Results and their discussion. Based on an array of experimental data, the mass transfer coefficients in the solution during mechanical mixing were calculated. A comprehensive analysis of the influence of temperature and mixing intensity on the kinetics of dissolution was carried out.

Studies have shown that the dependence of the mass transfer rate on the speed of rotation of the agitator has a pronounced nonlinear (asymptotic) character. It has been established that the transition from a speed of 1.67 $^{s-1}$ to 3.33 $^{s-1}$ gives a significant increase in the mass transfer coefficient due to intensive renewal of the phase contact surface. However, a further increase in intensity to maximum revolutions (5.00 and 6.67 $^{s-1}$) almost does not accelerate dissolution. technological effect [8]. In order to practically optimize energy costs, the array of experimental data was summarized in the form of criterion equations linking the criteria of Sherwood, Reynolds and Schmidt: $Sh = f(Re, Sc)$. Statistical analysis confirmed the high reliability of the obtained mathematical models -- the derived criterion equations describe the process of dissolution of the studied salts with an error not exceeding 5–10%.

Conclusions. Determination of the exact regularities of the kinetics of dissolution of inorganic salts is a necessary condition for minimizing the energy intensity of mass transfer processes. The use of the developed generalized criterion equations allows the engineering and technical personnel of enterprises to accurately calculate the required mixing time and optimize the hydrodynamic situation in the devices. The introduction of such scientifically based, dynamic modes of equipment operation at the enterprises of the chemical industry of Ukraine will eliminate unproductive electricity consumption. This is a direct practical step towards the implementation of European energy saving strategies, reducing the cost of production and achieving the goals of sustainable industrial development.

References

1. European Commission. (2019). The European Green Deal. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2019) 640 final.
2. Wu, Z., Zhang, Q., et al. (2022). Energy Consumption and Mass Transfer in Solid-Liquid Stirred Tanks. Journal of Chemical Engineering of Japan, 55(3), 112-120.
3. Jafari, R., et al. (2020). Hydrodynamics and mass transfer in solid-liquid stirred tanks: A review. Powder Technology, 367, 102-124.
4. Stankiewicz, A., & Moulijn, J. A. (2000). Process Intensification: Transforming Chemical Engineering. Chemical Engineering Progress, 96(1), 22-34.
5. Zwietering, T. N. (1958). Suspending of solid particles in liquid by agitators. Chemical Engineering Science, 8(3-4), 244-253.
6. Tamburini, A., Cipollina, A., Micale, G., & Brucato, A. (2011). Solid-liquid suspension in stirred tanks: predicting the minimum impeller speed for complete suspension. Chemical Engineering Transactions, 24, 725-730.
7. Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., & Kresta, S. M. (Eds.). (2004). Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice. Wiley-Interscience.
8. Kresta, S. M., Etchells, A. W., Dickey, D. S., & Atiemo-Obeng, V. A. (Eds.). (2016). Advances in Industrial Mixing: A Companion to the Handbook of Industrial Mixing. John Wiley & Sons.

Тетяна Кузьмінчук
аспірант
Володимир Атаманюк
д.т.н., професор
Національний університет «Львівська політехніка»

ГІДРОДИНАМІКА ПІД ЧАС ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ СІРНИКОВОЇ СОЛОМКИ

Анотація: *У роботі наведено результати дослідження гідродинаміки під час процесу фільтраційного сушіння сірникової соломки. Обґрунтовано перехід від традиційних методів до інноваційного фільтраційного зневоднення сірникової соломки. Проведено комплексне дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь стаціонарний шар матеріалу з використанням CFD-моделювання в ANSYS Fluent. Встановлено в'язкий та інерційний коефіцієнти опору, а також підтверджено низький гідравлічний опір шару (2,3 Па при швидкості 0,29 м/с). Результати доводять доцільність впровадження методу для зниження питомих енерговитрат.*

Ключові слова: *фільтраційне сушіння, гідродинаміка, сірникова соломка, енергозбереження, стаціонарний шар*

Світове споживання енергії стрімко зростає і, за прогнозами, до 2050 року сягне 926 ексаджоулів, при цьому промисловий сектор збільшить використання ресурсів на 36% [1]. В умовах енергетичної нестабільності в Україні оптимізація енергоємних процесів, зокрема сушіння, вартість якого у світовому масштабі до 2027 року зросте у 1,5 рази [2], є критично важливою. Для вітчизняної сірникової галузі, що забезпечує товари першої необхідності, перехід від традиційних конвективних методів до інноваційного фільтраційного зневоднення є стратегічним кроком для зниження собівартості та навантаження на енергосистему.

Впровадження інноваційного фільтраційного методу зневоднення дозволяє значно інтенсифікувати процес та мінімізувати питомі витрати енергії. Важливим етапом досліджень у цьому напрямку є вивчення гідродинаміки руху теплового агента крізь шар матеріалу. Оскільки шар має велику пористість, то втрати енергії на подолання опору є незначними. Для підтвердження явища низького гідравлічного опору було встановлено залежність опору шару соломки від фіктивної швидкості теплового агента, використовуючи теоретичні розрахунки за рівнянням Дарсі-Вейсбаха та CFD-моделювання в програмному комплексі ANSYS Fluent за встановленими методиками [3].

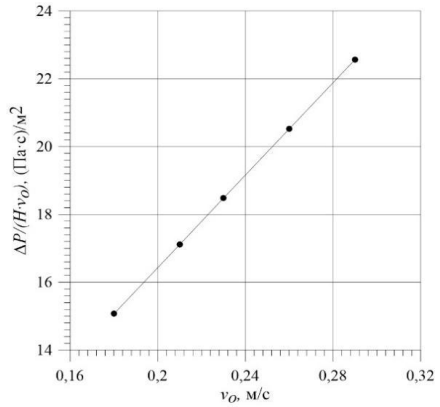


Рисунок 1 –Залежність $\Delta P/(H \cdot v_o)=f(v_o)$ для висот шару H=150÷350 мм

Для цього визначено в'язкий $1/\alpha = 1{,}57 \cdot 10^5$ м$^{-2}$ та інерційний $C_2 = 112{,}2$ м$^{-1}$ коефіцієнти опорів на основі залежності $\Delta P/(H \cdot v_o) = f(v_o)$, яка зображена на рис 1.

На основі одержаних даних проведено моделювання гідродинаміки руху теплового агента крізь шар матеріалу та встановлено втрати напору. На рис 2 наведено результати теоретичних досліджень (чорні лінії) та моделювання (рожеві лінії). Похибка не перевищує 4,5%, що підтверджує високу збіжність результатів, а також свідчить про перспективу застосування CFD моделювання для проектування сушильного обладнання в промисловості.

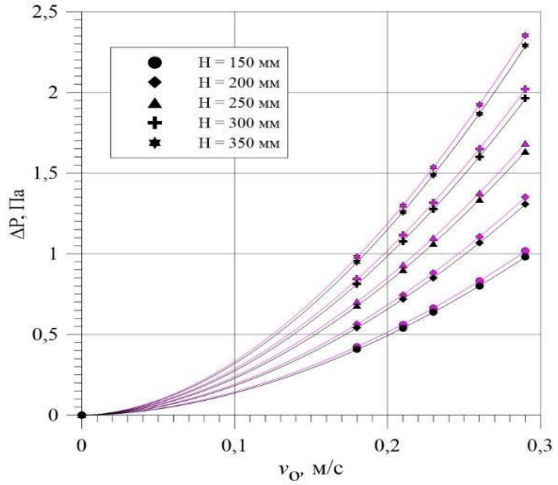


Рисунок 2 – Залежність гідравлічного опору насипного шару сірникової соломки різної висоти від фіктивної швидкості теплового агенту:
(чорні лінії – результати теоретичних досліджень; рожеві лінії – результати моделювання)

З рисунка 2 бачимо, що за фіктивної швидкості теплового агенту 0,29 м/с гідравлічний опір насипного шару висотою 350 мм становить близько 2,3 Па.

Тобто гідравлічний опір сірникової соломки є незначним, що не буде мати суттєвого впливу на зростання енергозатрат на сушіння в цілому.

Висновки

Дослідження підтверджують, що фільтраційне сушіння є енергоефективною альтернативою традиційним методам у сірниковій галузі. Завдяки високій збіжності результатів теоретичних розрахунків та CFD-моделювання (похибка < 4,5%) доведено, що через значну пористість шару соломки його гідравлічний опір є мінімальним. Це дозволяє інтенсифікувати процес зневоднення без суттєвих витрат енергії на подолання опору, що створює підґрунтя для проектування новітнього обладнання в рамках стратегій енергозбереження.

Список використаних джерел

1. U.S. Energy Information Administration. (2023, October 11). International energy outlook 2023. https://www.eia.gov/outlooks/ieo/
2. Koukouch, A., Bakhattar, I., Asbik, M., & et al. (2020). Analytical solution of coupled heat and mass transfer equations during convective drying of biomass: Experimental validation. Heat and Mass Transfer, 56, 1971–1983. https://doi.org/10.1007/s00231-020-02817-w
3. Ivashchuk, O., Chyzhovych, R., Atamanyuk, V., Simulation of the thermal agent movement hydrodynamics through the stationary layer of the alcohol distillery stillage. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, Vol. 9, pp. 100566, 2024, https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100566.

Юлія Нечитайло
к.т.н., доц.
Михайло Левицький
здобувач РВО бакалавр
Державний біотехнологічний університет

УТИЛІЗАЦІЯ ВТОРИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ ТА ІНТЕГРАЦІЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ У ХІМІЧНІ ЦИКЛИ

Анотація. *Розглянуто підходи до підвищення енергоефективності хімічних виробництв шляхом утилізації вторинних енергоресурсів та інтеграції відновлюваних джерел енергії у технологічні процеси. Обґрунтовано доцільність системного підходу до оптимізації хіміко-енергетичних комплексів із застосуванням пінч-аналізу для підвищення рівня внутрішньої рекуперації теплоти. Показано можливості використання теплових насосів і термохімічного акумулювання для залучення низькопотенційної теплоти та нестабільної відновлюваної енергії. Запропонована концепція інтегрованого хімічного циклу дозволяє зменшити споживання первинної енергії та підвищити екологічну ефективність виробництва.*

Ключові слова: *хімічна інженерія, вторинні енергоресурси, відновлювані джерела енергії, пінч-аналіз, системна інтеграція, декарбонізація, енергоефективність.*

Сучасна хімічна індустрія є одним із найбільш енергоємних секторів світової економіки, функціонування якого традиційно базується на використанні викопного палива для забезпечення високотемпературних технологічних процесів. В умовах загострення глобальних кліматичних змін, посилення екологічних вимог, а також нестабільності світових ринків енергоносіїв виникає об’єктивна необхідність глибокої модернізації хіміко-технологічних систем. Особливої актуальності набувають питання підвищення енергоефективності виробництв, зниження їхньої залежності від традиційних енергоресурсів та впровадження екологічно безпечних технологій. Основними напрямами такої трансформації є максимізація утилізації вторинних енергетичних ресурсів, а також інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у технологічні цикли [1]. Додатковим стимулом до впровадження цих підходів є глобальний курс на декарбонізацію промисловості та досягнення цілей сталого розвитку. Традиційні підходи до оптимізації окремих апаратів або локальних вузлів виробництва практично вичерпали свій потенціал. Подальше підвищення ефективності можливе лише за рахунок комплексного підходу, який передбачає розгляд підприємства як єдиної інтегрованої енерготехнологічної системи. У межах такого підходу всі потоки енергії та речовини аналізуються з позицій їх ексергетичної цінності, що дозволяє більш точно оцінити втрати та визначити резерви енергозбереження [2]. Важливо також враховувати взаємозв’язки між окремими технологічними процесами, що відкриває можливості для оптимізації не лише окремих вузлів, а й усієї виробничої структури загалом.

Теоретичною основою системної оптимізації є методологія інтеграції процесів (process integration), одним із ключових інструментів якої є пінч-аналіз. Згідно з цим підходом визначається так звана «пінч-точка» (pinch point), яка розділяє систему на області з надлишком та дефіцитом теплоти. Це дозволяє встановити мінімально можливі потреби у зовнішньому нагріванні та охолодженні ще на етапі проєктування та сформувати оптимальні теплообмінні мережі [1]. Практичне застосування пінч-аналізу дає змогу знизити енергоспоживання на 15–30%, а в окремих випадках – і більше, залежно від складності виробництва та ступеня його

інтегрованості [3]. Крім того, сучасні програмні засоби дозволяють автоматизувати процес побудови теплових схем і підвищити точність розрахунків. Подальший розвиток методів інтеграції процесів передбачає їх адаптацію до реальних умов експлуатації промислових підприємств. Це включає використання високоефективного теплообмінного обладнання, інтелектуальних систем керування та цифрових технологій моніторингу енергоспоживання. Застосування таких підходів дозволяє ефективно утилізувати навіть низькопотенційну теплоту, яка раніше вважалася непридатною для повторного використання, і повертати її у виробничий цикл [2]. У результаті досягається суттєве зменшення споживання первинної енергії та зниження теплового навантаження на навколишнє середовище.

Разом із тим сучасна концепція енергоефективності передбачає не лише внутрішню рекуперацію, а й активне залучення відновлюваних джерел енергії. Інтеграція сонячної, вітрової та інших видів відновлюваної енергії у хіміко-технологічні процеси дозволяє зменшити залежність від викопного палива, скоротити викиди парникових газів і підвищити екологічну стійкість виробництва [3]. Крім того, використання ВДЕ сприяє формуванню децентралізованих енергетичних систем, що підвищує надійність енергозабезпечення підприємств. Доцільно розглянути концепцію термодинамічно інтегрованого хімічного циклу, яка передбачає створення дворівневої системи енергозабезпечення. Перший рівень спрямований на максимальну рекуперацію теплової енергії всередині технологічної системи за допомогою оптимізованих теплообмінних мереж. Другий рівень орієнтований на використання відновлюваних джерел енергії та сучасних технологій її перетворення і акумулювання.

Для утилізації низькопотенційної теплоти (40–80 °C), яка у значних обсягах утворюється на хімічних підприємствах, доцільним є застосування високотемпературних теплових насосів. Вони дозволяють підвищити температурний потенціал теплоти до 120–150 °C, що робить її придатною для повторного використання у технологічних процесах, таких як генерація пари, підігрів сировини або підтримання температурного режиму реакторів. Використання електроенергії від сонячних або вітрових установок для роботи компресорів теплових насосів забезпечує додатковий екологічний ефект і сприяє зменшенню вуглецевого сліду підприємства [4]. Ефективність інтегрованої системи може бути оцінена за допомогою узагальненого показника енергозбереження::

$$Qsave=Qrec+Eren\times COPhpsys$$

де Qrec – кількість теплоти, що повертається в систему завдяки оптимізованій внутрішній теплообмінній мережі; Eclean– електрична енергія, згенерована відновлюваними джерелами та спрямована на потреби теплонасосної установки; COPhp – коефіцієнт трансформації теплового насоса; COPhp – загальний коефіцієнт корисної дії системи транспортування та акумулювання теплоти.

Додатковим важливим напрямом підвищення загальної енергоефективності хіміко-технологічних систем є використання термохімічних акумуляторів енергії, які розглядаються як перспективний клас накопичувачів нового покоління. Їх принцип дії ґрунтується на оборотних хімічних реакціях, у яких енергія зберігається не у вигляді явного теплового потенціалу, а у формі зв’язаного хімічного стану реагентів. Завдяки цьому забезпечується можливість зберігання енергії протягом тривалого часу практично без теплових втрат, що є суттєвою перевагою порівняно з традиційними теплоакумулюючими системами.

Особливої актуальності такі системи набувають в умовах нерівномірної та змінної генерації відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної та вітрової енергетики. У періоди

надлишкового виробництва електроенергії виникає потреба в її ефективному акумулюванні з подальшим використанням у моменти пікового навантаження або дефіциту генерації. Термохімічні акумулятори дозволяють вирішити цю задачу за рахунок перетворення надлишкової енергії у хімічно зв'язаний стан із можливістю її подальшого контрольованого вивільнення. Використання таких акумуляторних систем забезпечує не лише підвищення стабільності енергопостачання, але й значно розширює функціональну гнучкість технологічних систем хімічного виробництва. Крім того, вони сприяють більш ефективній інтеграції відновлюваних джерел енергії у промислові цикли, мінімізуючи вплив їхньої природної варіабельності [4]. У довгостроковій перспективі це дозволяє підвищити автономність енергетичних систем підприємств.

Результати математичного моделювання та порівняльного аналізу показують, що впровадження запропонованої концепції інтегрованої енергетичної системи дозволяє знизити споживання зовнішньої теплової енергії на рівні 40–45% у порівнянні з традиційними схемами енергозабезпечення. При цьому частка енергії, отриманої з відновлюваних джерел, у загальному енергетичному балансі може досягати 25–30%, що повністю відповідає сучасним світовим тенденціям переходу до низьковуглецевої та ресурсоефективної економіки. Крім прямого енергетичного ефекту, впровадження такої системи призводить до зниження навантаження на зовнішню енергетичну інфраструктуру, зменшення пікових споживчих навантажень та підвищення загальної надійності енергозабезпечення промислових підприємств. Додатково слід відзначити позитивний екологічний ефект, пов'язаний зі скороченням викидів парникових газів та зменшенням споживання викопного палива. Підвищення енергоефективності хімічних виробництв у сучасних умовах потребує комплексного, системного підходу, який поєднує внутрішню рекуперацію енергії з активною інтеграцією відновлюваних джерел та сучасних технологій акумулювання. Запропонована концепція термодинамічно інтегрованого хімічного циклу демонструє високу техніко-економічну ефективність і може бути використана як базова платформа для створення екологічно безпечних, енергоефективних та цифрово керованих виробництв нового покоління.

Подальші наукові дослідження у цьому напрямі доцільно зосередити на розробці адаптивних цифрових моделей керування енергетичними потоками, оптимізації режимів роботи акумуляторних систем, а також їх інтеграції з різними типами хімічних виробництв з урахуванням специфіки технологічних процесів і сезонної мінливості енергоспоживання.

Список використаних джерел

1. Smith R. Process Integration and Energy Analysis. Chichester: John Wiley & Sons, 2016. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119990336.
2. Tovazhnyanskyy L. L., Kapustenko P. O., Khavin H. L. та ін. Heat integration and energy saving in industry. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/303835497.
3. Klemeš J. J. Handbook of Process Integration (PI): Minimisation of Energy and Water Use, Waste and Emissions. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. URL: https://www.sciencedirect.com/book/9780857095938.
4. International Energy Agency. Heat Pumps. Paris: IEA, 2023. URL: https://www.iea.org/reports/heat-pumps

Кіндзера Діана
к.т.н., доц.
М'яловіцький Юрій
здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
Національний університет «Львівська політехніка

НАПРЯМКИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В АБСОРБЦІЙНИХ ПРОЦЕСАХ

Анотація. *Запропоновано комплексний підхід до підвищення енергоефективності абсорбційних процесів, що базується на застосуванні високоефективних регулярних насадок, малов'язких абсорбентів нового покоління та мембранних контактних елементів. Використання регулярних насадок дозволяє знизити гідравлічний опір апаратів у 1,5–2 рази порівняно з хаотичними, а малов'язкі амінні суміші забезпечують скорочення енерговитрат на регенерацію до 2,5 ГДж/т CO_2. Інтеграція проміжного охолодження в абсорбційних колонах та впровадження циклічних схем «тиск–вакуум» із закріпленими амінами дають змогу перейти від високотемпературної регенерації до низькотемпературних або механічних методів десорбції, скорочуючи теплові втрати на 35–50 %. Поєднання аналізу фізичних процесів масопереносу з оптимізацією режимів роботи абсорбційних систем сприяє формуванню високоефективних та екологічно безпечних технологій у хімічній інженерії.*

Ключові слова: *абсорбція, енергоефективність, регулярні насадки, малов'язкі абсорбенти, мембранні контактори, регенерація, циклічні схеми «тиск–вакуум».*

Абсорбційні процеси широко застосовуються у хімічній, нафтохімічній, газопереробній, енергетичній галузях промисловості та екологічній сфері. Ефективність реалізації цих процесів значною мірою визначається інтенсивністю масообміну, характеристиками абсорбентів, конструкцією апаратів та рівнем енергоспоживання технологічної системи загалом.

