

ISSN 1813-5420

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№1–2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# ЕНЕРГЕТИКА

*економіка, технології, екологія*

Науковий журнал

№ 1 (63) - 2021

Виходить 4 рази на рік

Заснований у березні 2000 року

Енергетичні системи та комплекси  
Енергетична ефективність та енергозбереження  
Моніторинг, діагностика та керування енергетичними процесами та  
обладнанням  
Технології та обладнання в енергетиці  
Лібералізовані ринки енергії  
Міжгалузеві проблеми і системні дослідження в паливно-енергетичному  
секторі  
Екологічні проблеми в енергетиці

---

Київ

КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2021

Головний редактор – Ю.І. Якименко

Заступники

головного редактора – С.П. Денисюк, О.С. Яндульський, Є.М. Письменний

Відповідальний секретар – О.О. Закладний

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ: А.О. Авраменко, Б.І. Басок, О.Ф. Буткевич, О.О. Вовк,  
(Україна) А.В. Волошко, Г.О. Воропаєв, В.І. Дешко, В.Я. Жуйков,  
С.О. Кудря, А.В. Носовський, М.Я. Островерхов,  
С.М. Пересада, В.А. Попов, К.К. Ткачук, В.О. Туз,  
О.Ю. Черноусенко, С.П. Шевчук, В.Ф. Шинкаренко

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ

РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ: Е. Хандшин (*Дортмундський технічний університет, інститут енергетичних систем та економіки енергетики, Німеччина*), Ричард Стржелецькі (*Інститут електротехніки, Варшава, Польща*), П.Я. Екель (*Папський католицький університет Мінас Жерайс, Бразилія*), А.В. Кузнецов (*Університет штату Північна Кароліна, США*), В.І. Олещук (*Інститут енергетики АН Молдови*), О.В. Кузнецов (*Університет прикладних наук, Німеччина*), Карлос Ф. Пфайфер (*Університетський коледж Південно-Східної Норвегії*), А. Башкіс (*Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва*), Опітс Йоахім (*Інститут енергетики м. Хамм, Німеччина*), В.М. Постолатій (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*), Рошан Шарма (*Університет Південно-Східної Норвегії*).

Технічний секретар Н.О. Кравчук.

Веб-сайт журналу <http://energy.kpi.ua>

Журнал зареєстровано Реєстраційний номер Свідоцтва про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ №22857-12775ПР від 14.06.2017 р.

Журнал внесено до Переліку фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук відповідно до наказу МОН України № 1188 від 24 вересня 2020 р. (категорія «Б»). Журнал включено до баз даних «Наукова періодика України» НБУВ, Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, Джерело, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, електронного архіву наукових матеріалів ELAKPI. Підписано до друку за рекомендацією Вченої ради Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (протокол № 5 від 17 травня 2021 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Комп'ютерна верстка О.С. Іщенко.  
Відповідальний за випуск видання Н.О.Кравчук.

ISSN 1813-5420 (Print), 2308-7382 (Online).

Адреса редакції 03056, Україна, м.Київ, вул.Борщагівська, 115, к.315,  
тел. (38-044) 406-85-14, e-mail: [kravkpi@ukr.net](mailto:kravkpi@ukr.net)

Видавець КПІ ім. Ігоря Сікорського Видавництво «Політехніка»,  
м.Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15.

**Увага!** Передрукування матеріалів іншими виданнями можливе лише з дозволу редакційної колегії журналу **ЕНЕРГЕТИКА: економіка, технології, екологія**

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF UKRAINE  
“IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE”

# POWER ENGINEERING

*economics, technique, ecology*

*ENERHETYKA:*  
*ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya*

**The Scientific Journal**

**№ 1 (63) – 2021**

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Energy systems and complexes  
Energy efficiency and energy savings  
Monitoring, diagnostics and management of energy processes and  
equipment  
Energy technologies and equipment  
Liberalized energy markets  
Cross-sectoral problems and system research in the fuel and energy sector  
Environmental problems in energy

---

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2021

*Editor-in-chief* Yu.I. Yakymenko

*Deputy editors-in-chief* S.P. Denysiuk, O.S. Yandulskyi, E.M. Pysmennyi

*Deputy* O.O. Zakladnyi

EDITORIAL BOARD: (Ukraine) A.O. Avramenko, B.I. Basok, O.F. Butkevych, O.O. Vovk, A.V. Voloshko, G. Voropaiev, V.I. Deshko, V.Ya. Zhuykov, S.O. Kudrya, A.V. Nosovsky, M.Ya. Ostroverkhov, S.M. Peresada, V.A. Popov, K.K. Tkachuk, V.O. Tuz, O. Yu. Chernousenko, S.P. Shevchuk, V.F. Shinkarenko