У сучасних умовах підвищення вартості енергоресурсів і необхідності скорочення викидів парникових газів особливої актуальності набуває впровадження енергоощадних технологій у процесах абсорбції. Основними напрямами підвищення енергоефективності абсорбційного обладнання є зниження гідравлічного опору апаратів, мінімізація витрат теплоти на регенерацію абсорбентів, інтенсифікація масопереносу, використання сучасних матеріалів та оптимізація режимів роботи технологічних ліній. Комплексне поєднання цих рішень дозволяє знизити експлуатаційні витрати, підвищити ефективність уловлювання компонентів та забезпечити екологічну безпеку виробництва.

Одним із важливих напрямів енергозбереження в абсорбційних процесах є застосування високоефективних регулярних насадок, які забезпечують зниження гідравлічного опору апаратів. У насадкових абсорберах значна частина енергії компресорів і вентиляторів витрачається на подолання опору шару насадки. Використання регулярних структурованих насадок замість традиційних хаотичних насадок (кілець Рашига або Паля) дозволяє зменшити перепад тиску в 1,5–2 рази за збереження високої ефективності масообміну. Регулярні насадки формують упорядкований рух потоків газу та рідини, зменшують застійні зони та локальні втрати на тертя, що сприяє зниженню енергоспоживання обладнання для транспортування потоків.

Важливим напрямом підвищення енергоефективності є використання малов'язких абсорбентів нового покоління. Традиційні водні розчини етаноламінів, зокрема моноетаноламіну (МЕА) та діетаноламіну (ДЕА), характеризуються високою в'язкістю та

значною теплоємністю, що зумовлює підвищені витрати енергії на перекачування та регенерацію. Сучасні технології передбачають використання низьков'язких амінових сумішей, іонних рідин та композиційних абсорбентів із додаванням органічних розчинників, таких як метанол або сульфолан. Використання сучасних амінових сумішей дозволяє знизити енерговитрати на десорбцію CO_2 до 2,5 ГДж/т, тоді як для традиційних 30 % розчинів MEA цей показник становить близько 3,8–4,0 ГДж/т. Зменшення в'язкості абсорбентів також забезпечує скорочення витрат електроенергії на роботу насосного обладнання на 15–25 %.

Значний потенціал енергозбереження мають циркуляційні системи з проміжним відведенням теплоти із зон абсорбції. У процесах хімічної абсорбції, які супроводжуються екзотермічними реакціями, підвищення температури рідини знижує розчинність газових компонентів і погіршує ефективність поглинання. Для стабілізації температурного режиму використовують проміжні теплообмінники або виносні холодильники, розташовані на різних рівнях колони. Відведення теплоти реакції дозволяє підтримувати оптимальний температурний режим, підвищувати рушійну силу процесу масопереносу та зменшувати необхідну висоту апарата. Це забезпечує зниження витрат енергії на циркуляцію абсорбенту та скорочення теплових витрат на його регенерацію. У порівнянні з адіабатичними системами економія теплової енергії може досягати 20–30 %.

Енергоефективною альтернативою традиційним безперервним процесам є циклічні схеми абсорбції-десорбції з використанням перепадів тиску та вакуумування. У таких системах абсорбція та регенерація відбуваються в одному апараті за рахунок чергування режимів підвищеного і зниженого тиску. Поєднання циклів «тиск–вакуум» із використанням твердих носіїв рідких абсорбентів або іммобілізованих амінів дозволяє суттєво скоротити витрати теплоти на регенерацію. Застосування таких технологій дозволяє скоротити загальне споживання первинної енергії на 35–50 % порівняно з традиційними амінними установками.

Висновки

Підвищення енергоефективності абсорбції в хімічній промисловості досягається через використання регулярних насадок, малов'язких сорбентів, мембранних елементів та проміжного охолодження, що знижує опір потоків і витрати тепла. Впровадження циклів «тиск–вакуум», іммобілізованих абсорбентів та теплової інтеграції дозволяє замінити високотемпературну регенерацію економнішими низькотемпературними або механічними методами десорбції. Такий комплексний підхід суттєво скорочує споживання первинної енергії, зменшує експлуатаційні витрати та підвищує екологічну безпеку виробництва.

Список використаних джерел

1.F. Ziegler ,P.Riesch(2000)-*Absorption cycles. A review with regard to energetic efficiency*

2.N.Ellebracht,P.Roy, T.Moore, A.Gongora, D.Oyarzun,D.Nguyen(2023)-*3D printed triply periodic minimal surfaces as advanced structured packings for solvent-based CO2 capture*

3.A. Cousins L.T. Wardhaugh,P.H.M. Feron (2011)-*A survey of process flow sheet modifications for energy efficient CO2 capture from flue gases using chemical absorption*

4. M.L. Gray, K.J. Champagne, D. Fauth, J.P.Baltrus,Henry Pennline(2008)- *Performance of immobilized tertiary amine solid sorbents for the capture of carbon dioxide*

Mariana Shepida,
PhD, docent
Tetiana Bulavinets,
PhD, docent
Lviv Polytechnic National University

PULSED LASER DEPOSITION OF BIMETALLIC NANOPARTICLES ON SILICON SURFACE

Abstract: *The work investigates the features of the formation of bimetallic nanoparticles on the surface of silicon by pulsed laser deposition in non-aqueous solutions of metal salts. The relevance of the study is due to the significant interest in bimetallic nanostructures, which are characterized by unique optical, electrophysical and catalytic properties. Due to this, such materials are promising for use in plasmonics, sensor systems, SERS substrates, photonic and optoelectronic devices, catalysts of chemical reactions, as well as in modern systems for converting and accumulating solar energy. The pulsed laser deposition method is considered as an effective method for synthesizing nanostructures, since it provides a high level of control over deposition parameters, localized energy supply and the possibility of forming nanomaterials with predetermined characteristics. In the course of the study, the influence of the laser radiation wavelength and deposition duration on the morphology of the formed nanostructures was analyzed. It was found that under certain synthesis conditions, nanoparticles with a diameter of up to 100 nm are formed on the surface of a silicon substrate, which are characterized by a uniform distribution over the surface. It was shown that with an increase in the wavelength of laser radiation, a gradual transition occurs from individual isolated nanoparticles to the formation of continuous porous nanostructured films. It was also found that an increase in the duration of the deposition process promotes the growth and agglomeration of nanoparticles due to the intensification of the processes of nucleation of new crystallization centers and accumulation of material on the substrate surface. The results obtained confirm the prospects of using pulsed laser deposition in non-aqueous media for the controlled formation of bimetallic nanostructures with adjustable morphological and functional properties. The conducted study creates a basis for further optimization of the technology of nanomaterial synthesis and expansion of the areas of their practical application in nanophotonics, sensors, catalysis and energy technologies.*

Keywords: *bimetallic nanoparticles; silicon surface; pulsed laser deposition; nanostructures; non-aqueous solutions; porous films; nanoparticle morphology; plasmonic materials.*

The silicon surface modified with bimetallic nanoparticles is widely used in the creation of plasmonic sensors, SERS substrates, photonic structures, catalysts, solar cell elements and other functional nanomaterials [1]. Significant interest in such structures is due to the unique electrophysical, optical and catalytic properties of bimetallic nanoparticles, which can be controlled to change depending on their composition, morphology, geometric parameters and method of formation. The use of bimetallic nanostructures in the fields of nanoelectronics, optoelectronics, photonics, energy storage and conversion are especially promising, where the processes of local amplification of the electromagnetic field, charge transfer and catalysis of surface reactions play an important role.

One of the most effective methods for forming nanoparticles on the surface of semiconductor materials is Pulsed Laser Deposition. The main advantages of laser deposition are high locality of the process, precision control of deposition parameters, absence of mechanical contact with the surface and the possibility of forming nanostructures with specified characteristics. In addition, laser irradiation provides localized energy impact on the silicon surface, which allows initiating the

processes of nucleation, growth and fixation of nanoparticles without significant damage to the substrate.

Over the past decade, the method of pulsed laser deposition has been actively used for the synthesis of metal and bimetallic nanostructures mainly in aqueous solutions. However, the use of an aqueous medium is accompanied by a number of side physicochemical processes, in particular, photolysis of water, formation of oxide phases, particle aggregation and uncontrolled metal reduction reactions. This significantly complicates the controlled formation of metal deposits, as well as control of the morphology, distribution and geometric parameters of nanoparticles. In this regard, a promising direction is the use of non-aqueous media, which provide more stable deposition conditions, reduce the intensity of side reactions and increase the homogeneity of the formed nanostructures [2]. The aim of the work is to study the influence of pulsed laser deposition modes, in particular the wavelength of laser radiation and the duration of the deposition process, on the formation of bimetallic nanoparticles on the silicon surface.

As a result of the conducted studies, it was established that during pulsed laser deposition in metal salt solutions on the silicon surface, bimetallic nanoparticles with a diameter of up to 100 nm are formed, which are evenly distributed over the substrate surface. It was found that changing the wavelength of laser radiation significantly affects the morphology of the formed deposit. With an increase in the wavelength, a transition is observed from the formation of individual discrete nanoparticles to the formation of a continuous nanostructured porous film.

It was also found that increasing the duration of pulsed laser deposition leads to an increase in the size of bimetallic nanoparticles. This is explained by the intensification of the nucleation processes and subsequent particle growth due to the accumulation of material on the surface of the silicon substrate. With longer irradiation, the probability of agglomeration and the formation of larger cluster structures increases.

Thus, it is shown that the main parameters that determine the geometric characteristics, morphology and features of the formation of bimetallic nanoparticles on the silicon surface are the wavelength of laser radiation and the duration of pulsed laser deposition. Controlling these parameters opens up the possibility of purposeful formation of nanostructures with specified properties for further use in modern nanotechnological and optoelectronic systems.

Acknowledgement

The authors express their gratitude to the Ministry of Education and Science of Ukraine for supporting this research under the grant entitled "Modelling of optical parameters and fabrication of plasmonic nanoparticles for integration into the structure of highly efficient energy-saving optoelectronic converters" (registration No 0126U000628).

References

1. Bulavinets, T., Grokhotov, V., Helzhynskyy, at all (2026). Morphological Engineering of Plasmonic Nanostructures: Simulation of Optical Response for Nanoparticles with Basic Geometries. Ukrainian Journal of Physical Optics, 27(1), 01054-01069.

2. Nanoscale galvanic replacement in non-aqueous media: A mini-review / O.I. Kuntyi, G.I. Zozulya, M.V. Shepida // Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii. – 2020. – №4. – P. 5–15.

Ярослав ХОЛОД
аспірант
Володимир СТАРЧЕВСЬКИЙ
д.т.н., професор,
Роман ЧИЖОВИЧ
доктор філософії, асистент
Національний університет «Львівська політехніка»

ЗОВНІШНЯ ТА ВНУТРІШНЯ ЗАДАЧА ГІДРОДИНАМІКИ СТАЦІОНАРНОГО ШАРУ ВАПНЯКОВО-АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ

Анотація. *Досліджено гідродинаміку фільтрування газового потоку крізь стаціонарний шар гранульованої вапняково-аміачної селітри (ВАС) шляхом розділення процесу на зовнішню та внутрішню задачі. На основі апроксимації експериментальних даних отримано критеріальні рівняння зв'язку критерію Ейлера з критерієм Рейнольдса та геометричним симплексом. Знайдені залежності дозволяють з достатньою точністю прогнозувати втрати тиску, що необхідно для проектування енергоефективних промислових установок фільтраційного сушіння ВАС.*

Ключові слова: *зовнішня задача гідродинаміки, внутрішня задача гідродинаміки, дисперсний матеріал, вапняково-аміачна селітра, стаціонарний шар, газовий потік*

Актуальність. Дослідження гідродинаміки руху газового (рідинного) потоку крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу має актуальне значення для багатьох технологічних процесів хімічної технологія, зокрема в процесах адсорбції (десорбції), абсорбції, екстракції, фільтраційному сушінні тощо. Режим руху газу (рідини) визначає значення коефіцієнтів тепло і масообміну, і відповідно інтенсивність технологічних процесів, енергетичні затрати, а також якість і собівартість готової продукції.

Результати дослідження втрат тиску в стаціонарний шар ВАС наведено на рис. 1.

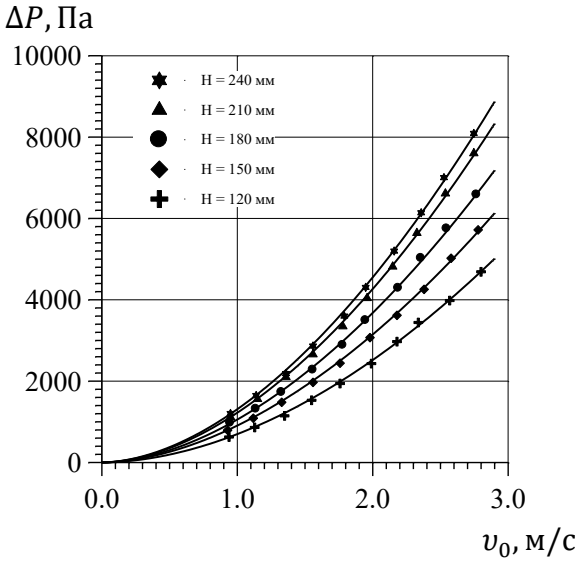


Рисунок 1 – Залежність втрат тиску ΔP від фіктивної швидкості υ_0 фільтрування газового потоку крізь стаціонарний шар вапняково-аміачної селітри

Фільтрування газового потоку крізь стаціонарний дисперсного матеріалу представляє собою змішану задачу гідродинаміки. Однак теорії змішаної задачі гідродинаміки не існує, тому досліджували окремо зовнішню і внутрішню задачі гідродинаміки стаціонарного шару. Під час фільтрування газового потоку крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу газовий потік омиває зовнішню поверхню кожної частинки і характерним розміром для визначення втрат тиску є усереднений розмір частинки полідисперсного матеріалу що представляє собою зовнішню задачу гідродинаміки. Під час фільтрації газу крізь канали між частинками характерним параметром є еквівалентний розмір цих каналів

Для дослідження внутрішньої і зовнішньої задачі гідродинаміки обрано гранульовану вапняково-аміачну селітру (ВАС), виробництво якої в Україні є багатотоннажним. Для прогнозування втрат тиску у стаціонарному шарі ВАС результати експериментальних

досліджень представляли у вигляді безрозмірних комплексів $Eu = f(Re, \Gamma)$, і відповідно $Eu = A \cdot Re^{-x} \cdot \left(\frac{H}{d}\right)^{y}$, а результати експериментальних досліджень у безрозмірній формі представлені на рис. 2 і рис. 3.

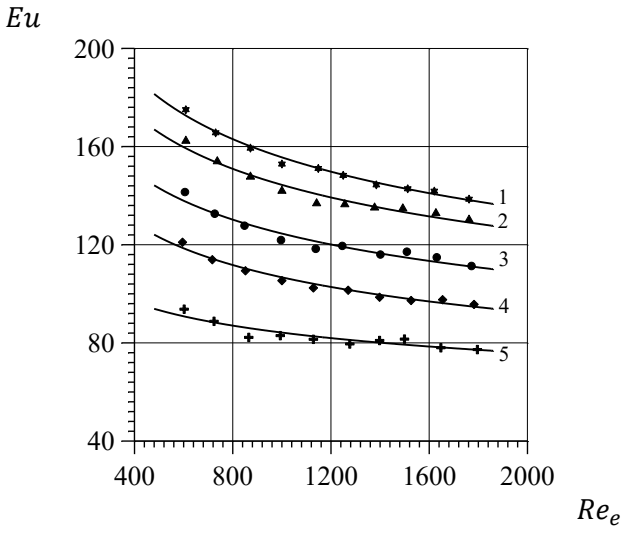


Рисунок 2 – Графічна залежність критерію $Eu = f(Re_e)$ (Зовнішня задача гідродинаміки, позначення відповідають рис. 1)

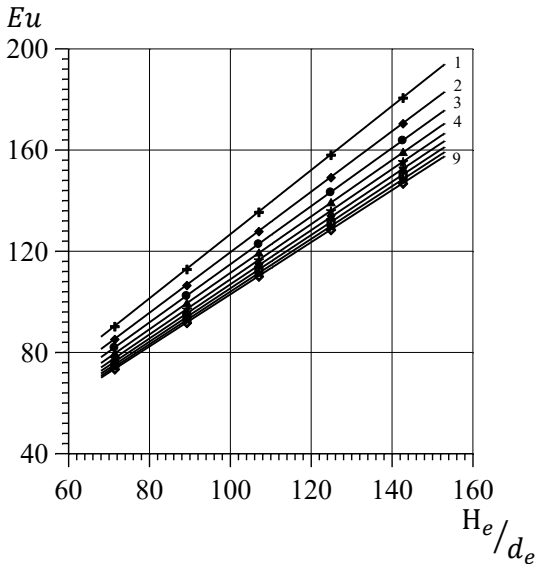


Рисунок 3 – Залежність критерію Ейлера від геометричного симплексу (Внутрішня задача гідродинаміки позначення відповідають рис. 1)
1 – $Re_{вн}$ = 240, 2 – 300, 3 – 360, 4 – 420, 5 – 480, 6 – 540, 7 – 600, 8 – 660, 9 – 720

Апроксимація експериментальних даних степеневою функцією дала можливість встановити залежність критерію Ейлера від критерія Рейнольдса і геометричного симплексу:

– для зовнішньої задачі гідродинаміки: $Eu = 7 \cdot Re_e^{-0,2} \cdot \left(\frac{H_e}{d_{cas}}\right)$;

– для внутрішньої задачі гідродинаміки: $Eu = 3,8 \cdot Re_{вн}^{-0,2} \cdot \frac{H}{d_e}$.

Кінцевою метою експериментальних досліджень є зменшення енергетичних затрат на висушування гранул ВАС замінивши конвективне сушіння в обертових барабанах на фільтраційне сушіння, яке як стверджують багато авторів [1-3] є одним із найбільш ефективних. Отримані розрахункові залежності дають змогу прогнозувати втрати тиску в стаціонарному шарі ВАС з достатньою точністю для проектування установки фільтраційного сушіння.

Список використаних джерел

1. Hydrodynamics of filtration drying of wild carrot pomace. Denysiuk, A., Atamanyuk, V., Hnativ, Z., Boldyryev, S. Environmental Problems, 2025, 10(1), pp. 79–87. DOI: https://doi.org/10.23939/ep2025.01.079.
2. Denysiuk A., Atamanyuk V., Hnativ Z. Hydrodynamics of crushed oregano filtration drying // Chemistry & Chemical Technology. – 2025. – Vol. 19, № 3. – P. 511–519. https://doi.org/10.23939/chcht19.03.511.
3. Chyzhovych R., Ivashchuk O., Atamanyuk V. Hydrodynamic parameters determination of plant renewable material drying by filtration method // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2025. – Advanced manufacturing processes : 7th Grabchenko's international conference (InterPartner-2025), Kielce, 23-26 September 2025. – P. 89–98. https://doi.org/10.1007/978-3-032-14926-8_8.