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD: E. Handschin (*Institute of Power Systems and Power Economics of Dortmund Technical University, Germany*), Richard Strzelecki (*Electro technical Institute, Warsaw, Poland*), P.Y. Ekel (*Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil*), A.V. Kuznetsov (*North Caroline State University, USA*), V. Oleschuk (*Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova*), O. Kuznetsov (*University of Applied sciences, Germany*), Carlos F. Pfeiffer (*University College of Southeast Norway*), A. Baskys (*Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania*), Opitz H. Joachim (*EIH Energy Institute Hamm, Germany*), V. Postolati (*Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova*), Roshan Sharma (*University of South-Eastern Norway*).

Technical secretary N.O. Kravchuk

Website of the journal <http://energy.kpi.ua>

Journal was registered Certificate of State Registration Printed Media series KB №22857-12775IIP dated 14 June 2017

The Journal was registered approved by order of MES of Ukraine № 1188 of September 24, 2020 as an occupational edition. The Journal is included in databases «Scientific Periodicals of Ukraine», Google Scholar, Index Copernicus WorldCat, BASE, OpenAIRE, Djerelo, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, electronic archive of research materials ELAKPI. Passed for printing under recommendation of Academic Council of National Technical University of Ukraine " Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute " (protocol № 5 on May 17, 2021).

Proofreading V.G. Smoliar. Desktop publishing O. Ishchenko.  
Responsible for the publication N.O. Kravchuk.

ISSN 1813-5420 (Print), 2308-7382 (Online).

Address of editorial office 03056, Ukraine, Kyiv, 115 Borschagivska str., office 315 tel. (38-044) 406-85-14, e-mail: [kravkpi@ukr.net](mailto:kravkpi@ukr.net)

The publisher Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Publ.hous "Politehnika", Kyiv, 14 Polytechnique str., b. 15.

**Attention!** Reprint material in other publications only with the permission of editorial board of the journal **POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology**

© Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2021

## ЗМІСТ

### ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

**С.П. Денисюк, М.О. Коломійчук, Г.В. Мельничук.** Розвиток можливостей методу окремих складових для аналізу режимів у електротехнічних Smart-комплексах. .... 7

### ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

**В.І. Дешко, М.М. Шовкалюк, Ю.С. Кузьміна.** База даних сертифікатів енергетичної ефективності будівель в Україні: аналіз для нового будівництва. .... 20

**С.П. Денисюк, О.В. Коцар, М.М. Шовкалюк.** Підготовка фахівців з енергетичної сертифікації та обстеження інженерних систем будівель в ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського..... 27

**Б.І. Басок, О.М. Недбайло, І.К. Божко, М.В. Ткаченко.** Технічні особливості використання комплексної вітро-сонячної системи живлення енергоефективного будинку ..... 33

**В.І. Дешко, І.Ю. Білоус, І.О. Суходуб, О.І. Яценко.** Аналіз впливу розподілення повітрообміну між кімнатами на енергоспоживання квартири..... 39

### МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

**С.В. Зайченко, С.В. Король, Д.Г. Дерев'яно, В.П. Опришко, Н.І. Жукова.** Моделювання процесу електромеханічного управління газорозподілом генератора електричної енергії з двигуном внутрішнього згорання. .... 51

**В.В. Чумак, О.Л. Тимошук, Є.А. Монахов, О.В. Вишневський, А.С. Стулішенко.** Частотні характеристики електричних машин зі всипними обмотками при тепловологому старінні. .... 59

### ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

**О.С. Яндульський, О.І. Буханенко.** Методи пошуку аномалій в даних вимірювань режимних параметрів електричної мережі. .... 67

**А.А. Карпеченко, М.М. Бобров.** Формування функціональних плазмових покриттів з комплексом підвищених фізико-механічних та експлуатаційних властивостей. .... 74

**Д.О. Федоров, В.О. Туз, С.В. Клевцов.** Моделі прогнозування кризи течії для теплоносія на надкритичних параметрах..... 81

### ЛІБЕРАЛІЗОВАНІ РИНКИ ЕНЕРГІЇ

**І.В. Блінов, Є.В. Парус, В.О. Мірошник, П.В. Шиманюк, В.В. Сичова.** Модель оцінки доцільності переходу промислових споживачів до погодинного обліку електричної енергії на роздрібному ринку..... 88

**А.І. Замулко, О.С. Іщенко.** Особливості використання тарифів на переривання в умовах ринку електричної енергії України ..... 98