СЕКЦІЯ 4 | Цифрові технології, IoT та штучний інтелект для управління енергоспоживанням
SECTION 4 | Digital Technologies, IoT and Artificial Intelligence for Energy Consumption Management

Людмила Богінська
к.е.н., доцент
Сумський національний аграрний університет

ЗЕЛЕНЕ БУДІВНИЦТВО ЯК ІНСТРУМЕНТ СТАЛОГО ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

Анотація. *У роботі розглянуто сутність зеленого будівництва як інноваційного підходу до проєктування, зведення та експлуатації будівель, що базується на принципах сталого розвитку та передбачає ефективне використання ресурсів і мінімізацію впливу на довкілля. Обґрунтовано актуальність впровадження зеленого будівництва в Україні в умовах повоєнного відновлення, з урахуванням енергетичних ризиків та необхідності інтеграції до європейських стандартів. Доведено, що розвиток зеленого будівництва сприяє підвищенню енергетичної безпеки, зниженню витрат ресурсів та формуванню основ сталого економічного розвитку України.*

Ключові слова: *зелене будівництво, сталий розвиток, енергоефективність, ресурсозбереження, циркулярна економіка, BIM-технології.*

Зелене будівництво - це підхід до проєктування, зведення та експлуатації будівель, який передбачає мінімізацію впливу на довкілля, ефективне використання енергії, води та матеріалів, а також забезпечення комфортного та безпечного середовища для людини. Воно базується на принципах сталого розвитку, що поєднують економічність, екологічність і соціальну користь. У контексті повоєнного відновлення України зелене будівництво набуває стратегічного значення, оскільки значна частина інфраструктури зруйнована або пошкоджена, існує потреба у швидкій, але якісній відбудові, спостерігаються високі енергетичні ризики, пов’язані із залежністю від енергоресурсів і пошкодженням енергосистем, а також актуальною є інтеграція до європейських стандартів, зокрема Green Deal і ESG-підходів. Відтак відновлення має здійснюватися не лише як відбудова, а як модернізація на новій «зеленій» основі [4].

Основними напрямами зеленого будівництва є підвищення енергоефективності через утеплення будівель, використання енергоощадних технологій і впровадження систем «розумного будинку», застосування відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних панелей, теплових насосів і локальних енергосистем, використання екологічних матеріалів, включаючи вторинну сировину та матеріали з низьким вуглецевим слідом, а також раціональне використання ресурсів шляхом економії води, повторного використання матеріалів і зменшення будівельних відходів. Важливу роль відіграють і цифрові технології, зокрема BIM-моделювання, що дозволяє оптимізувати витрати ресурсів і ефективно управляти життєвим циклом об’єктів [3].

Переваги зеленого будівництва проявляються в економічній, енергетичній, екологічній та соціальній площинах. З економічної точки зору воно забезпечує зниження експлуатаційних витрат, підвищення інвестиційної привабливості та подовження життєвого циклу об’єктів. В енергетичному аспекті сприяє зменшенню залежності від зовнішніх джерел енергії та підвищенню енергетичної безпеки країни. Екологічні переваги полягають у скороченні викидів CO_2 та зменшенні навантаження на довкілля, тоді як соціальні - у покращенні якості життя населення та створенні безпечного і комфортного середовища.

Водночас впровадження зеленого будівництва в Україні супроводжується низкою викликів, серед яких високі початкові інвестиції, недостатній рівень нормативно-правового

забезпечення, обмежений доступ до «зеленого» фінансування, нестача кваліфікованих кадрів і низька обізнаність учасників ринку. Попри це, перспективи розвитку пов'язані з гармонізацією національних стандартів із європейськими вимогами, зокрема Nearly Zero Energy Buildings, розвитком механізмів «зеленого» фінансування та державно-приватного партнерства, стимулюванням інновацій у будівництві, масштабуванням енергоефективної реконструкції житлового фонду та впровадженням принципів циркулярної економіки [1].

Важливим аспектом є також формування державної політики стимулювання зеленого будівництва через податкові пільги, грантові програми та підтримку інноваційних проєктів. Не менш значущим є розвиток освітніх програм і підготовка фахівців, здатних працювати з сучасними технологіями та стандартами. У перспективі це сприятиме формуванню конкурентоспроможного будівельного ринку та залученню міжнародних інвестицій. Крім того, поширення принципів зеленого будівництва стимулює розвиток суміжних галузей, зокрема виробництва екологічних матеріалів і відновлюваної енергетики. У сукупності це забезпечує мультиплікативний ефект для економіки та сталого розвитку країни [2].

Додатково слід відзначити, що впровадження стандартів енергоефективності сприяє підвищенню прозорості будівельного ринку та якості реалізації проєктів. Важливу роль відіграє цифровий моніторинг показників енергоспоживання, що дозволяє оперативно реагувати на відхилення та підвищувати ефективність управління об'єктами. Участь міжнародних організацій та фінансових інституцій створює додаткові можливості для масштабування «зелених» ініціатив в Україні. Таким чином, комплексне поєднання інноваційних технологій, державної підтримки та інвестицій забезпечує стійкий розвиток будівельної галузі на засадах екологічної та енергетичної ефективності [4].

Висновок. Зелене будівництво є не просто сучасним трендом, а ключовим інструментом сталого відновлення інфраструктури України. Воно дозволяє одночасно вирішити три стратегічні завдання: відбудувати зруйновані об'єкти, підвищити енергетичну незалежність та забезпечити екологічну безпеку. Саме такий підхід формує основу довгострокового економічного розвитку країни.

Список використаних джерел

1. Кузьменко Г., Телендій А. Інноваційні моделі публічно-приватного партнерства у відбудові зруйнованих територій: виклики та можливості. Наукові праці Міжрегіональної Академії управління персоналом. Політичні науки та публічне управління. 2024. Вип. 4, № 76. С. 71–77. DOI: https://doi.org/10.32689/2523-4625-2024-4(76)-9.

2. Блонний А. Оптимізація будівництва в умовах кризових ситуацій та подальшого відновлення: адаптивні моделі для критичної інфраструктури. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2024. Вип. 2, № 54. С. 200–213. URL: http://ways.knuba.edu.ua/article/view/341397/329333(дата звернення: 27.10.2025).

3. Шпатакова О., Іваненко Р., Погребицький М. Перспективи відновлення критичної інфраструктури на деокупованих територіях України. Економіка та суспільство. 2022. Вип. 40. DOI: https://doi.org/10.32782/ 2524-0072/2022-40-5.

4. Микитенко В. В. Повоєнне відновлення та розвиток критичної інфраструктури України. Вісник економічної науки України. 2023. № 1, № 44. С. 124–138. DOI: https://doi.org/10.37405/1729-7206.2023.1(44). 124-138.

Іван Горбатий
д.т.н., професор,
Андрій Андрухів
аспірант
Національний університет «Львівська політехніка»

ГІБРИДНІ МОДЕЛІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОВИТРАТ ХМАРНИХ ЦЕНТРІВ ОБРОБКИ ДАНИХ

Анотація. *Розглянуто застосування гібридних моделей машинного навчання для прогнозування навантаження та оптимізації енерговитрат хмарних центрів обробки даних. Обґрунтовано доцільність поєднання згорткових нейронних мереж, моделі з довгою короткостроковою пам'яттю та градієнтного підсилення для здійснення європейських стратегій енергозбереження в умовах розвитку інформаційних технологій України. Запропоновано архітектуру гібридної моделі та проаналізовано ефекти від її впровадження.*

Ключові слова: *гібридні моделі машинного навчання, центри обробки даних, енергоефективність, прогнозування навантаження, нейронні мережі, енергозбереження.*

Хмарні центри обробки даних є одним із найбільш енергоємних сегментів сучасної інформаційно-комунікаційної інфраструктури: за оцінками Міжнародного енергетичного агентства, у 2024 році на них припадало 1,5 % світового споживання електроенергії, а до 2030 року прогнозується подвоєння цього показника внаслідок розвитку хмарних сервісів та систем штучного інтелекту [1]. Оптимізація енерговитрат таких об'єктів є ключовим напрямом реалізації європейських стратегій енергозбереження, передусім ініціативи Європейського зеленого курсу та Кодексу поведінки Європейського Союзу щодо енергоефективності центрів обробки даних [2].

Класичні методи прогнозування навантаження центрів обробки даних, зокрема авторегресійні моделі типу ARIMA, не забезпечують достатньої точності в умовах нестаціонарних і багаторівневих закономірностей хмарного трафіку. Окремі методи машинного навчання: згорткові нейронні мережі, моделі з довгою короткостроковою пам'яттю та ансамблі градієнтного підсилення - кожен має свої переваги, проте жоден з них окремо не охоплює всього спектра закономірностей навантаження [3]. Порівняння цих підходів подано в таблиці 1.

Як видно з таблиці 1, найвищу точність забезпечує гібридна архітектура, що поєднує переваги згорткових мереж, рекурентних мереж та градієнтного підсилення.

Запропонована архітектура передбачає послідовно-паралельну обробку даних: згорткова мережа виявляє локальні просторові закономірності в багатовимірних даних телеметрії, рекурентна мережа моделює довгострокові часові залежності трафіку, а градієнтне підсилення поєднує прогнози попередніх рівнів з контекстними ознаками (день тижня, температура, тарифи). Прогноз на горизонт від 15 хв до 24 год слугує основою для рішень у чотирьох підсистемах: керування енергоспоживанням серверів, керування системами охолодження, консолідації віртуальних машин та інтеграції з відновлюваними джерелами в межах інтелектуальної енергомережі.

Таблиця 1 Порівняння моделей машинного навчання для прогнозування навантаження центрів обробки даних

Модель	Сильні сторони	Обмеження	Похибка прогнозу
ARIMA	Простота, інтерпретованість	Лише лінійні залежності	8–12 %
CNN	Виявлення локальних закономірностей у багатовимірних даних	Слабке моделювання довгих залежностей	5–8 %
LSTM	Моделювання часових залежностей	Високі обчислювальні витрати, перенавчання	4–6 %
XGBoost	Висока швидкість, робота з гетерогенними ознаками	Ігнорування порядку даних	4–7 %
CNN-LSTM-XGBoost	Комплексне врахування просторово-часових і контекстних ознак	Складність налаштування й інтерпретації	2–4 %

Очікувані ефекти від упровадження гібридних моделей у хмарних центрах обробки даних виявляються одночасно у технічній, економічній та екологічній площинах: зниження похибки прогнозу до 2–4 % забезпечує економію 8–15 % електроенергії, скорочення коефіцієнта ефективності використання енергії з 1,5–1,7 до 1,2–1,3 та зменшення викидів вуглекислого газу на 20–30 % при поєднанні з відновлюваними джерелами. Для України впровадження таких рішень є особливо актуальним з огляду на обмеженість генеруючих потужностей та зобов'язання щодо синхронізації з європейською енергомережею.

Водночас виявлено низку проблем, які потребують подальшого вирішення: 1) висока обчислювальна складність гібридних архітектур призводить до значного енергоспоживання процесу навчання та перенавчання, що частково зменшує очікувану економію; 2) низька інтерпретованість моделей ускладнює їх упровадження у критичну енергетичну інфраструктуру; 3) нестаціонарність хмарного трафіку та зміна закономірностей навантаження у воєнних умовах призводять до швидкого «старіння» прогнозних моделей; 4) дефіцит репрезентативних відкритих наборів даних телеметрії центрів обробки даних в Україні ускладнює навчання й валідацію моделей.

Список використаних джерел

1. International Energy Agency. Electricity 2024: Analysis and forecast to 2026. Paris : IEA, 2024. 170 p.
2. 2024 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency / EU Joint Research Centre. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2024. 96 p.
3. Hong T., Pinson P., Wang Y. et al. Energy forecasting: A review and outlook // IEEE Open Access Journal of Power and Energy. 2020. Vol. 7. P. 376–388.

Ірина Думин
к.т.н., доцент,
Національний університет «Львівська політехніка»

КОНТЕКСТНА ІНЖЕНЕРІЯ ЯК ЧИННИК ЕНЕРГООПТИМІЗАЦІЇ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ

Анотація. *У дослідженні проаналізовано вплив методів контекстної інженерії на енергоефективність мультиагентних систем на основі великих мовних моделей. Встановлено, що ітеративні цикли міркувань спричиняють експоненційне зростання траєкторій діалогу (до 1 млн кумулятивних токенів на завдання), причому до 99% трафіку становлять вхідні дані, що створює значне навантаження на пам'ять і енергоспоживання. На основі бенчмарка TokenPowerBench показано, що ефективна організація контексту дозволяє суттєво знизити обчислювальні витрати, тоді як її нераціональна реалізація та циклічні процеси міркування призводять до перевитрат енергії, що обумовлює необхідність апаратно-системного ко-дизайну для мінімізації втрат при переміщенні даних між рівнями пам'яті.*

Ключові слова: *Контекстна інженерія, енергоефективність, мультиагентні системи, великі мовні моделі, стиснення траєкторій, контекстна маршрутизація, структурована пам'ять, TokenPowerBench.*

Вступ та актуальність. Стрімка інтеграція автономних агентів на базі великих мовних моделей у виробничі процеси висвітлила проблему їхньої критичної енергоємності. Сучасні мультиагентні системи використовують багатокрокові ітеративні цикли, наприклад, ReAct, що призводить до експоненційного зростання траєкторії діалогу. Зокрема, вирішення однієї програмної помилки в бенчмарку SWE-bench Verified вимагає в середньому 48,4 тис. токенів за 40 кроків, що через накопичення історії трансформується у понад 1,0 млн кумулятивних токенів на одне завдання. Оскільки до 99% трафіку складають вхідні токени траєкторії, виникає значне навантаження на пропускну здатність пам'яті, що безпосередньо корелює зі зростанням вуглецевого сліду та вартості обслуговування інфраструктури [1]. Контекстна інженерія, що охоплює методи стиснення, маршрутизації та структурування пам'яті, постає ключовим інструментом для переходу від пасивного оркестрування до активного енергоефективного контролю обчислень.

Теоретико-методологічний базис. Координація в контекст-орієнтованих системах формалізується як децентралізований частково спостережуваний марківський процес прийняття рішень [2]. У такій моделі обсервація кожного агента $o_{i,t}$ обмежується суб-контекстом c_{t_i}, який формується оператором стиснення та маршрутизації з урахуванням ролі агента та жорсткого ліміту токенів. Цільовою функцією системи є максимізація очікуваної винагороди при дотриманні енергетичного бюджету інференсу E_{budget}. Фізичне енергоспоживання системи E_{total} визначається як інтеграл потужності CPU та GPU, де миттєві значення потужності детермінуються обсягом зчитування та обчислення токенів, що залежить від ефективності оператора .

Методологія вимірювання. Для оцінки енергоефективності критично важливим є розмежування метрик: непрямі (проксі) метрики, такі як обсяг токенів, час виконання та кількість запитів; прямі фізичні показники, тобто енергоспоживання (Дж), потужність (Вт) та інтегральна витрата енергії (кВт·год), що вимірюються засобами Intel RAPL, NVML/DCGM

або зовнішніми ватметрами. Спеціалізований бенчмарк TokenPowerBench дозволяє проводити фазову декомпозицію енерговитрат на етапи обробки входу та генерацією, виявляючи, що енергія на токен зростає суперлінійно відносно розміру моделі [3].

Програмні методи стиснення контексту та маршрутизації. Оптимізація траєкторій, наприклад, підхід AgentDiet, дозволяє скоротити кількість вхідних токенів на 39,9–59,7%, що забезпечує зменшення обчислювальних витрат на 21,1–35,9% без деградації якості[1]. Використання систем адаптивного маршрутизування, таких як GreenServ, Smart Meta-Controller, між «легкими» та «важкими» моделями залежно від складності завдання дає виграш до 62% енергії на запит. Ефект досягається за рахунок фундаментального фактора − зменшення обсягу обчислень і кількості оброблюваних токенів, що є прямими детермінантами фізичного енергоспоживання.

Логічна організація пам’яті та апаратний аспект. Структурування пам’яті за рольовим принципом, наприклад, RCR-Router, дозволяє відбирати лише семантично релевантні фрагменти, скорочуючи обсяг токенів до 30% та час виконання на ~38% [4]. Епізодична реконструкція контексту E-mem здатна знизити токен-вартість на понад 70%. Ієрархічні підходи H-MEM, AOI забезпечують цілеспрямовану фільтрацію інформації, що мінімізує кількість дорогих звернень до пам'яті. Водночас наявні дослідження підкреслюють важливість апаратно-системного ко-дизайну. Використання MoE-архітектур забезпечує 2–3-кратне зменшення енергії на токен порівняно з щільними моделями. Однак нераціональна організація ієрархії пам'яті, як-от вивантаження ваг MoE на повільні SSD-накопичувачі, може збільшити енерговитрати у 12 разів, нівелюючи переваги алгоритмічної оптимізації. Натомість спеціалізовані рішення H3D-LLM досягають підвищення енергоефективності до 12,3 раза через оптимізацію KV-кешу.

Висновки. Застосування методів контекстної інженерії забезпечує зниження обчислювальних витрат на 20–35%, тоді як неефективна організація контексту та циклічні міркування можуть призводити до до 9,4-кратного перевитрачання енергії. Перспективними напрямами є розробка легковагових моделей для моніторингу ентропії контексту з метою виявлення непродуктивних циклів, а також проектування гетерогенних систем зберігання, що узгоджують логічні рівні пам’яті з фізичною архітектурою, і створення уніфікованих бенчмарків для енергетичного профілювання мультиагентних систем.

Список використаних джерел

1. Xiao Y. Improving the Efficiency of LLM Agent Systems through Trajectory Reduction / Y. Xiao, P. Gao, C. Peng, Y. Xiong // arXiv. – 2025. – arXiv:2509.23586. – DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.23586
2. Dibangoye J. Optimally Solving Dec-POMDPs as Continuous-State MDPs / J. Dibangoye, C. Amato, O. Buffet, F. Charpillet // Journal of Artificial Intelligence Research. – 2013. – P. 90–96. – DOI: https://doi.org/10.1613/jair.4623
3. Niu C. TokenPowerBench: Benchmarking the Power Consumption of LLM Inference / C. Niu, W. Zhang, J. Li, Y. Zhao, T. Wang, X. Wang, Y. Chen // arXiv. – 2025. – arXiv:2512.03024. – DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.03024
4. Liu J. RCR-Router: Efficient Role-Aware Context Routing for Multi-Agent LLM Systems with Structured Memory / J. Liu, Z. Kong, C. Yang, F. Yang, T. Li, P. Dong, J. Nanjekye, H. Tang, G. Yuan, W. Niu, W. Zhang, P. Zhao, X. Lin, D. Huang, Y. Wang // arXiv. – 2025. – arXiv:2508.04903. – DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.04903.

Elvira Dzhumelia
PhD,
Andriy Fechan
Dr. Sc., Prof.,
Yuriy Khoverko
Dr. Sc., Prof.,
Lviv Polytechnic National University

SMART TEMPERATURE MONITORING USING PASSIVE LIQUID CRYSTAL–SEMICONDUCTOR SENSORS FOR ENERGY-EFFICIENT ENVIRONMENTS

Abstract. *This study investigates the feasibility of applying passive optical sensors based on liquid crystal–semiconductor structures for non-contact temperature monitoring in energy-efficient digital environments. An approach for digital optical signal processing is proposed, including spectral response acquisition, white balance correction, transformation of colour coordinates from CIE XYZ to RGB, and gamma correction. The experimental results demonstrate that the highest sensitivity of the sensor structures is observed in the spectral range of 450–550 nm, where the maximum signal intensity reaches 1.4 relative units. A temperature-dependent calibration characteristic,* $\lambda_{max} = f(T)$*, was obtained, confirming the possibility of quantitative temperature determination based on the spectral shift of the selective reflection maximum. The results demonstrate the potential for integrating the proposed sensors into IoT platforms, smart building systems, and energy consumption monitoring systems.*

Keywords: *passive optical sensors; liquid crystals; semiconductor structures; temperature monitoring; energy-efficient systems; Internet of Things; digital image processing; colorimetry; smart monitoring; non-contact diagnostics.*

The modern development of energy-efficient technologies, Industry 4.0 concepts and the Internet of Things are driving an increasing demand for sensor systems capable of providing continuous real-time monitoring of environmental parameters with minimal energy consumption. Temperature is one of the key parameters determining the energy efficiency of technical systems, building infrastructure, electronic equipment, and industrial facilities. At the same time, conventional electrical temperature sensors operating under conditions of increased electromagnetic interference may exhibit reduced measurement accuracy, require additional power supply, and involve complex signal processing circuits.

A promising alternative involves the use of passive optical sensors based on functionally integrated liquid crystal–semiconductor structures, in which the detection process relies on changes in the spectral characteristics of an optically active medium under the influence of external physical factors. Cholesteric liquid crystals are characterized by a helical supramolecular structure whose pitch is highly sensitive to temperature variations. Structural rearrangement of the mesophase is accompanied by a spectral shift of the selective reflection maximum, resulting in a colour change of the sensing element, which can be utilized for non-contact temperature monitoring. Such an approach eliminates the need for active electrical primary transducers, reduces the influence of electromagnetic interference, and decreases the overall energy consumption of the system [1, 2].

The aim of this study is to evaluate the feasibility of applying passive optical sensors based on liquid crystal–semiconductor structures for smart temperature monitoring in energy-efficient digital environments.

For digital processing of the optical signal, an optical identification algorithm was implemented, which includes:

- spectral signal acquisition using digital optical systems;
- white balance correction to compensate for illumination conditions;
- matrix transformation of colour coordinates from CIE XYZ to the RGB colour space;
- gamma correction of nonlinear colour channels;
- construction of calibration dependencies of the spectral response as a function of temperature.

Experimental studies were conducted in the optical range of 370–650 nm. It was established that the highest sensitivity of the sensor structures is observed within the 450–550 nm wavelength range, where the maximum signal intensity reaches I = 1.4 relative units. Analysis of the spectral response showed that a wavelength shift of 10 nm is accompanied by an intensity variation of approximately 0.14 relative units, indicating high spectral resolution of the sensor system and the capability to detect small temperature variations. A temperature-dependent shift of the selective reflection maximum was identified and described by the calibration relationship $\lambda_{max} = f(T)$. The obtained results confirm the stability of the optical response and the reproducibility of measurements during repeated heating and cooling cycles [3-5].

Additionally, it was found that the application of digital image processing enables automated classification of the temperature states of the sensing element without direct electrical contact with the monitored object, thereby expanding the possibilities for integrating such sensors into distributed monitoring systems.

These results confirm the potential of passive optical sensors for application in energy consumption monitoring systems for smart buildings, industrial Internet of Things platforms, predictive equipment diagnostics systems, as well as environmental monitoring of industrial facilities, where low energy consumption, electromagnetic compatibility, autonomous operation, and remote diagnostics are of critical importance.

References

1. Siew, S., Li, B., Gao, F., et al. (2021). Review of silicon photonics technology and platform development. *Journal of Lightwave Technology, 39*(13), 4374–4389. https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3066203
2. Li, C., Cui, G., Melgosa, M., Ruan, X., Zhang, Y., Ma, L., Xiao, K., & Luo, M. R. (2016). Accurate method for computing correlated color temperature. *Optics Express, 24*, 14066–14078. https://doi.org/10.1364/OE.24.014066
3. Fechan, A., Khoverko, Y., Shymchyshyn, O., Dzhumelia, E., & Daliavskyi, V. (2026). Passive sensors for non-contact monitoring ecosystems based on optically active environment. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 37*(1), Article 63. https://doi.org/10.1007/s10854-025-16468-2
4. Fechan, A. V., Khoverko, Y. M., Dzhumelia, E. A., & Daliavskyi, V. S. (2025). Monitoring dovkillia pasyvnym sensorom tysku temperatury na osnovi optychno-aktyvnykh seredovyshch [Environmental monitoring using a passive pressure-temperature sensor based on optically active media]. *Infocommunication Technologies and Electronic Engineering, 5*(1), 154–161. https://doi.org/10.23939/ictee2025.01.154
5. Druzhinin, A., Maryamova, I., Kogut, I., & Khoverko, Y. (2011). Polysilicon on insulator structures for sensor application at electron irradiation and magnetic fields. *Advanced Materials Research, 276*, 109–116. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.276.109

Maryna Zhadan
2nd-year student,
Oleksandr Kuzyk
Assistant,
Lviv Polytechnic National University

DATA PROTECTION OF UKRAINE'S ENERGY INFRASTRUCTURE IN THE CONTEXT OF SMART METER INTEGRATION AND WIRELESS DATA TRANSMISSION PROTOCOLS

Abstract. *This study addresses Advanced Metering Infrastructure (AMI) cybersecurity challenges in Ukraine's energy sector amid war and EU integration. It identifies severe vulnerabilities, notably commercial metering and SCADA fragmentation, alongside reliance on unencrypted legacy protocols like Modbus. To mitigate risks cost-effectively, the study proposes deploying TLS gateways (IEC 62351), ensuring communication redundancy, and adopting a hybrid cloud model. Immediate regulatory compliance with the EU Cyber Resilience Act is recommended, with IEC 61850 migration as a long-term goal. Ultimately, securing AMI ensures operational sovereignty and EU market integration.*

Keywords: *Advanced Metering Infrastructure (AMI), cybersecurity, energy infrastructure, data protection, wireless transmission protocols, cloud computing.*

Relevance. The digitalisation of Ukraine's energy sector constitutes a strategic priority within the framework of European integration and the fulfilment of obligations under the EU–Ukraine Association Agreement [1]. The widespread deployment of Advanced Metering Infrastructure (AMI) substantially expands the cyber-attack surface of critical infrastructure. Following Ukraine's synchronisation with ENTSO-E in 2024, requirements for digital resilience have acquired an explicit regulatory dimension. The ongoing war further intensifies these challenges, as damage to communication infrastructure directly impairs the operation of metering and control systems.

System Architecture and Risk Analysis. A typical energy data transmission system comprises a three-tier architecture: smart meter, Data Concentrator Unit (DCU), and central database or SCADA system. A critical systemic issue is architectural fragmentation: commercial metering based on the DLMS/COSEM protocol [2], mandated by the NEURC Commercial Metering Code [3], and operational monitoring via SCADA operate as parallel, poorly integrated subsystems, and the absence of network segmentation between them creates an attack vector from a field device to substation control systems. The principal vulnerabilities include the absence of end-to-end encryption in the majority of deployed systems, dependency on mobile network infrastructure susceptible to disruption in war conditions, and the inability to remotely update legacy field devices. Metering data constitutes strategically sensitive information: load profiles disclose network topology, while anomalies in meter readings may indicate cyberattacks or physical infrastructure damage.

Comparative Protocol Analysis. At the field level (meter to concentrator), Modbus RTU/TCP and its industry adaptation SunSpec Modbus represent the de facto standard for the majority of deployed meters and inverters. Despite their prevalence, these protocols lack built-in authentication and encryption, constituting a critical non-compliance with EU requirements. IEC 61850 provides comprehensive protection aligned with ENTSO-E requirements but remains limited in Ukraine due to cost and a shortage of qualified personnel, whereas DLMS/COSEM (DSTU EN 62056), mandatory for new meters under the NEURC Code, incorporates cryptographic mechanisms and offers a viable foundation for system unification. At the backhaul level (concentrator to database),

GPRS/4G remains prevalent despite its dependency on commercial mobile infrastructure; NB-IoT and LoRaWAN constitute prospective alternatives with stronger native security support.

Recommendations. To address the identified vulnerabilities, a multi-layered strategy is proposed, encompassing immediate technical upgrades, regulatory shifts, and long-term architectural evolution. The most immediately feasible measures concern communication security at the data transport layer. Deployment of TLS gateways as an overlay security solution, implemented in accordance with IEC 62351 [4], enables encryption and mutual authentication without requiring replacement of end devices. This should be complemented by communication channel redundancy: combining a primary channel (4G/NB-IoT) with a backup channel (LoRaWAN or satellite communication) eliminates single points of failure, which is particularly pertinent given the vulnerability of terrestrial infrastructure in war conditions. Both measures are economically justified for mid-to-large-scale facilities and, given that neither requires replacement of existing hardware, are among the most rapidly deployable options available. Parallel to these technical measures, it is recommended that compliance with the EU Cyber Resilience Act [5] be incorporated as a mandatory evaluation criterion in public procurement procedures for metering system equipment. Regarding cloud technologies, a hybrid model is recommended: real-time operational systems (SCADA, EMS) are retained on locally hosted, hardened servers, while non-critical data, such as analytics, load forecasting, and archives exceeding ninety days, may be hosted in a private cloud under national jurisdiction, combining the advantages of scalability and automated backup with data sovereignty requirements, in alignment with the Gaia-X and SecNumCloud frameworks.

Conclusions. Data protection for energy infrastructure requires a calibrated, phased approach aligned with Ukraine's institutional capacity. Priority should be given to cost-effective measures: overlay encryption, channel redundancy, and procurement-driven regulation via the EU Cyber Resilience Act. Ultimately, securing metering and communication infrastructure is not merely a technical requirement, but a structural precondition for Ukraine's full integration into the European energy market and for maintaining operational sovereignty over critical national assets.

References

1. European Union & Ukraine. (2014). *Association Agreement between the European Union and its Member States, of the one part, and Ukraine, of the other part*. Official Journal of the European Union, . https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A22014A0529%2801%29

2. State Enterprise Ukrainian Agency for Standardization, Metrology and Certification. (2022). *Obmin danymy vymiriuvannia elektroenerhii. Komplekt DLMS/COSEM. Chastyna 5-3. Prykladnyi riven DLMS/COSEM*[Electricity metering data exchange. The DLMS/COSEM suite. Part 5-3. DLMS/COSEM application layer] (DSTU EN 62056-5-3:2022).

3. National Energy and Utilities Regulatory Commission. (2018). *Pro zatverdzhennia Kodeksu komertsiinoho obliku elektrychnoi enerhii* [On approval of the Commercial metering code of electrical energy] (Resolution No. 311, March 14, 2018). Verkhovna Rada of Ukraine. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18

4. International Electrotechnical Commission. (2023). *Power systems management and associated information exchange - Data and communications security - Part 3: Communication network and system security - Profiles including TCP/IP* (IEC Standard No. 62351-3:2023).

5. European Parliament & Council of the European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/2847 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2024 on horizontal cybersecurity requirements for products with digital elements and amending Regulations (EU) No 168/2013 and (EU) No 2019/1020 and Directive (EU) 2020/1828 (Cyber Resilience Act)*. Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/2847/oj

Роман Зайвий
аспірант,
Володимир Павлиш
к.т.н., професор
Національний університет «Львівська політехніка»

МЕТОД АДАПТИВНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МЕРЕЖІ FANET НА ОСНОВІ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ

Анотація: *розглянуто задачу адаптивного вибору дрона-ретранслятора у FANET в умовах високої мобільності, нестабільних радіоканалів і обмежених енергоресурсів. Запропоновано нейро-нечіткий підхід, що оцінює кандидатів за SoC, LQE та RPI і формує індекс придатності ретранслятора RSI. Результати 3D-симуляції у середовищі 1000x1000x1000 м3 підтвердили підвищення PDR до 99%, зменшення затримки на 26% та економію енергії до 25-30%.*

Ключові слова: *FANET, БПЛА, дрон-ретранслятор, ANFIS, 3D-симуляція, маршрутизація.*

Вступ

Літаючі самоорганізовані мережі FANET є перспективним класом бездротових систем, у яких група БПЛА функціонує як сукупність мобільних вузлів зв'язку. На відміну від централізованої архітектури UAV-to-Infrastructure, FANET використовує децентралізовані зв'язки UAV-to-UAV, що підвищує відмовостійкість і дозволяє підтримувати комунікацію навіть при втраті окремих вузлів [1-3]. Водночас така мережа характеризується швидкою зміною топології, переривчастістю каналів, обмеженим зарядом акумуляторів та залежністю якості сигналу від руху БПЛА у тривимірному просторі.

Критичним рішенням у FANET є вибір наступного вузла маршруту - дрона-ретранслятора. Класичні протоколи AODV та OLSR часто реагують на розрив каналу вже після його виникнення, що збільшує затримки та знижує коефіцієнт доставки пакетів. Тому актуальним є проактивний підхід, який оцінює не лише поточну якість каналу, а й перспективну стійкість маршруту.

Метод вибору ретранслятора

Мережу FANET подано як динамічний граф G(t) = (V, E(t)), де V - множина БПЛА, а E(t) - активні канали зв'язку. Поточний вузол локально обирає найкращого сусіда з таблиці N-сусідів [4]. Таблиця N-сусідів формується на основі періодичних Hello-пакетів, у яких БПЛА передають ідентифікатор, координати, швидкість, напрямок руху та рівень заряду SoC. Під час прийому такого повідомлення поточний вузол оновлює запис про сусіда та вимірює параметри якості каналу: RSSI, SINR і LQI. Якщо повідомлення не надходить упродовж заданого інтервалу або параметри каналу погіршуються, сусід вилучається з таблиці або позначається як нестабільний.

Кандидати фільтруються за порогами: SoC < 20%, LQI < 80% або RSSI < -90 dBm. Такі вузли виключаються з розгляду як енергетично або комунікаційно нестабільні.

Для ранжування кандидатів використано три інтегральні показники: SoC - залишковий заряд батареї; LQE - оцінка якості каналу на основі RSSI, SINR та LQI; RPI - індекс перспективності маршруту, що враховує фактор напрямку DF, відносну мобільність MF і завантаженість буфера BF. Узагальнено: LQE = wr*RSSIn + ws*SINRn + wl*LQIn, а RPI = w1*DF + w2*MF - w3*BF.

На вхід нейро-нечіткої системи ANFIS подаються SoC, LQE та RPI, а на виході формується індекс придатності ретранслятора RSI = f(SoC, LQE, RPI). Обирається вузол із максимальним RSI. Такий підхід зменшує розмірність задачі, скорочує базу правил і дає змогу приймати рішення в реальному часі на борту БПЛА.

3D-симуляція та результати

Ефективність методу перевірено у 3D-середовищі 1000x1000x1000 м3 з використанням AirSim, Gazebo та Unreal Engine 4. Симуляція враховувала фізику польоту БПЛА з шістьма ступенями свободи (6-DOF), кількість вузлів від 20 до 50, базовий сценарій із 40 БПЛА, швидкість до 460 км/год та контролер уникнення зіткнень 3DVFH+ з частотою 100 Гц. Для підвищення масштабованості використано ієрархічну структуру Cluster Heads (CH), яка локалізує службовий трафік усередині кластерів.

Таблиця 1 Порівняльна оцінка протоколів маршрутизації

Показник	AODV/OLSR	RL/Q-Learning	ANFIS/RSI
PDR	81-85%	90-96%	до 99%
Затримка	висока	середня	-26%
Енергія	висока	середня	-25-30%
Масштабованість	низька	обмежена	висока, CH

Результати показали, що ANFIS-підхід забезпечує найвищий PDR - до 99%, зменшує середню затримку на 26% і знижує енергоспоживання на 25-30%. Ієрархія CH додатково скорочує службові накладні витрати приблизно на 14%, що особливо важливо при збільшенні рою до 40-50 БПЛА. На відміну від методів глибокого підкріплюваного навчання [5], запропонований алгоритм не потребує великого простору станів і дій, оскільки працює з трьома агрегованими показниками.

Висновки

Запропоновано скорочений варіант методу динамічного вибору дрона-ретранслятора у FANET на основі нейро-нечіткої системи. Використання SoC, LQE та RPI дозволяє поєднати оцінювання енергії, якості каналу та перспективності маршруту, а індекс RSI забезпечує уніфіковане ранжування кандидатів. 3D-симуляція підтвердила ефективність підходу для високодинамічного середовища: PDR до 99%, затримка -26%, економія енергії 25-30% і зниження службового трафіку на 14%. Метод є придатним для пошуково-рятувальних, моніторингових та інфраструктурних місій, де потрібні автономність, швидка адаптація та надійна передача даних.

Список використаних джерел

1. Hasan S.A., Mohammed M.A., Sulaiman S.K. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): Review of Communications, Challenges, Applications, Future direction and Open Research Topics. ITM Web of Conferences. 2024. Vol. 64. 01002.

2. Wheeb A.H. et al. Topology-Based Routing Protocols and Mobility Models for Flying Ad Hoc Networks. Drones. 2022. Vol. 6(1). 9.

3. Chen G., Chen G. A Method of Relay Node Selection for UAV Cluster Networks Based on Distance and Energy Constraints. Sustainability. 2022. Vol. 14(23). 16089.

4. Pavlysh V., Romanyshyn Yu., Zaivyi R. Dynamic and adaptive selection of a drone repeater in a FANET network based on a neuro-fuzzy system. Information and Communication Technologies, Electronic Engineering. 2026. Vol. 6, No. 1. P. 101–117. DOI: 10.23939/ictee2026.01.101.

5. Lansky J. et al. Reinforcement Learning-Based Routing Protocols in Flying Ad Hoc Networks (FANET): A Review. Mathematics. 2022. Vol. 10(16). 3017.

Zaur Zakaryayev
Deputy Head of the Department of Electronics and Telecommunications,
Chingiz Gayıbov
Senior lecturer
Military Institute named after Heydar Aliyev

FUNDAMENTALS OF RADIO ENGINEERING AND MODULATION TECHNIQUES

Abstract: *This article explores fundamental concepts of radio engineering and key modulation techniques used in modern communication systems. It discusses signal transmission, bandwidth, and noise, along with analog and digital modulation methods, highlighting their importance in ensuring efficient, reliable, and high-quality wireless communication.*

Keywords: *radio engineering, modulation, signal transmission, communication systems.*

Introduction.

Radio engineering is a fundamental field within telecommunications that focuses on the transmission and reception of electromagnetic signals. It plays a crucial role in enabling wireless communication systems, including radio broadcasting, television, mobile networks, and satellite communication. A central concept in radio engineering is modulation, which allows information signals to be effectively transmitted over long distances by modifying a carrier wave [1].

Basic Concepts of Radio Engineering.

Radio engineering deals with the transmission and reception of information using radio frequency (RF) signals, which are electromagnetic waves capable of traveling through free space. These signals operate at different frequencies, measured in Hertz (Hz), and are selected based on application requirements. Lower frequencies can cover longer distances, while higher frequencies allow higher data rates but are more sensitive to obstacles and attenuation.

An important concept is bandwidth, which defines the range of frequencies a signal occupies. A wider bandwidth enables more information to be transmitted, but it must be used efficiently due to limited spectrum availability. Another key factor is noise, which can distort signals and reduce communication quality. The signal-to-noise ratio (SNR) is used to evaluate how clearly a signal can be received [2].