### МІЖГАЛУЗЕВІ ПРОБЛЕМИ І СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНОМУ СЕКТОРІ

**Б.І. Басок, Є.Т. Базєєв.** Проблеми фізики та геополітики в глобальному потеплінні. .... 108

### ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

**І.О. Шкільнюк, С.В. Бойченко, С.Й. Шаманський, О.О. Вовк.** Оцінювання потенціалу мікроорганізмів до біодеструкції моторних палив з різними характеристиками. .... 125

**В.П. Щокін, О.В. Щокіна.** Застосування гуматового реагенту для пилопригнічення і дегазації при масових вибухах. .... 132

Вимоги до оформлення статей ..... 137

## CONTENTS

### ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

- S. Denysiuk, M. Kolomiichuk, H. Melnychuk.** Development of possibilities of the method of individual components for analysis of modes in electrical Smart-complexes..... 7

### ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

- V. Deshko, M. Shovkaliuk, Yu. Kuzmyna.** Database of certificates of energy efficiency of buildings in Ukraine: analysis for new construction. .... 20
- S. Denysiuk, O. Kotsar, M. Shovkaliuk.** Training of specialists in energy certification and inspection of engineering systems of buildings in the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. .... 27
- B. Basok, O. Nedbailo, I. Bozhko, M. Tkachenko.** Technical features of using a complex wind-solar power supply system of an energy-efficient house..... 33
- V. Deshko, I. Bilous, I. Sukhodub, O. Yatsenko.** Analysis of the influence of air exchange distribution between rooms on the apartment energy consumption..... 39

### MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

- S. Zaichenko, S. Korol, V. Opryshko, D. Derevyanko, N. Zhukova.** Modeling of the process of electromechanical control of gas distribution of an electric energy generator with an internal combustion engine..... 51
- V. Chumak, O. Timoshuk, E. Monakhov, A. Vishnevsky, A. Stulishenko.** Frequency characteristics of electrical machines with a mesh winding during heat-and-moisture aging. .... 59

### ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- O. Yandulskiy, o. Bukhanenko.** Methods of searching for anomalies in the data provided by mode parameters measurements of the electric network..... 67
- A. Karpechenko, M. Bobrov.** Formation of functional plasma sprayed coatings with complex of improved physical, mechanical and operational properties..... 74
- D. Fedorov, V. Tuz, S. Klevtsov.** Critical flow prediction models for the coolant at supercritical parameters..... 81

### LIBERALIZED ENERGY MARKETS

- I. Blinov, E. Parus, V. Miroshnyk, P. Shymaniuk, V. Sychova.** Model of evaluation the feasibility of industrial customers to hourly accounting of retail electricity market. .... 88
- A. Zamulko, O. Ishchenko.** Peculiarities of using tariffs for interruption in the conditions of the electricity market of Ukraine. .... 98

### CROSS-SECTORAL PROBLEMS AND SYSTEM RESEARCH IN THE FUEL AND ENERGY SECTOR

- B. Basok, Ye. Baseyev.** Problems of physics and geopolitics in global warming..... 108

### ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

- I. Shkilniyk, S. Boichenko, S. Shamanskyi, O. Vovk.** Assessment of the microorganisms potential for biodestruction of motor fuels with different characteristics. .... 125
- V. Shchokin, O. Shchokina.** Application of humatic reagent for dust destruction and degasation in mass explosions. .... 132
- Requirements for the articles ..... 137

# ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.316

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6299-3680  
М.О. Коломійчук, студентка, ORCID 0000-0002-7967-6112  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Г.В. Мельничук, магістр промислової електроніки, ORCID 0000-0002-8173-0472  
Міністерство розвитку громад та територій України

## РОЗВИТОК МОЖЛИВОСТЕЙ МЕТОДУ ОКРЕМИХ СКЛАДОВИХ ДЛЯ АНАЛІЗУ РЕЖИМІВ У ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ SMART- КОМПЛЕКСАХ