A typical radio system includes a transmitter, communication channel, and receiver. The transmitter generates and modulates the signal, the channel carries it through space, and the receiver captures and processes it to recover the original information. Antennas are essential components that convert electrical signals into electromagnetic waves and back.

Additionally, radio wave propagation is affected by environmental factors such as terrain and obstacles, leading to effects like reflection and interference. Understanding these basic principles is crucial for designing reliable and efficient communication systems [3].

Concept of Modulation

Modulation is the process of varying one or more properties of a high-frequency carrier signal in accordance with a low-frequency information signal. This process is necessary because low-frequency signals cannot be efficiently transmitted over long distances without significant loss or distortion.

There are three primary parameters of a carrier signal that can be modified:

- Amplitude
- Frequency
- Phase

Based on these parameters, different modulation techniques are developed.

Amplitude Modulation (AM). In amplitude modulation, the amplitude of the carrier signal is varied in proportion to the message signal, while frequency and phase remain constant. AM is widely used in radio broadcasting but is susceptible to noise and interference.

Frequency Modulation (FM). Frequency modulation involves varying the frequency of the carrier signal according to the information signal. FM provides better noise immunity and higher sound quality compared to AM, making it suitable for music broadcasting.

Phase Modulation (PM). In phase modulation, the phase of the carrier signal is altered based on the input signal. PM is closely related to FM and is commonly used in digital communication systems [4].

Applications of Modulation in Modern Systems.

Modulation techniques are widely used in various communication systems, including:

- ✓ Mobile communication networks (4G, 5G),
- ✓ Satellite communication,
- ✓ Wi-Fi and wireless networks,
- ✓ Television and radio broadcasting.

These applications rely on advanced modulation schemes to ensure reliable and high-speed data transmission [5].

Conclusion

Radio engineering and modulation form the core of modern communication systems. By enabling efficient transmission of information over long distances, they support a wide range of applications, from broadcasting to advanced wireless networks. Understanding basic modulation techniques helps improve signal quality, reduce interference, and optimize bandwidth usage.

Moreover, both analog and digital modulation methods play an important role in meeting different communication needs. While analog techniques remain relevant in certain applications, digital modulation provides higher efficiency and reliability in modern systems. As technology continues to advance, the development of more sophisticated modulation techniques will be essential to support increasing data demands, faster communication speeds, and improved overall system performance.

References:

1. Haykin, S. (2021). *Communication Systems* (6th ed.). Wiley, pp. 45–78.
2. Proakis, J. G., & Salehi, M. (2020). *Digital Communications* (6th ed.). McGraw-Hill, pp. 102–140.
3. Sklar, B. (2019). *Digital Communications: Fundamentals and Applications* (3rd ed.). Pearson, pp. 210–250.
4. Couch, L. W. (2022). *Digital and Analog Communication Systems* (9th ed.). Pearson, pp. 60–95.
5. Lathi, B. P., & Ding, Z. (2019). *Modern Digital and Analog Communication Systems* (5th ed.). Oxford University Press, pp. 85–120.
6. Goldsmith, A. (2020). *Wireless Communications*. Cambridge University Press, pp. 130–170.

Illia Kucheruk
Bachelor student
Oleksandr Kuzyk
Assistant
Lviv Polytechnic National University

AUTOMATION OF CYBER THREAT RESPONSE IN AWS FOR THE PROTECTION OF ENERGY MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL MONITORING IOT SYSTEMS OF ENTERPRISES

Abstract. *Industrial digitalization introduces IoT systems for energy management and environmental monitoring, which face critical cyber risks. This study proposes an event-driven, automated threat response architecture in AWS using Amazon GuardDuty, Amazon EventBridge, and AWS Lambda. Grounded in a serverless approach and the AWS Well-Architected Framework's sustainability pillar, the model detects anomalies (e.g., data spoofing or credential compromise) and executes instant remediation actions without continuous manual oversight. Results demonstrate that the architecture drastically minimizes incident dwell time, mitigates human error, and protects the integrity of critical telemetry data (such as CO2 and energy metrics). Ultimately, this safeguards both operational continuity and enterprise energy efficiency.*

Keywords: *AWS security, IoT defense, automated incident response, energy management, serverless architecture.*

Today, industrial enterprises are increasingly implementing digital systems for energy management, environmental monitoring, and production process control. One of the practical directions of such digitalization is the use of Internet of Things (IoT) devices, including CO2, temperature, humidity, energy consumption sensors, and operating parameters of ventilation or production systems. Such devices can transmit data to cloud infrastructure for further analysis, visualization, and management decision-making. At the same time, cloud workloads must be designed taking into account the principles of sustainability and efficient resource utilization, as reflected in the AWS Well-Architected Framework, where sustainability is defined as one of the key architectural pillars [1].

The security of such systems is directly linked to the enterprise's energy efficiency. If an attacker gains access to IoT devices or the cloud data processing environment, they can alter sensor readings, generate anomalous requests to cloud services, or disrupt the operation of the monitoring system. AWS IoT Device Defender enables the detection of anomalous behavior of IoT devices, including changes in connection patterns, data transmission to unexpected endpoints, or changes in inbound and outbound traffic [2]. In addition, services like AWS IoT SiteWise are used to collect, organize, and monitor industrial data from equipment, which confirms the relevance of protecting the cloud IoT infrastructure of enterprises [3].

To reduce the response time to such events, it is advisable to use an event-driven architecture in AWS. Amazon GuardDuty generates security findings that contain information about potential threats, involved resources, event time, and other data necessary for incident analysis [4]. Such findings can be transferred to Amazon EventBridge, which subsequently triggers target services, including AWS Lambda [5]. As a result, an automated response model is formed: Amazon GuardDuty -> Amazon EventBridge -> AWS Lambda -> response action. The Lambda function can send notifications to the administrator, log the incident, launch additional verification, restrict suspicious requests, or isolate the compromised system component.

The methodology analyzed scenarios where industrial IoT devices, including CO2 sensors and energy management elements, transmit data to AWS. Risks such as data integrity violations, anomalous requests, and component compromise were considered. An event-driven model was proposed: GuardDuty detects suspicious activity, EventBridge routes it, and Lambda executes automatic responses. This architectural model for automated threat response in energy management and environmental monitoring enables continuous security control, detecting atypical requests, connection changes, or compromised credentials [2, 4].

The proposed model has both security and energy-saving significance. On the one hand, automatic response reduces the time between incident detection and the launch of response mechanisms. On the other hand, protecting the integrity of data from IoT sensors allows maintaining the correct operation of ventilation, energy consumption, and environmental monitoring systems. This is especially important for industrial enterprises, where incorrect CO2 indicators or energy consumption parameters can cause erroneous management decisions and overconsumption of electricity. Practical implementation of such a model may involve creating an EventBridge rule that responds to security findings of a certain type or severity level. After receiving the event, the Lambda function can perform one or more actions: send a message to the responsible person, record the incident in the log, launch an additional device check, temporarily restrict suspicious access, or initiate the isolation of the compromised component [5–7]. This approach allows maintaining the continuity of energy saving and environmental monitoring systems without the need for constant manual control.

The use of the combination of Amazon GuardDuty, Amazon EventBridge, and AWS Lambda allows reducing the response time to suspicious activity, reducing the impact of the human factor, and ensuring the rapid execution of protective actions. In the context of energy saving and sustainable development, such a model is appropriate because it helps to preserve the integrity of data based on which decisions regarding ventilation, electricity consumption, and CO2 emissions control are made. The proposed approach can be used as a component of protecting the cloud IoT infrastructure of enterprises implementing digital systems of energy management and environmental monitoring.

References

1. Amazon Web Services. Sustainability Pillar - AWS Well-Architected Framework URL: https://docs.aws.amazon.com/wellarchitected/latest/sustainability-pi/sustainability-pillar.html
2. Amazon Web Services. AWS IoT Device Defender Developer Guide Detect URL: https://docs.aws.amazon.com/iot-device-defender/latest/devguide/device-defender-detect.html
3. Amazon Web Services. AWS IoT SiteWise – Edge and Cloud processing for industrial data URL: https://docs.aws.amazon.com/wiot-sitewise-edge-and-cloud-processing-for-industrial-data.html
4. Amazon Web Services. GuardDuty finding format URL: https://docs.aws.amazon.com/latest/ug/guardduty_finding-format.html
5. Amazon Web Services. Processing GuardDuty findings with Amazon EventBridge URL: https://docs.aws.amazon.com/guardduty/latest/ug/guardduty_findings_eventbridge.html
6. Amazon Web Services. Using EventBridge for automated response and remediation URL:https://docs.aws.amazon.com//latest/userguide/securityhub-cloudwatch-events.html
7. Amazon Web Services. What is AWS Lambda?
8. Amazon Web Services. How to get started with security response automation on AWS URL:https://aws.amazon.com/blrity/how-get-started-security-response-automation-aws/

Yurii Kachurak
PhD, Associate Professor,
Serhii Melnykov
PhD, Associate Professor,
Lviv Polytechnic National University

PROACTIVE MANAGEMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND THE CONDITION OF POWER TRANSMISSION LINES USING IOT TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Abstract. *This work discusses the transition to the Smart Grid 2.0 concept, which introduces a new level of interaction through "prosumers" and emphasizes system flexibility and self-healing capabilities. To implement comprehensive intelligent monitoring, a three-layer IoT architecture (perception, network, and application) is proposed, utilizing wireless sensor network (WSN) nodes. This system enables real-time supervision of both electrical parameters, such as voltage, current, and harmonics, and the physical condition of power lines, including temperature, mechanical sagging, and fire-hazard detection. To address the challenges of Big Data, the research suggests a shift from centralized processing to edge and fog computing paradigms. By integrating artificial intelligence (AI) and machine learning (ML), the proposed system can autonomously detect anomalies and predict equipment failures with up to 90% accuracy, facilitating a strategic transition toward proactive energy system management.*

Keywords: *Smart Grid 2.0, IoT, Artificial Intelligence, Proactive Management, Machine Learning, Edge Computing, Power Line Monitoring.*

Modern energy systems face significant challenges due to aging infrastructure and the continuous growth in global electricity demand, which leads to overloads and deterioration in power quality [1]. Traditional management approaches, based on periodic manual inspections and reactive maintenance (i.e., after faults occur), are becoming increasingly inefficient and costly to operate [2]. Deviations of voltage, current, and frequency parameters from standard values not only reduce the service life of equipment but also result in substantial financial losses for both suppliers and consumers.

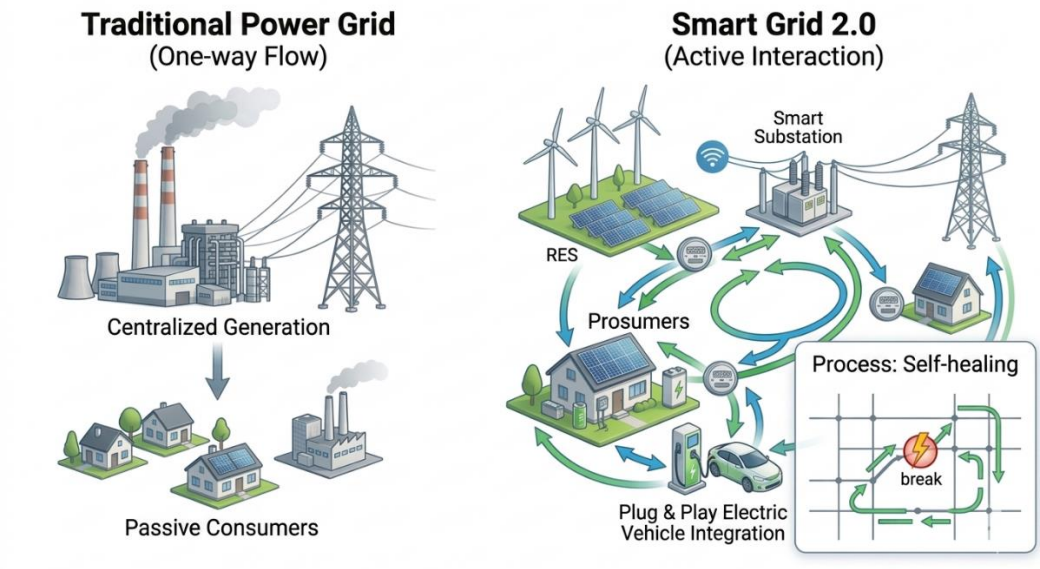


Figure 1 – Demonstration of the transition from the legacy single-tier model to a two-tier interaction, featuring the emergence of active participants capable of generating electricity.

The Smart Grid 2.0 concept, whose implementation began around 2020, introduces a new level of interaction between energy producers and consumers [3]. The key distinguishing feature of this generation of grids is the emergence of "prosumers"- active participants who can not only consume but also feed energy back into the grid based on a "plug-and-play" principle. Such systems are designed for high flexibility and self-healing capability, relying on real-time data acquisition and processing to automatically detect and mitigate fault conditions.

For the implementation of comprehensive intelligent monitoring, the deployment of an IoT sensor network based on a three-layer architecture - perception, network, and application - is proposed. The system is built upon wireless sensor network (WSN) nodes based on low-cost microcontrollers, enabling the integration of a wide range of measurement devices.

These nodes perform not only the monitoring of electrical signal parameters (voltage, current, active power, and harmonics), but also continuous supervision of the physical condition of power transmission lines. In particular, the use of temperature sensors allows tracking of critical overheating in conductors and contact connections. To prevent failures, the system is equipped with flame and smoke sensors (e.g., MQ-2), enabling the immediate detection of insulation degradation and fire-hazard conditions. Furthermore, the integration of accelerometers and strain sensors enables monitoring of the mechanical state of the lines, including sagging and vibration.

Data from these devices are transmitted via reliable gateways (Wi-Fi, GSM/GPRS, or ZigBee) to cloud platforms such as ThingSpeak, providing operators with remote real-time access to system statistics, network state visualization, and immediate notification of any anomalies.

Nowadays, traditional centralized data processing on local personal computers is no longer the most efficient approach due to the enormous volume of Big Data generated by billions of smart devices. In addition, the limited memory of standard controllers often does not allow the execution of complex computations, such as simultaneous analysis of three-phase harmonics, directly at the edge.

The use of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML), in combination with edge/fog computing paradigms, enables systems to autonomously detect anomalies, predict equipment failures with up to 90% accuracy, and transition from reactive to proactive energy system management.

Acknowledgment

This work was supported by a state budget-funded research project 0126U001693 "Multisensor monitoring technology for critical infrastructure parameters to prevent emergencies based on machine learning models ".

References:

1. Jaradat, M., Jarrah, M., Bousselham, A., Jararweh, Y., & Al-Ayyoub, M. (2015). The internet of energy: smart sensor networks and big data management for smart grid. *Procedia computer science*, *56*, 592-597.

Anastasiia Khimchyk
Bachelor student
Oleksandr Kuzyk
Assistant
Lviv Polytechnic National University

A RESPONSE MODEL TO AWS SERVICE AVAILABILITY VIOLATIONS IN ENERGY MONITORING SYSTEMS CONSIDERING SLA AND CYBERSECURITY RISKS

Abstract. *Industrial energy monitoring systems increasingly rely on AWS infrastructure to process IoT telemetry (CO2, temperature, power consumption), making cloud availability a crucial factor for both information security and energy efficiency. Service degradation or cloud outages can distort data analysis, resulting in automated equipment mismanagement and substantial electricity waste. This study proposes a structured incident response model for AWS availability violations that bridges technical monitoring and financial remediation. By leveraging Amazon CloudWatch, AWS CloudTrail, and the AWS Health Dashboard, the framework enables real-time incident detection, root-cause classification, and automated evidence compilation to verify Service Level Agreement (SLA) breaches and claim Service Credits. Implementing this model minimizes operational downtime, prevents energy overconsumption, and strengthens the overall cyber resilience of digitalized industrial enterprises.*

Keywords: *AWS availability, Service Level Agreement (SLA), IoT energy monitoring, incident response model, cloud cybersecurity risks.*

Under modern conditions of industrial enterprise digitalization, the issue of energy conservation is increasingly addressed through cloud technologies, energy management systems, and Internet of Things (IoT) devices. In particular, IoT sensors for CO2, temperature, humidity, and electricity consumption are used to monitor production processes, control harmful emissions, optimize the operation of ventilation, and reduce non-productive energy costs. A significant portion of such data is transmitted to cloud platforms, notably Amazon Web Services (AWS), where its storage, processing, analysis, and visualization are carried out [1].

At the same time, the dependence of energy monitoring systems on cloud infrastructure creates cybersecurity risks. Violations of AWS service availability, delays in data transmission, or incorrect configuration of resources can lead to the loss of up-to-date information on energy consumption and CO2 emissions. As a result, the enterprise may make erroneous decisions regarding the operating modes of ventilation, production equipment, or energy management systems, which causes electricity overconsumption. Since availability is one of the core components of information security, it is advisable to consider such violations not only as technical failures but also as cybersecurity incidents [2, 3].

The Service Level Agreement (SLA) defines the guaranteed level of quality and availability of a cloud service, as well as the response conditions in case of failure to meet the stated indicators [4]. In the context of AWS, such agreements may provide for compensation in the form of Service Credits [5]. However, the SLA does not inherently provide automated incident detection, documentation, or claim submission for compensation. That is why the development of a response model to AWS service availability violations in energy monitoring systems—which combines technical monitoring, cybersecurity classification of incidents, analysis of SLA terms, and the formation of an evidentiary base—is highly relevant [6, 7].

To develop the response model to AWS service availability violations, the official documentation of Amazon Web Services regarding SLAs, Service Credits, the shared responsibility model, availability of cloud systems, and monitoring tools was analyzed [1-7]. As an example, an energy monitoring system of an industrial enterprise was considered, in which IoT sensors transmit data to the AWS cloud infrastructure. The work uses the method of technical documentation analysis, synthesis of approaches to ensuring the availability of cloud services, and modeling of the incident response process.

As a result of the analysis, a response model to AWS service availability violations in energy monitoring systems was formed. The proposed model includes the following stages: monitoring the availability of cloud services, detecting the incident, analyzing logs and metrics, classifying the cause of the violation, assessing the impact on energy saving processes, verifying compliance with SLA conditions, and forming an evidentiary base for submitting a claim for Service Credits.

It has been established that a violation of AWS service availability can have technical, cybersecurity, and energy consequences. Delay or loss of data from IoT sensors for CO2, temperature, or electricity consumption can lead to incorrect operation of ventilation systems, erroneous analysis of energy consumption, and an increase in non-productive electricity costs. Therefore, such incidents simultaneously affect the availability of the information system, the cyber resilience of the enterprise, and the efficiency of energy saving.

For the practical application of the model, it is proposed to use Amazon CloudWatch for monitoring metrics, AWS CloudTrail for analyzing user actions and possible configuration errors, and AWS Health Dashboard for checking events related to the operation of AWS services [6, 7]. The combination of these tools allows for faster detection of availability violations and the formation of an evidentiary base for verifying SLA conditions and receiving Service Credits.

Ensuring the availability of AWS services in energy monitoring systems is an important condition for the stable operation of an enterprise and efficient energy saving, since the loss or delay of data from IoT sensors can lead to erroneous analysis of energy consumption, incorrect operation of equipment, and non-productive electricity costs. The proposed response model combines availability monitoring, log and metric analysis, incident classification, verification of SLA conditions, and the formation of an evidentiary base for receiving Service Credits, which allows for increasing the cyber resilience of energy monitoring systems and responding more effectively to cloud service disruptions.

References

1. Amazon Web Services. AWS IoT Core Documentation. URL: https://docs.aws.amazon.com/iot/
2. Amazon Web Services. AWS Well-Architected Framework: Reliability Pillar – Availability. URL: https://docs.aws.amazon.com/wellarchitected/latest/reliability-pillar/availability.html
3. Amazon Web Services. Shared Responsibility Model. URL: https://aws.amazon.com/compliance/shared-responsibility-model/
4. Amazon Web Services. What is SLA (Service Level Agreement)? URL: https://aws.amazon.com/what-is/service-level-agreement/
5. Amazon Web Services. AWS Service Level Agreements (SLAs). URL: https://aws.amazon.com/legal/service-level-agreements/
6. Amazon Web Services. Amazon CloudWatch Documentation. URL: https://docs.aws.amazon.com/cloudwatch/
7. Amazon Web Services. AWS CloudTrail Documentation. URL: https://docs.aws.amazon.com/awscloudtrail/

Юрій Козічук
здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня,
Тетяна Булавінець
д. філ., доцент
Національний університет «Львівська політехніка»

АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ РІШЕННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ МОДУЛЬНИХ ІОТ-ПЛАТФОРМ РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ

Анотація. *Описано концепцію побудови модульної гетерогенної IoT-платформи радіаційного моніторингу. Обґрунтовано необхідність розподілу завдань між детермінованим сенсорним співпроцесором (STM32) та мережевим шлюзом (ESP32) для усунення втрат стохастичних даних під час мережевих навантажень. Розглянуто застосування промислового інтерфейсу RS-485, стандарту IEEE 1451 для реалізації концепції Plug-and-Play, протоколів самоорганізації децентралізованих Mesh-мереж, а також серверної просторової аналітики на базі ISO 11929.*

Ключові слова: *радіаційний моніторинг, Інтернет речей (IoT), гетерогенна архітектура, мікроконтролери STM32 та ESP32, стандарт IEEE 1451, LoRa, Mesh.*

Сучасна парадигма екологічної безпеки та радіаційного захисту дедалі більше вимагає переходу від використання ізольованих дозиметричних приладів до створення комплексних, просторово розподілених кіберфізичних систем. Такий підхід зумовлений необхідністю оперативного виявлення локальних аномалій радіаційного фону, підвищення просторової роздільної здатності вимірювань, а також забезпечення безперервного збору, передавання та аналізу даних у режимі реального часу. Особливої актуальності це набуває для територій, що зазнали техногенного впливу, районів розміщення об’єктів ядерної енергетики, промислових підприємств, сховищ радіоактивних відходів, а також для задач цивільного захисту в умовах потенційних радіаційних інцидентів. Впровадження концепції Інтернету речей (IoT) відкриває можливість інтеграції великої кількості сенсорних вузлів у єдину інформаційно-вимірювальну екосистему. У межах такої екосистеми окремі детектори можуть функціонувати як елементи розподіленої мережі, забезпечуючи автоматизоване накопичення телеметричних даних, їхню попередню обробку, передачу до хмарної або локальної серверної інфраструктури та подальшу візуалізацію у вигляді динамічних карт радіаційного забруднення. На відміну від традиційних підходів, що ґрунтуються на періодичних ручних вимірюваннях або роботі ізольованих дозиметрів, IoT-орієнтована архітектура дозволяє формувати актуальну картину радіаційної обстановки з високою часовою деталізацією та мінімізувати затримки між моментом реєстрації події та її відображенням у системі моніторингу. Разом із тим розроблення таких систем супроводжується низкою специфічних апаратно-програмних викликів.

Фундаментальна проблема полягає у тому, що радіоактивний розпад є стохастичним процесом, який підпорядковується статистиці Пуассона [1]. Класичні одноядерні мікроконтролери не здатні одночасно забезпечувати жорсткий детермінізм для підрахунку імпульсів та підтримувати складні стеки мережевих протоколів. Обслуговування мережевих завдань (TCP/IP або TLS) призводить до блокування переривань, що створює масивний програмний "мертвий час" і катастрофічну втрату інформації про радіаційний фон.

Для подолання цих бар'єрів запропоновано гетерогенну двомодульну архітектуру. Сенсорний співпроцесор (на базі ARM Cortex-M сімейства STM32) повністю відокремлений

від мережевих завдань. Завдяки контролеру векторних переривань (NVIC), він забезпечує детерміновану реакцію на події [2] та здійснює цифрову корекцію апаратного мертвого часу. Відфільтровані дані передаються на мережевий шлюз (на базі ESP32). Використовуючи симетричну багатопроцесорну обробку під управлінням FreeRTOS [3] та апаратні криптографічні прискорювачі, ESP32 забезпечує наскрізне шифрування телеметрії (AES-256-GCM) без впливу на процес детектування випромінювання. Фізична надійність зв'язку між модулями забезпечується заміною вразливої шини I2C на диференційний промисловий інтерфейс RS-485. Для вирішення проблеми жорсткої конфігурації впроваджено стандарт IEEE 1451. Використання електронного паспорта перетворювача (TEDS), вбудованого у виносний зонд, дозволяє платформі автоматично розпізнавати тип детектора та завантажувати калібрувальні коефіцієнти (концепція Plug-and-Play) [4]. На рівні організації мережі архітектура передбачає відмову від централізованої топології "зірка" з її єдиною точкою відмови. Передача даних здійснюється через самоорганізовані комірчасті (Mesh) мережі. Для масштабування на великі території впроваджуються безшлюзові протоколи LoRa Mesh [5], що гарантують багатострибкову ретрансляцію даних в умовах зруйнованої інфраструктури. На серверному рівні достовірність зібраних масивів телеметрії перевіряється згідно зі стандартом ISO 11929 [6], який математично обґрунтовує пороги прийняття рішень щодо перевищення природного фону, дозволяючи системам геоінформаційної аналітики будувати високоточні ізолінійні моделі забруднення методом просторової інтерполяції (Кригінгу).

Таким чином, синергія гетерогенних обчислювальних ядер, промислових інтерфейсів, стандарту IEEE 1451 та топології Mesh формує відмовостійку базу для сучасних кіберфізичних систем радіаційного моніторингу.

Список використаних джерел

1. Knoll G. F. Radiation Detection and Measurement, 4th Edition. 2026. URL: https://www.scribd.com/document/904173100/Radiation-Detection-and-Measurement-4th-Edition-Knoll (дата звернення: 05.05.2026).
2. Yiu J. The Definitive Guide to the ARM Cortex-M0. 2026. URL: https://sciphilconf.berkeley.edu/default.aspx/mLC32A/605992/the_definitive_guide_to_the__arm-cortex_m0_by__joseph-yiu.pdf (дата звернення: 10.05.2026).
3. FreeRTOS User Guide. *Amazon Web Services*. 2026. URL: https://docs.aws.amazon.com/freertos/latest/userguide/freertos-ug.pdf (дата звернення: 02.05.2026).
4. The IEEE 1451.4 Standard for Smart Transducers. *IEEE Standards Association*. 2026. URL: https://standards.ieee.org/wp-content/uploads/import/documents/tutorials/1451d4.pdf (дата звернення: 08.05.2026).
5. Gateway-Free LoRa Mesh on ESP32: Design, Self-Healing Mechanisms, and Empirical Performance. *MDPI*. 2026. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/25/19/6036 (дата звернення: 10.05.2026).
6. ISO 11929-1: Determination of the characteristic limits for measurements of ionizing radiation. *International Organization for Standardization*. 2026. URL: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/69579/73c53d0aa041479e920b8123a7208fa4/ISO-11929-1-2019.pdf (дата звернення: 10.05.2026).

Володимир Коцун
к.т.н., доцент, директор
Львівська філія Приватного Вищого
Навчального Закладу "ЄВРОПЕЙСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ"
Орест Сушинський
д.т.н., доцент, зав. каф. комп'ютерних наук та програмної інженерії
Приватний Вищий Навчальний Заклад "ЄВРОПЕЙСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ"

ЗАСТОСУВАННЯ SALESFORCE EINSTEIN AI ТА ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ: ВІД SMART METER ДО SMART CITY

Анотація. *Стрімкий розвиток цифрових технологій відкриває нові можливості для досягнення цілей енергетичної політики ЄС. Директива про енергоефективність (Energy Efficiency Directive 2023/1791) [1] зобов'язує країни-члени скоротити кінцеве споживання енергії на 11,7% до 2030 року. Реалізація цього завдання потребує впровадження інтелектуальних систем управління, здатних опрацьовувати дані в реальному часі та генерувати обґрунтовані рішення. Платформа Salesforce Einstein AI у поєднанні з генеративним штучним інтелектом формує технологічну основу для управління енергоспоживанням – від розумного лічильника до масштабу розумного міста.*

Ключові слова: *Salesforce Einstein AI, генеративний штучний інтелект, предиктивне управління енергоспоживанням, Smart Meter, Smart City, IoT, Einstein Copilot, Energy Efficiency Directive, EU4Energy, цифрова трансформація енергетики.*

Сучасна енергетична система зіштовхується з трьома фундаментальними викликами. По-перше, фрагментованість даних: інформація про споживання енергії надходить із різнорідних джерел – Smart Meters, BMS, SCADA-систем, метеостанцій – без єдиного аналітичного центру обробки. По-друге, реактивність управління: більшість енергетичних компаній реагують на аварії та перевантаження постфактум. По-третє, пасивність споживача: кінцевий споживач не отримує персоналізованих рекомендацій щодо оптимізації споживання. Саме ці виклики адресує архітектура на базі Salesforce Einstein AI, яка перетворює розрізнені IoT-дані на інтелектуальні управлінські рішення.

Einstein Prediction Builder – це low-code інструмент машинного навчання платформи Salesforce, що дозволяє будувати предиктивні моделі без глибокої експертизи у Data Science [2]. У контексті управління енергоспоживанням він охоплює два ключові сценарії. Прогнозування аномального споживання реалізується через навчання моделі на історичних даних Smart Meters з урахуванням температури, часу доби та виробничого календаря. Модель виявляє відхилення від очікуваного профілю та автоматично генерує сповіщення оператору через Salesforce Flow. Точність моделей у пілотних впровадженнях у Нідерландах та Австрії сягає 87-93% при горизонті прогнозування 24-72 години [3].

Виявлення комерційних та технічних втрат здійснюється шляхом зіставлення даних про відпуск електроенергії з підстанції з агрегованими показаннями лічильників споживачів. Алгоритм класифікує втрати як технічні (фізика мережі) або комерційні (несанкціоноване підключення, несправність обліку), що дозволяє пріоритизувати інспекційні виїзди польових бригад.

Salesforce Einstein Copilot (генеративний AI-асистент на базі LLM) виконує дві ролі: для споживачів – генерує рекомендації щодо часу запуску приладів, зеленого тарифу та окупності

сонячних панелей; для операторів – формує звіти відповідно до вимог НКРЕКП та ENTSO-E і пропонує сценарії реагування на нештатні ситуації. Інтеграція з Salesforce Data Cloud забезпечує уніфікований доступ до IoT-потоків, CRM-записів, фінансових транзакцій та зовнішніх API.

Salesforce Experience Cloud забезпечує фронтенд Smart City Energy Dashboard із трирівневою архітектурою: збір даних – IoT-інтеграція (AWS IoT Core, Azure IoT Hub, MQTT) через MuleSoft з оновленням від 1 с до 15 хв; обробка – агрегація у Salesforce Data Cloud та обчислення KPI (питоме споживання, вуглецевий слід, частка ВДЕ, індекс енергетичної бідності) через Einstein Analytics; візуалізація – публічний дашборд, корпоративний портал та мобільний застосунок для інспекторів.

Амстердам (Amsterdam Smart City) інтегрував дані понад 800 000 розумних лічильників із міською платформою: предиктивна аналітика скоротила пікове навантаження на 14% та знизила комерційні втрати на €12 млн щорічно [3]. Відень (Smart City Wien Rahmenstrategie 2019-2050) завдяки хмарному моніторингу BMS-даних виявив потенціал енергозбереження у 23% муніципального фонду з розрахунковим скороченням споживання на 31% до 2030 року. Копенгаген, прагнучи до вуглецевої нейтральності, застосовує AI для оптимізації теплопостачання – предиктивні алгоритми прогнозують теплове навантаження з точністю 96% на горизонті 48 годин, знижуючи операційні витрати на €8 млн щорічно [4].

Модель реплікації для України у рамках програми EU4Energy передбачатиме три етапи: пілотне розгортання в обласному центрі (Львів, Вінниця або Полтава) з інтеграцією існуючих АСКОЕ-систем; масштабування на рівень регіону з підключенням підприємств ЖКГ; формування національної платформи енергетичного моніторингу, сумісної зі стандартами ENTSO-E, до якої Україна приєдналась у 2022 році.

Архітектура на базі Salesforce Einstein AI, Einstein Copilot та Experience Cloud формує масштабовану платформу для реалізації цілей EU Energy Efficiency Directive на рівні підприємств і міст. Ключовою перевагою є вертикальна інтеграція – від IoT-пристроїв через предиктивну аналітику до взаємодії зі споживачем засобами генеративного AI – у рамках єдиної хмарної екосистеми. Для України, що проходить шлях євроінтеграції та відновлення енергетичної інфраструктури, подібні рішення є стратегічним інструментом досягнення відповідності вимогам EU Green Deal та забезпечення енергетичної безпеки.

Список використаних джерел

1. Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955. Official Journal of the European Union. 2023. L 231. P. 1–111. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023L1791.

2. Salesforce Inc. Einstein Predictive AI. Salesforce Help Documentation. 2024. URL: https://help.salesforce.com/s/articleView?id=data.c360_a_ai_predictive.htm.

3. Fratini L., Borrello G. A framework to analyze inclusion in smart energy city development: The case of Smart City Amsterdam. Energy Research & Social Science. 2025. Vol. 119. P. 1–14. URL: https://www.researchgate.net/publication/387802306.

4. Lund H., Mathiesen B. V. Copenhagen CO_2 neutrality in 2025? A polycentric analysis of urban climate governance in Copenhagen 2006–2020. Energy. 2022. Vol. 258. Article 124832. URL: https://www.researchgate.net/publication/364187720.

Іван Горбатий
д.т.н., професор,
Лаврів Василь
аспірант
Національний університет «Львівська політехніка»

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ СИСТЕМАМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ПРОМИСЛОВИХ І ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

Анотація: *Описано платформу автоматизованого управління акумуляторними системами накопичення відновлюваної енергії на основі методу предиктивного керування з горизонтом планування 24 години та інтеграцією цінових сигналів оптового ринку електроенергії. Обґрунтовано застосовність єдиного алгоритмічного підходу як для промислових систем накопичення, так і для мінімізації операційних витрат базових станцій стільникових мереж.*

Ключові слова: *системи накопичення енергії, предиктивне керування, ринок «на добу наперед», базові станції стільникових мереж, операційні витрати, відновлювана енергетика.*

Базові станції мають високу частку енерговитрат (до 70%) та виражений добовий профіль споживання [1]. Це дозволяє використовувати акумулятори для арбітражу електроенергії. Алгоритм управління такими системами повністю збігається з моделлю оптимізації промислових накопичувачів для мінімізації витрат.

Програмна платформа побудована на мікросервісній архітектурі: веб-інтерфейс, серверна частина з програмним інтерфейсом, планувальник фонових завдань і реляційна база даних – усі компоненти розгорнуто у середовищі контейнерної віртуалізації. Зв'язок з інверторним обладнанням здійснюється через хмарний сервіс виробника шляхом відтворення запитів користувацького порталу, попередньо досліджених аналізом мережевого трафіку. Прогнозні ціни ринку «на добу наперед» завантажуються автоматично з порталу АТ «Оператор ринку» щодня після публікації [2]. Щоденно алгоритм формує 24-годинну стратегію управління потоками енергії на основі прогнозних цін ринку, погодинного профілю споживання об'єкту та технічних характеристик акумулятора. Оскільки інверторне обладнання підтримує обмежену кількість сегментів керування, розроблено алгоритм кластеризації, що групує 24 шаблони у мінімальний набір інтервалів без втрати якості оптимізації [3].

Для базових станцій профіль навантаження визначається трафіковими шаблонами, характерними для типу міської зони. Платформа дозволяє порівнювати майданчики за рівнем енергозаміщення, економією витрат та необхідною ємністю акумуляторів. Такий підхід переводить проєктування архітектури бездротового зв’язку у площину міждисциплінарного енерго-телекомунікаційного моделювання, де інтеграція накопичувачів дає три переваги: ціновий арбітраж, відмову від дизель-генераторів та участь у балансуванні енергосистеми за стандартами ЄС [4].

Алгоритм верифіковано на об'єкті агропромислового сектору з середнім добовим споживанням близько 550 кВт·год та акумуляторною системою ємністю 100 кВт·год. За результатами практичної експлуатації зафіксовано зниження витрат на закупівлю електроенергії на 25%. На рисунку 1 видно ключовий механізм економії: у нічні години, коли тариф ринку «на добу наперед» становить 1,1–1,5 грн/кВт·год, накопичувач заряджається від

мережі; у вечірній пік при тарифі 10–11,5 грн/кВт·год об'єкт переходить на живлення від акумулятора, різко скорочуючи закупівлю дорогої електроенергії.

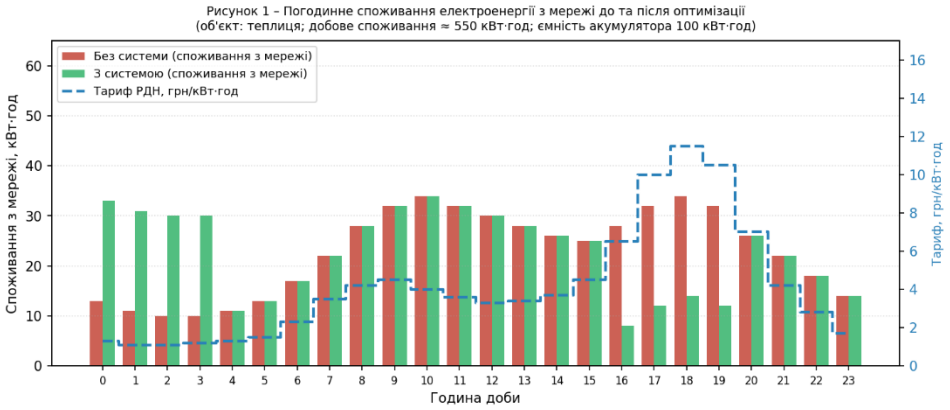


Рисунок 1 – Погодинне споживання електроенергії з мережі до та після оптимізації (об'єкт: теплиця; добове споживання ≈ 550 кВт·год; ємність акумулятора 100 кВт·год)

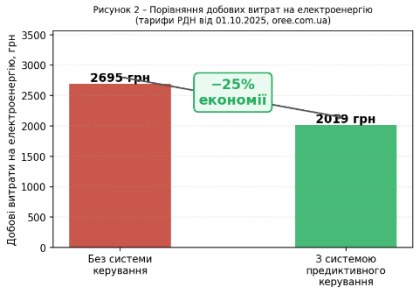


Рисунок 2 – Порівняння добових витрат на електроенергію до та після оптимізації (розрахунок за тарифами РДН від 01.10.2025, oree.com.ua)

Платформа є уніфікованим рішенням для управління відновлюваною енергією як у промислових об'єктах, так і в енергетичній інфраструктурі базових станцій стільникових мереж. Впровадження у стільникових мережах забезпечує три ефекти: економію операційних витрат через ціновий арбітраж на добовому ринку електроенергії; підвищення стійкості базових станцій при відключеннях зовнішнього живлення; формування ресурсу балансування для системного оператора відповідно до вимог інтеграції енергосистеми України до загальноєвропейської мережі. Підхід узгоджується з європейськими стратегіями декарбонізації телекомунікаційної інфраструктури.