Розглянуто особливості формування локальної електроенергетичної системи за концепцією Smart Grid, що потребує якісно нової архітектури системи енергозабезпечення та нових принципів функціонування – як на рівні технічних рішень, так і механізмів організаційної взаємодії на технологічному рівні та фінансових розрахунків. Проаналізовано науково-технічні проблеми, пов'язані з функціонуванням окремих типів електротехнічних Smart-комплексів (ЕТК-Smart), визначено особливості аналізу електротехнічних комплексів з нелінійними елементами шляхом аналізу процесів у разі змін активних та реактивних навантажень, що дає змогу враховувати відповідні зміни параметрів при розрахунках електромагнітних процесів за допомогою аналітичних методів. Удосконалено методологію оцінки впливу кондуктивних періодичних завад на протікання усталеного режиму в електротехнічних Smart-комплексах. Розглянуто принципи аналізу (моделювання) ЕТК-Smart як систем з періодично змінюваними параметрами. Показано, що застосування ЕТК-Smart зумовлює прискіпливу увагу до аналізу усталених та перехідних, у тому числі й модульованих, режимів, у випадку формування різноманітних графіків протікання енерготехнологічних та технологічних процесів, електроживлення різноманітних типів навантажень тощо. Сформульовано алгоритми розрахунку струмів у електричних комплексах з циклічно змінюваними параметрами, а також аналізу впливу періодичних кондуктивних завад в елементах ЕТК-Smart з перетворювачами електроенергії на основі розвитку можливостей методу окремих складових при моделюванні усталених режимів, що дозволяє здійснювати автоматизацію відповідних розрахунків за допомогою обчислювальної техніки. Наведено алгоритми аналізу електромагнітних процесів у ЕТК-Smart із змінюваними параметрами та RL-навантаженням для складних періодичних, аналізу системи у разі нелінійних елементів, врахування при аналізі внутрішнього опору генератора та ліній передачі, аналізу процесів при стрибкоподібній зміні параметрів реактивних елементів (індуктивності  $L$  та ємності  $C$ ), аналізу впливу періодичних кондуктивних завад (на змінному та постійному струмі) на електромагнітні процеси в елементах ЕТК-Smart з перетворювачами електроенергії. Наведено основи методичного забезпечення оцінки енергоефективності ЕТК-Smart як елементів інтелектуальних систем електроживлення. Запропоновано алгоритм електротехнічного обстеження (енергоаудиту) електротехнічних комплексів шляхом застосування запропонованих аналітичних виразів та узагальненого алгоритму розрахунку електромагнітних процесів у електричних комплексах з циклічно змінюваними параметрами, що дає змогу здійснювати відповідні оцінки енергоефективності функціонування Microgrid. Запропоновано концепцію формування (побудови) та модернізації оптимізації елементів Smart-технології для Smart-мікрорайону інтелектуального міста шляхом розроблення алгоритму здійснення відповідних досліджень і оцінок та формування мережі Microgrid (ЕТК-Smart з перетворювачами електроенергії) кількох рівнів ієрархії, що дозволяє здійснювати вибір оптимальних параметрів Microgrid та оцінку загальних показників енергоефективності функціонування Smart-мікрорайону інтелектуального міста. Представлені приклади аналізу підтверджують ефективність застосування модифікації методу окремих складових для аналізу усталених режимів ЕТК-Smart.

**Ключові слова:** електротехнічні Smart-комплекси, Microgrid, перетворювачі електроенергії, модифікація методу окремих складових, усталений режим, кондуктивні завади, алгоритми розрахунку, оцінка енергоефективності.

© С.П. Денисюк, М.О. Коломійчук, Г.В. Мельничук, 2021



## Вступ

Одним з ключових напрямків науково-технічного прогресу в електротехніці, обумовлених загальною тенденцією поширення електрифікації і автоматизації, технологічних інновацій і нових економічних та інформаційних взаємодій, є запровадження Smart-технологій на базі електротехнічних Smart-комплексів (далі – ЕТК-Smart) шляхом поширення концепції Smart Grid (інтелектуальна мережа) [1, 2]. Модернізація електротехнічних комплексів відповідно до вимог концепції Smart Grid у разі зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та урізноманітнення топологій електроенергетичних систем призводить до суттєвої зміни основних режимів роботи цих електротехнічних об'єктів, необхідності вирішення проблем ефективного функціонування систем електроживлення, реалізації законів оптимального керування при врахуванні спотворень напруги та струму, забезпечення заданих рівнів електромагнітної сумісності.

Формування локальної електроенергетичної системи за концепцією Smart Grid потребує якісно нової архітектури системи енергозабезпечення та нових принципів функціонування – як на рівні технічних рішень, так і механізмів організаційної взаємодії на технологічному рівні та фінансових розрахунків. Враховуючи, що основною зацікавленою стороною створення Smart Grid є органи місцевого самоврядування, впровадження таких систем можуть ефективно здійснювати локальні енергетичні компанії, що працюють з кінцевими споживачами електроенергії.