Список використаних джерел

1. The global footprint of mobile communications: the ecological and economic perspective / A. Fehske, G. Fettweis, J. Malmodin, G. Biczok. *IEEE Communications Magazine.* 2011. Vol. 49, № 8. P. 55–62. DOI: 10.1109/MCOM.2011.5978416.

2. Результати торгів на ринку «на добу наперед» : [веб-сайт] / Оператор Ринку України. URL: https://www.oree.com.ua/index.php/control/results_mo/DAM

3. ETSI EN 303 099 *Environmental Engineering (EE): Power supply interface at the input to telecommunications and datacom (ICT) equipment.* Sophia Antipolis : ETSI, 2014. 28 p.

4. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19

Roman Martyniuk
Bachelor student,
Oleksandr Kuzyk
Assistant,
Lviv Polytechnic National University

THE IMPACT OF DOCKER AND KUBERNETES ON IT INFRASTRUCTURE ENERGY CONSUMPTION

Abstract. *The exponential expansion of global internet infrastructure has driven a massive surge in data center electricity demand, positioning resource optimization as a critical pillar of modern sustainability. This study evaluates CPU energy efficiency across three distinct deployment methodologies: single application per physical server, traditional hardware virtualization, and Docker containerization orchestrated via Kubernetes (K8s). Utilizing an analytical model based on Thermal Design Power (TDP), baseline idle power, and active processing utilization, we analyze application density and cumulative power draw under scaling workloads. The analysis reveals that while a single application per server remains efficient under low-traffic baselines due to zero architectural overhead, it becomes highly inefficient at scale due to resource over-provisioning and dependency isolation constraints. Hardware virtualization increases application density but introduces substantial CPU overhead via the hypervisor and guest operating systems. Conversely, Docker containerization paired with Kubernetes dynamic orchestration eliminates redundant OS layers and minimizes idle resource waste through real-time elastic scaling. In a high-demand simulation of 1,000 users, the Docker-Kubernetes architecture reduces power draw from 1,080 W to 480 W, yielding an approximate 55% energy reduction over unoptimized infrastructures. The study concludes that containerized orchestration represents the most viable software-level strategy for implementing Green Computing initiatives and mitigating the carbon footprint of expanding digital and AI infrastructures.*

Keywords: *Green Computing, Data Center Optimization, CPU Power Consumption, Thermal Design Power (TDP), Hardware Virtualization, Docker Containerization, Kubernetes (K8s) Orchestration, Server Utilization*

Introduction

The modern world is built around the internet. Every aspect of our life interacts with the global network, whether it is communication, streaming, data storage, booking etc. To make this achievable an extensive network of servers should be created, and with economy growth more of said servers are needed to maintain the infrastructure. The problem is that demand is growing, and so are data centers, to the point that some of them have designated power plants. To solve this problem, virtualization, Docker and Kubernetes were introduced.

Main part

Servers consist of various physical elements, each consuming electrical energy, with the Central Processing Unit (CPU) typically taking the most. The energy needed is represented by TDP – the amount of power consumed when operating at base frequency with all cores loaded. This metric varies significantly based on the core count and frequency, for example modern Intel Xeon CPUs range from 13 to 500 W[1]. Compared to CPU, other components sometimes use as little as 20 W or as much as 700 W if it is GPU. As it has its own ways of optimization not related to topic, their power consumption will be ignored. This study focuses solely on optimizing the energy usage of the CPU.

This means an average server needs at least 100 to 500 W to power CPU. However, servers are rarely fully loaded, even at near-zero utilization, processor does not consume zero watts. Due to

static leakage currents and the energy required to keep internal architecture active, “idle power” usage is present. The approximate total CPU power consumption can be calculated using this formula:

$$U = O + (TDP - O) \times C$$

Where U – final CPU power consumption in Watts; TDP - maximum TPD of the processor; O – baseline idle power usage; C – CPU processing power usage percentage;

Let us assume a server with TDP of 300 W. If idle power consumption O is 60 W, operating system continuously utilizes 10% of processing power and application needs 10% more CPU capabilities, to maintain the application server needs 108 W according to formula. The problem arises when incoming traffic exceeds what one instance can handle. Traditionally, starting two instances on one OS can cause interference and dependency errors, forcing the setup of a second physical server.

However, this inefficiency is only present when restricting a server to setup with a single application. By utilizing virtualization, multiple isolated virtual machines can be deployed on a single host, significantly increasing the application density per server. Yet, this approach introduces new layer of complication, as each instance of application requires its own complete guest operating system to function. As mentioned before, if our application requires 10% of computational power, guest OS might consume additional 10% to maintain background services, bringing the total CPU cost per virtualized instance to 20%. Furthermore, the underlying host infrastructure requires 10% computation for host OS and additional 10% for hypervisor to manage virtual machines. Assuming we load CPU fully, by inverting the formula we can calculate that it is possible to launch 4 instances of applications on a single server, bringing down the usage of power to 75W per instance.

To increase the application density further, applications can be packaged into containers that include only the essential binaries and dependencies. This is the fundamental principle of Docker containerization [2]. Number of resources needed varies from OS used and dependencies application needs, so let us assume our specific container takes around 2% of CPU. This brings the total CPU cost per containerized instance to 12%. The host infrastructure still requires 10% for host OS, however instead of a resource-heavy hypervisor, a lightweight container engine is sufficient, utilizing approximately 5% of the CPU. Re-valuating the calculation, we can simultaneously support 7 instances, each requiring approximately 43 W of power.

However, as stated earlier, servers a rarely fully loaded. To address the variable nature of incoming traffic, Kubernetes, also known as K8s, was introduced. As an orchestration platform, K8s dynamically scales application instances up or down based on real-time demand[3], which significantly reduces the overall power consumption of the infrastructure. Without it, companies often over-provision resources, leaving servers running continuously at full capacity to handle sudden traffic spikes, resulting in massive electrical waste. Furthermore, K8s allows cloud providers to cluster hardware into a unified resource pool, enabling instances to be distributed across different servers or even entire data centers to optimize power usage globally.

Figure 1 illustrates the comparative power consumption of a single application per server setup, traditional virtualization, and Docker orchestrated by K8s, assuming one application instance can handle 100 users. The sudden steps in the virtualization and containerization trend lines represent the exact moments when a new physical server must be powered on. For a low-traffic environment requiring only a single instance, single application per server remains the most energy-efficient due to the absence of architectural overhead. However, as demand scales to 1000 users, single application per server needs 1080 W of power. In contrast Docker consumes 480 W, saving roughly 600 W.

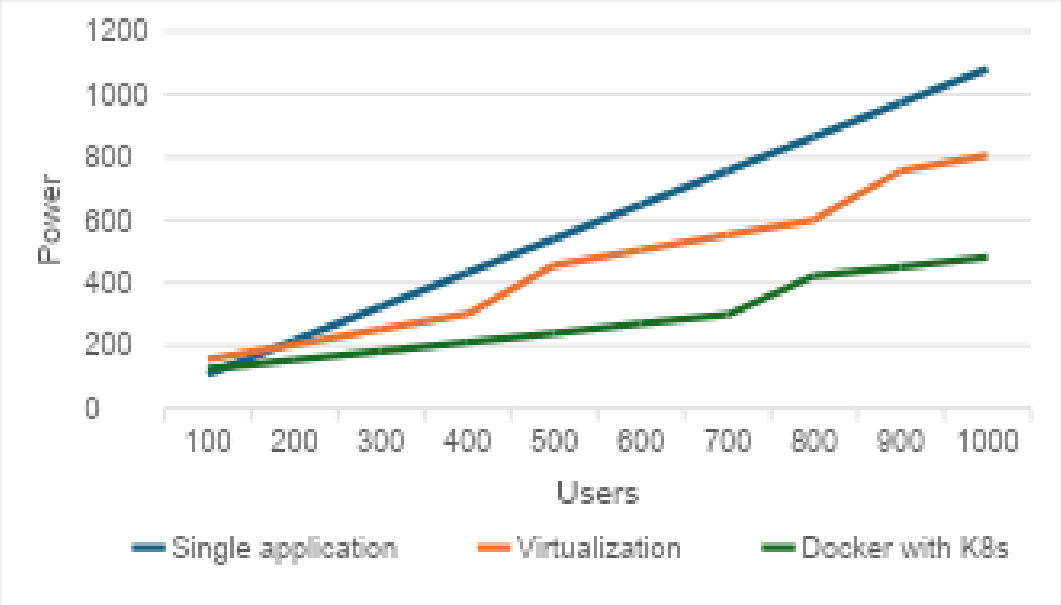


Figure 1 - Comparison of different methods of running application

Conclusion

In conclusion, this analysis demonstrates that the simultaneous use of Docker containerization and Kubernetes orchestration represents the most effective software-level strategy for optimizing CPU utilization and reducing data center power consumption. By maximizing application density, a single CPU can perform several times more tasks without a proportional increase in energy draw. For high-demand digital platforms, such as streaming services or e-commerce networks – this architecture can reduce the power footprint per application instance massively. Demonstrated model can differ from reality, as of many variable factors, converting energy effectiveness limit into a limit of skill. Ultimately, with the latest growth of AI infrastructure, adopting these advanced technologies aligns perfectly with modern "Green Computing" initiatives and European energy-saving strategies, offering a highly scalable solution to mitigate the escalating carbon footprint of the global IT infrastructure.

References:

1. Intel Xeon Processors Product Specifications. Intel Official Website. URL: https://www.intel.com/content/www/us/en/ark/products/series/595/intel-xeon-processors.html
2. Docker Overview and Architecture. Docker Documentation. URL: https://docs.docker.com/get-started/overview/
3. Kubernetes Components and Cluster Architecture. Kubernetes Official Documentation. URL: https://kubernetes.io/docs/concepts/architecture/

Mehman Huseynov,
Senior lecturer
Habil Kishiyev,
Senior lecturer,
Military Institute named after Heydar Aliyev,
Zaur Huseynov
Operations engineer
UNINET LLC

A FREQUENCY SYNTHESIZER BASED ON THE ADF4360-1 MICROCIRCUIT WITH AUTOMATIC FREQUENCY TUNING ACCORDING TO PHASE

Abstract: *The operating principle based on the block diagram, electrical parameters, and applications of a 2400 MHz frequency synthesizer implemented using the ADF4360-1 PLL integrated circuit are considered.*

Keywords: *frequency synthesis, ADF4360-1 integrated circuit, MVCO-2040-SF VCO.*

A frequency synthesizer is a device designed to generate stable signals at a specified frequency. It is used in radio communications, telecommunications, satellite navigation, scientific research, and amateur radio applications. The device produces signals based on one or more reference sources, ensuring high accuracy and frequency stability. The operation of radio engineering systems is based on the extraction of information from radio signals characterized by highly stable parameters such as frequency, phase, and envelope shape. To achieve these parameters, in addition to reference oscillation sources that are resistant to various destabilizing influences, appropriate technical means of control are also required. However, in order to obtain the required results, these tasks are practically contradictory; therefore, they are solved using frequency synthesizers (FS). Frequency synthesizers convert oscillations of a reference oscillator, which are taken as a standard, into signals of the desired frequency with minimal degradation of the reference characteristics.

Of particular interest to electronic equipment developers are frequency synthesizers implemented as one or several integrated circuits that can be embedded into new devices. In this case, the system is implemented using the ADF4360-1 PLL integrated circuit, since the required frequency for the signal generation unit coincides with the operating frequency range of the ADF4360-1 microcircuit, as specified in its technical documentation [1].

It is known that a frequency synthesizer includes a PLL integrated circuit with programmable frequency dividers, a phase detector, and control circuitry, operating in conjunction with an external reference oscillator and a voltage-controlled oscillator (VCO). This architecture provides a high degree of flexibility in selecting system parameters, particularly when a wide frequency tuning range is required. The intrinsic noise characteristics of PLL integrated circuits manifest as noise contributions from the phase detector (PD), frequency dividers, and control circuitry [2].

The voltage-controlled oscillator MVCO-2040-SF serves as a high-frequency signal source. Its output signal is passed through an attenuator and an amplifier, which provides isolation of the VCO output stages from the subsequent load circuit and amplifies the signal to the required level. The signal from the amplifier output is then routed through a power divider and a filter to the useful load. A portion of the signal is tapped via the power divider and fed to the RF input of the ADF4360-1 integrated circuit. The sampled signal at the input of the microcircuit is further amplified by a tuned

amplifier and then applied to the N-divider. According to [3], the function of the N-divider is to reduce the frequency of the high-frequency VCO signal to a level suitable for operation of the phase-frequency detector (PFD) (with a VCO frequency range of 2.4 GHz and a PFD operating frequency up to 55 MHz).

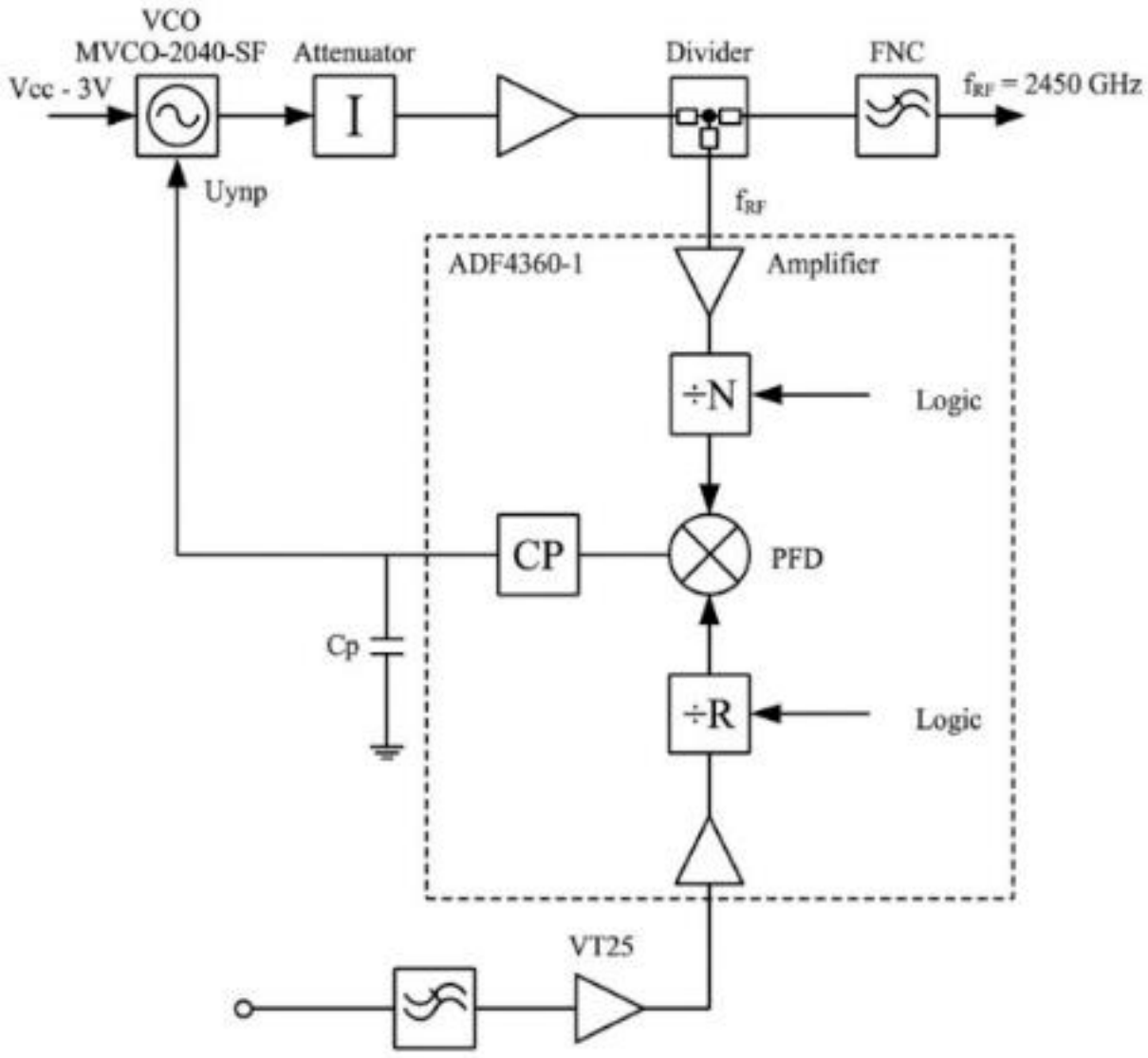


Figure 1 - Block diagram of the frequency synthesizer based on the ADF4360-1 integrated circuit.

The reference signal with a frequency of f_{RF} = 10 MHz is applied to the reference input of the ADF4360-1 integrated circuit through a filter and an amplifier based on the BFR91 transistor. The function of the filter is to suppress unwanted harmonics in the signal, ensuring that synchronization is performed using the 10 MHz fundamental frequency rather than one of its harmonics, which may have a sufficiently high amplitude. The reference frequency signal of the ADF4360-1 is also pre-amplified to the required level and then fed into the R-divider input.

The DC–DC voltage converter (charge pump, CP) operates by switching capacitors between the power supply and the output, enabling the efficient generation of a different voltage level without the use of inductors. The capacitor C_p s used to filter the CP output voltage in order to reduce ripple and suppress noise components in the output signal. At the CP output, a control voltage U_{ctrl}, is obtained, which is directly applied to the control input of the VCO. This voltage adjusts the VCO

such that the output frequency of the VCO, when divided by N and multiplied by R, becomes equal to the reference signal frequency, as expressed in Equation (1):

$$fOГ = fRF * R\ N \quad (1)$$

The ADF4360-1 integrated circuit contains a logic control block that manages the N-divider, R-divider, as well as the operating modes of the phase-frequency detector (PFD) and charge pump (CP) [4]. Control commands are transmitted to the logic circuitry via a serial SPI interface, where they are decoded and used to configure the required operating mode of the frequency synthesizer.

Conclusion. The frequency synthesizer is used in the signal generation unit of the MS2026C vector network analyzer manufactured by Anritsu. Within this unit, the frequency synthesizer demonstrated the following characteristics [4]: a) operating frequency range: 2400 MHz ± 50 MHz; b) output power level: not less than 0.4 dBm; c) external reference oscillator frequency: 10 MHz.

It is considered appropriate to conduct further research aimed at improving and upgrading the frequency synthesizer circuit to enable operation in higher frequency ranges.

References:

1. Mandal, S., Maj, P., Deptuch, G. W. (2024). *An Integer-N Frequency Synthesizer for Flexible On-Chip Clock Generation*. arXiv preprint arXiv:2411.01552, pp. 1–12.
2. Li, W., Hao, Q., Du, Y., Huang, S., Yun, P., Lu, Z. (2018). *A Simple Scheme of Low Phase Noise Microwave Synthesizers Based on the Sub-Sampling Phase-Locked Loop*. arXiv preprint arXiv:1810.03803, pp. 1–9.
3. Phan, T. K., Luong, H. C. (2025). *A 108-to-141.8 GHz 27.1% Tuning-Range Synthesizer Employing a Dual-Reference PLL Architecture*. IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), San Francisco, USA, pp. 363–366.
4. Kumar, P., Khele, A., Joshi, A. C. (2024). *Design of Phase Locked Loop in 180 nm Technology*. arXiv preprint arXiv:2406.13462, pp. 1–10.

Vladyslav Olishchak
2nd-year student,
Oleksandr Kuzyk
Assistant,
Lviv Polytechnic National University

THE UTILIZATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS FOR FORECASTING AND MANAGING ENERGY CONSUMPTION IN UKRAINIAN INDUSTRIAL ENTERPRISES

Abstract. *This study explores the implementation of Artificial Intelligence (AI) and Internet of Things (IoT) systems for dynamic energy consumption management in Ukrainian industrial enterprises, driven by severe energy deficits and generating capacity shortages. Transitioning from obsolete static load profiles to real-time, data-driven forecasting requires a robust architectural foundation. The research emphasizes the criticality of data integrity, proposing the normalization of relational databases and the deployment of DML triggers for hardware-level anomaly detection and automated security auditing. Furthermore, it advocates for migrating from vulnerable on-premises servers to virtualized cloud environments (e.g., AWS) to achieve elastic scalability for machine learning workloads [3]. This transition must be supported by static routing to isolate IoT telemetry and ensure low-latency data delivery. Recognizing the expanded cyber threat landscape, the study underscores the necessity of multi-layered security–including end-to-end encryption, strict access controls, and network isolation. Compliance with the EU NIS2 Directive [2] and adherence to the Shared Responsibility Model [1] are highlighted as mandatory frameworks for cloud integration. Ultimately, the technological modernization of energy management, fortified by systemic engineering and rigorous cybersecurity standards, is presented as a crucial vector for restoring Ukraine's post-war industrial resilience.*

Keywords: *Artificial Intelligence, IoT, Energy Management, Cloud Computing, Cybersecurity, EU NIS2 Directive, Shared Responsibility Model, SCADA.*

Relevance. Ukraine faces unprecedented challenges in its energy sector, characterized by a persistent deficit in generating capacity and the destruction of infrastructure. Traditional energy management relies on static load profiles that lack the flexibility to adapt to real-time supply fluctuations. Transitioning to dynamic, AI-led management is not merely a technological upgrade but a strategic necessity for national industrial survival. By leveraging IoT telemetry and machine learning, enterprises can shift from reactive mitigation to proactive optimization, ensuring that energy consumption is precisely aligned with both production needs and grid stability.

System Architecture and Risk Analysis. To implement such a dynamic forecasting system, a highly robust and secure architecture is paramount. However, this transition introduces significant operational and cyber risks. Malicious actors intercepting telemetry through Data Spoofing or Man-in-the-Middle (MITM) attacks can deliberately feed false data to AI models, inevitably leading to erroneous forecasting and potentially catastrophic equipment damage. Furthermore, the system must account for "Model Drift"–the gradual degradation of AI predictive accuracy due to shifting operational patterns or equipment wear over time. On a physical level, relying solely on on-premises servers exposes the infrastructure to power outages and physical destruction, while simultaneously causing inefficient server sprawl, resource redundancy, and significant maintenance overhead. To mitigate these vulnerabilities, a multi-layered architectural approach is required. The data pipeline must begin at the Data Acquisition layer, where IoT sensors and legacy SCADA systems aggregate real-time energy metrics, requiring careful management of IT/OT convergence [4]. To prevent

latency and reduce bandwidth strain, an Edge Processing layer must be introduced. Edge Computing gateways can perform localized anomaly detection, primary data filtering, and protocol translation immediately on the factory floor. Following this, the Data Storage layer must employ a hybrid approach: utilizing Time-Series Databases (TSDB) for the rapid ingestion of high-velocity telemetry, alongside 3rd Normal Form (3NF) Relational Databases for structured metadata, supported by DML triggers for instant hardware alerts. Finally, the pre-processed data is securely transmitted to a virtualized Cloud Infrastructure (such as AWS), which provides the necessary elastic scaling to train complex LSTM networks and conduct high-volume historical data analysis [3].

Strategic Recommendations and Cybersecurity. Moving forward, industrial enterprises must adopt a comprehensive Edge-to-Cloud integration strategy. This hybrid approach ensures that Edge Computing handles immediate data filtering and gateway security, while a cloud environment leverages the Shared Responsibility Model [1] to manage heavy machine learning workloads and ensure infrastructure resilience. Because the integration of cloud technologies and industrial control systems expands the attack surface [4], organizations must move beyond traditional perimeter defense by implementing a strict Zero Trust Architecture (ZTA). This framework assumes no implicit trust, mandating end-to-end encryption for all telemetry traffic and enforcing multi-factor authentication (MFA) across every single IT and OT network node.

Furthermore, strict network segmentation is essential. Utilizing static routes and robust firewalls to continuously isolate IoT traffic from standard corporate traffic will significantly minimize the potential for lateral movement by cyber attackers. To formalize these security measures, enterprises must align their policies with the regulatory standards outlined in the EU NIS2 Directive [2]. This alignment will not only guarantee a high common level of cybersecurity and secure vulnerable legacy SCADA protocols but will also strategically facilitate Ukraine's broader economic integration with European markets.

Conclusion. The convergence of advanced machine learning, specifically time-series forecasting, alongside hybrid database design and Edge-to-Cloud infrastructure, provides a comprehensive and highly effective roadmap for transforming Ukraine’s industrial energy management. By adopting a systemic engineering approach that prioritizes data integrity through TSDBs, utilizes elastic cloud scaling, and enforces rigorous Zero Trust cybersecurity measures, Ukrainian enterprises can achieve significant economic savings while directly contributing to the structural resilience of the national power grid. The comprehensive modernization of these systems, founded on scientifically substantiated architectural solutions, stands as a critical and indispensable pillar for the nation's post-war industrial recovery.

References

1. Amazon Web Services. (n.d.). *Shared responsibility model*. AWS Cloud Security.
2. European Parliament & Council of the European Union. (2022). *Directive (EU) 2022/2555 (NIS 2 Directive)*.
3. Mell, P., & Grance, T. (2011). *The NIST definition of cloud computing* (NIST SP 800-145).
4. Stouffer, K., et al. (2023). *Guide to operational technology (OT) security* (NIST SP 800-82r3).

Тетяна Плугіна
к.т.н., доцент,
Едуард Самолевський,
здобувач,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

АРХІТЕКТУРА СИСТЕМ ІОТ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ РІШЕНЬ ПРОМИСЛОВОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Анотація: *Досліджується задача проектування архітектури систем IoT та основні вимоги щодо компонентів розподілених систем. Обґрунтовано етапи проектування та задачі щодо забезпечення високої ефективності та енергозбереження. Висунуто інтелектуальні рішення промислової автоматизації.*

Ключові слова: *ефективність, енергозбереження, задача, інтернет речей, інструментарій, компоненти, мережеві технології, оптимізація, проєктування, промислова автоматизація.*

Комплексне інженерне завдання проєктування систем керування на основі Інтернету речей (IoT) полягає в об'єднанні фізичних пристроїв, мережевої інфраструктури, хмарних технологій та алгоритмів обробки інформації для створення інтелектуальних систем промислової автоматизації й моніторингу виробничих процесів [1]. Основна мета - мінімізувати енергоспоживання на кожному рівні, зберігаючи при цьому надійність збору та обробки даних.

Етапи розробки розподілених систем визначаються відповідно до вимог і особливостей технологічного процесу.

Архітектура розподіленої IoT-системи має багаторівневу структуру, у якій виділяють такі рівні: рівень сприйняття (Perception Layer) — датчики та виконавчі пристрої (ESP32, Arduino, Raspberry Pi), що здійснюють збір інформації про стан навколишнього середовища; мережевий рівень (Network Layer) — шлюзи та протоколи зв'язку (MQTT, CoAP, LoRaWAN), які забезпечують передавання даних; рівень обробки та зберігання даних (Processing/Cloud Layer) — хмарні сервіси та бази даних (Node.js тощо), де відбувається аналіз і збереження інформації; рівень застосунків (Application Layer) — користувацькі інтерфейси у вигляді вебзастосунків і мобільних програм.

До основних етапів проєктування належать [2]: формування вимог — визначення цілей системи (моніторинг, керування) та наявних обмежень (вартість, енергоспоживання); підбір апаратного забезпечення — вибір енергоощадних мікроконтролерів і сенсорів; створення мережевої інфраструктури — проєктування надійної системи зв'язку між розподіленими вузлами; розробка програмного забезпечення — програмування вбудованого ПЗ (firmware) та налаштування серверної частини й хмарної платформи (backend); забезпечення безпеки — реалізація механізмів автентифікації та захисту даних, зокрема із застосуванням блокчейн-технологій у децентралізованих системах.

До ключових компонентів, які зазвичай реалізуються на платформах збору, аналітики та візуалізації даних, належать програмне забезпечення для IoT-баз даних і систем аналізу інформації.

Також до складу таких компонентів входить інтеграційне програмне забезпечення, що забезпечує взаємодію IoT-інфраструктури з існуючими ERP-системами та системами

управління виробництвом, а також прикладні рішення, які використовуються в більшості IoT-проєктів організації [3].

Отже, розподілена IoT-система є гібридною архітектурою, що може поєднувати різні типи підсистем. У більшості випадків такі системи базуються на двох основних принципах керування — подієвому та часовому (рис. 1).

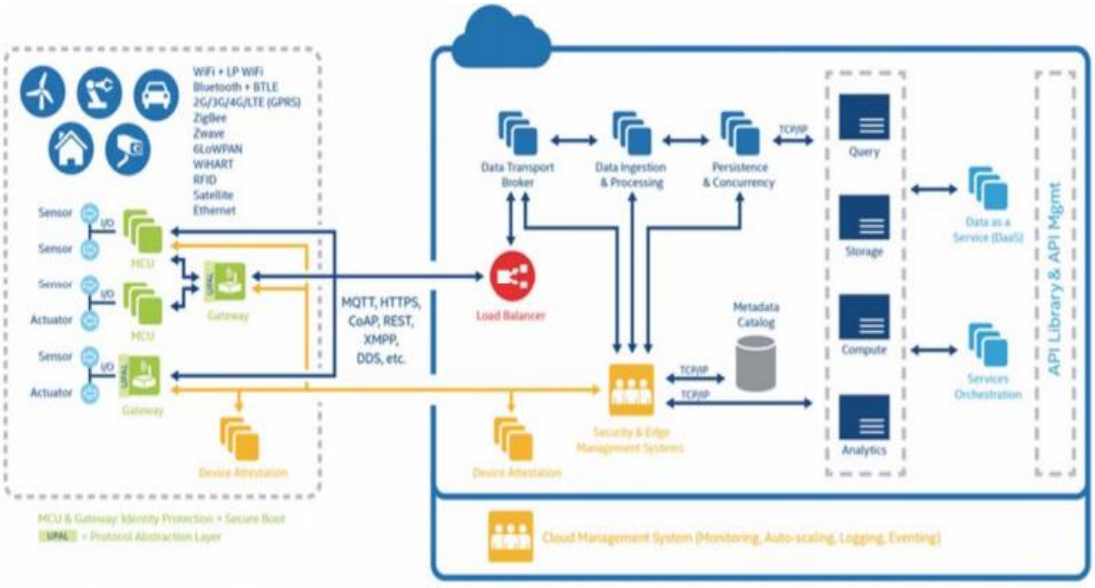


Рисунок 1 - Архітектура системи управління IoT

Вибір технології зв'язку, що забезпечує низьке споживання енергії при достатньому радіусі дії. Розробка інтелектуальних алгоритмів керування станами пристрою. Обґрунтування: програмна оптимізація дозволяє "гасити" компоненти, що не використовуються. Заходи для цього: Power Management ICs (PMIC) (використання мікросхем керування живленням для динамічної зміни напруги); Duty Cycling (переведення пристроїв у режим глибокого сну з автоматичним "прокиданням" за розкладом або подією).

Платформа повинна підтримувати асинхронну взаємодію для зменшення навантаження на кінцеві пристрої. Застосування безсерверних архітектур (Serverless) для обробки даних зменшує енергоспоживання інфраструктури, та використання ефективних баз даних часових рядів (Time-series DB).

Енергоефективна архітектура IoT (Green IoT) будується на принципах: мінімізація передачі даних, обробка на краю (Edge), використання LPWAN та наднизького споживання у режимі сну. Така архітектура мінімізує енергоспоживання на кожному рівні та зберігає надійність збору та обробки даних.

Список використаних джерел

1. Кашканов В. А., Інформаційні системи і технології на автомобільному транспорті: навчальний посібник / В. А. Кашканов, А. А. Кашканов, В. П. Кужель. − Вінниця: ВНТУ, 2020. − 104 с.

2. Жураковський Б. Ю. Технології інтернету речей: навч. посіб. для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» / Б. Ю. Жураковський, І.О. Зенів. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 271 с.

3. Довгий, О.В. Копійка. ІТ-інфраструктура як базова складова цифрової трансформації. Монографія – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2023. – 458 с.

Назар Приймак
аспірант,
Жук Юрій
аспірант,
Леонід Озірковський
д.т.н., доцент
Національний університет «Львівська політехніка»

ОЦІНКА ВПЛИВУ СТРУКТУРНОЇ ЖИВУЧОСТІ МЕРЕЖІ РОЗУМНОГО БУДИНКУ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ

***Анотація**: розглянуто вплив зв'язності мережі пристроїв у системах «розумний будинок» на ефективність енергозбереження. Показано, що сучасні алгоритми оптимізації енергоспоживання суттєво залежать від стабільності передачі даних між датчиками, контролерами та виконавчими пристроями. Обґрунтовано, що відмови каналів зв'язку можуть призводити до втрати критично важливої інформації та переходу системи до неефективних режимів роботи. Особливу увагу приділено ролі ключових датчиків, зв'язність яких безпосередньо впливає на якість керування енергоспоживанням. Запропоновано підхід до оцінки впливу мережевих відмов на загальний рівень енергоефективності без ускладнення математичного апарату. Показано доцільність врахування структурної надійності мережі при проєктуванні систем «розумний будинок». Отримані результати відповідають сучасним європейським підходам до побудови енергоефективних і стійких систем. Зроблено висновок про необхідність інтеграції оцінки зв'язності у задачі енергозбереження.*

***Ключові слова**: розумний будинок, енергозбереження, зв'язність мережі, надійність, живучість систем, датчики, IoT, резильєнтність.*

Вступ. Сучасні системи «розумний будинок» є важливою складовою концепції енергоефективності, що активно впроваджується в країнах Європи. Основна ідея таких систем полягає в оптимізації споживання енергії за рахунок автоматизованого управління освітленням, опаленням, вентиляцією та іншими інженерними підсистемами. Досягнення високого рівня енергозбереження базується на використанні даних від численних датчиків, які вимірюють температуру, присутність людей, рівень освітлення та інші параметри. На основі цих даних система приймає рішення щодо регулювання режимів роботи обладнання. Однак у більшості досліджень основна увага приділяється алгоритмам оптимізації, тоді як роль мережевої інфраструктури часто недооцінюється. У той же час ефективність будь-якої системи керування безпосередньо залежить від надійності передачі інформації між її компонентами.

Постановка проблеми. Система «розумний будинок» за своєю суттю є розподіленою мережею [1], яка включає: сенсорні вузли (датчики), керуючі пристрої (контролери) та виконавчі механізми. Передача даних між цими елементами здійснюється через канали зв'язку [2], які можуть піддаватися відмовам або деградації [3]. Причини можуть бути різними, для прикладу, перешкоди в бездротових мережах, апаратні або програмні збої, перевантаження мережі. У випадку порушення зв'язності між вузлами система втрачає частину інформації або отримує її із затримкою. Це призводить до зниження ефективності алгоритмів керування. Таким чином, забезпечення належного рівня зв'язності мережі є невід'ємною частиною стратегії енергозбереження [4]. Якщо такі вузли втрачають зв'язок із системою, це може

призвести до переходу в неефективні режими роботи, наприклад: постійне підтримання високої температури незалежно від потреби та некоректна робота систем вентиляції.

Метод для оцінювання зв'язності. Для врахування впливу мережевих відмов пропонується використовувати підхід, заснований на оцінці зв'язності мережі. Суть підходу полягає у виділенні ключових вузлів системи (датчиків і контролерів), аналізі можливих шляхів передачі даних між ними, оцінці стійкості цих шляхів до відмов каналів зв'язку [5].

Такий підхід дозволяє визначити, які елементи мережі є критичними, оцінити, наскільки система є стійкою до відмов та виявити слабкі місця в топології мережі. На відміну від традиційних підходів до енергозбереження, де розглядаються лише алгоритми керування, запропонований підхід враховує інфраструктурний рівень — тобто мережу передачі даних.

У сучасних європейських концепціях розвитку енергоефективних систем значна увага приділяється таким аспектам: надійність і стійкість (resilience), інтеграція інформаційних і енергетичних систем та забезпечення безперервності функціонування. Запропонований підхід повністю відповідає цим принципам, оскільки враховує вплив відмов мережі на функціонування системи, дозволяє підвищити стійкість до збоїв, сприяє більш точному прогнозуванню енергоспоживання. Таким чином, забезпечення належного рівня зв'язності мережі є невід'ємною частиною стратегії енергозбереження.

Висновки. У роботі показано, що ефективність систем «розумний будинок» залежить не лише від алгоритмів оптимізації, але й від надійності мережевої інфраструктури. Тому енергозбереження прямо пов'язане з якістю обміну даними між компонентами системи, а відмови каналів зв'язку можуть призводити до суттєвих енергетичних втрат. У таких мережах, ключові датчики повинні мати високий рівень зв'язності. Оцінка зв'язності дозволяє виявити критичні елементи системи та підвищити її ефективність.

Отже, врахування структурної живучості мережі є необхідною умовою побудови сучасних енергоефективних систем «розумний будинок» відповідно до європейських стандартів.

Список використаної літератури

1. Кравчук С. О., Лисенко В. П. Моделі та методи підвищення енергоефективності систем «розумний будинок» // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія: Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2021. – № 2.
2. Бондаренко О. В., Ткаченко І. М. Аналіз надійності бездротових сенсорних мереж у системах Інтернету речей // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2020. – № 4. – С.
3. Шевченко П. І., Мельник А. С. Методи оцінювання живучості телекомунікаційних мереж критичного призначення // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2019. – № 3.
4. Іваненко М. В., Гнатюк В. С. Інтелектуальні системи керування енергоспоживанням у будівлях // Електроніка та системи управління. – 2022. – № 1. – С. 23–29.
5. Сидоренко В. П. Надійність та живучість телекомунікаційних мереж: навчальний посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2020. – 180 с.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

МАТЕРІАЛИ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

PROCEEDINGS INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE

«ЄВРОПЕЙСЬКІ СТРАТЕГІЇ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЇХ АДАПТАЦІЯ В УКРАЇНІ»

"EUROPEAN ENERGY SAVING STRATEGIES AND THEIR ADAPTATION IN UKRAINE"

Режим доступу:
https://science.lpnu.ua/uk/eesssynergy/materialy-konferenciyi

Підписано до друку 01.06.2026
Формат 60 84/16. Папір офсетний. Друк цифровий.
Умовн. друк. арк. 10,0. Обл.-вид. арк. 14,47.
Наклад 20 прим.

Видавництво ПП «Новий Світ-2000»
e-mail: novsv2000@gmail.com
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців і розповсюджувачів видавничої продукції:
серія ДК № 59 від 25.05.2000 року, видане Державним комітетом інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України.

Виготовлено : Видавець ФОП Піча С. В. а/с 5026, м. Львів-53, 79053, Україна
e-mail: novsv2016@ukr.net, https://ns2000.com.ua/
+38 068-978-94-42, +38 050-337-58-46
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції:
серія ДК № 5069 від 22.03.2016 року, видане Державним комітетом інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України.

9 789664 185957

Видавництво «Новий Світ-2000»