Загалом можна виділити такі ключові чинники, що спричиняють значний вплив на зміни структури електроенергетичних систем на локальному рівні та водночас сприяють кластеризації електромереж і розвитку електротехнічних комплексів [1, 3, 4]:

1) значне здешевлення засобів локальної електрогенерації, насамперед ВДЕ (сонячні батареї, вітрові установки);

2) поява активного споживача (просюмера), коли власник засобів локальної електрогенерації є одночасно як споживачем електроенергії, у тому числі з централізованої мережі, так і її постачальником;

3) поява ефективних технологій накопичення та зберігання електроенергії у локальних масштабах; відбувається поширення стаціонарних акумуляторів на рівні домогосподарств та технології взаємодії електромобілів з мережею за технологією Vehicle to Grid (V2G);

4) поширення технологій керування споживанням на боці споживача, формування програм керування попитом, визначення пріоритетних та критичних споживачів електроенергії;

5) поява технологій інтелектуального керування мережею, які забезпечують безпеку, надійність та ефективність функціонування електротехнічних комплексів, а також реалізацію програм поведінки просюмера на енергоринку, у тому числі на основі принципів мультиагентного керування.

## 1. Аналіз науково-технічних проблем, пов'язаних з функціонуванням окремих типів ЕТК-Smart

За результатами досліджень розвитку та особливостей роботи сучасних електротехнічних комплексів визначимо, що *Електротехнічний Smart-комплекс (ЕТК-Smart)* – це взаємопов'язаний комплекс сучасного електротехнічного та електротехнологічного обладнання, що працює на змінному чи постійному струмі відповідно до вимог концепції Smart Grid, характеризується наявністю різноманітних циклічно змінних параметрів елементів (режимів роботи) та відповідно до своїх режимів функціонування може живитися як від централізованих, так і від децентралізованих джерел електроенергії.

Характерною особливістю сучасних ЕТК-Smart є збільшення кількості споживачів з нелінійними ВАХ, які обумовлюють появу в системі струмів і напруги несинусоїдної форми. Високий рівень вмісту гармонік негативно впливає на ефективність роботи промислового електрообладнання, обчислювальної техніки, побутових приладів, призводить до зростання втрат електроенергії, спричиняє прискорене старіння ізоляції.

Сукупність електрообладнання, яким реалізують сучасні електротехнології, слід розглядати як єдиний ЕТК-Smart, до якого входять: система електроживлення та розподілу енергії; система головних та допоміжних електроприводів і перетворювачів електроенергії; система автоматизації, захисту, діагностики тощо. ЕТК-Smart практично завжди мають досить різноманітний склад електрообладнання. Робота такого обладнання пов'язана з електричними режимами, які мають суттєвий вплив на терміни нормальної його експлуатації. Основним чинником, що впливає на стан електрообладнання, є його навантаження, яке далеко не завжди відповідає номінальній потужності.

Наразі поширення набули Microgrid як важливий елемент локального енергозабезпечення та розвитку ЕТК-Smart, які можна класифікувати на три типи відповідно до їх функціонального призначення [5]:

– ЕТК-Smart з виробництва електроенергії за допомогою альтернативних джерел енергії (невеликі ГЕС, сонячні та вітряні установки, генератори на біогазі чи інших видах палива);

– ЕТК-Smart, які забезпечують підвищені вимоги споживачів до якості електроенергії та надійності

електропостачання, зокрема, об'єкти та системи критичної інфраструктури (медичні центри, фінансові установи, системи безпеки та забезпечення життєдіяльності);

– віддалені мікромережі з ЕТК-Smart, які, як і перший тип, застосовують локальні джерела електроенергії, а також мають вимоги до керування резервами потужності у випадку надзвичайних ситуацій.

Виділені Microgrid з різними типами ЕТК-Smart, як правило, працюють в умовах обмеження потужності вхідного джерела, а також «непередбачуваності» навантажень, що визначає їх випадковий характер, як за величиною активної потужності, так і за характером – навантаження можуть бути одно- або трифазними, збалансованими (симетричними) або незбалансованими, лінійними або нелінійними. Несиметрія і гармонічні спотворення напруги можуть викликати серйозні проблеми з обладнанням, такі як вібрація, перенапруження, перегрівання тощо. Важливим напрямом вдосконалення ЕТК-Smart, підвищення їх енергоефективності, розвитку систем локального енергопостачання є широке використання перетворювачів електричної енергії [6 – 8]. Це зумовлює подальше вдосконалення і, відповідно, ускладнення конструкції ПЕЕ, збільшення кількості їх типів, ускладнення форми (виду) електричних сигналів до систем керування, потребу в розширенні можливостей адаптації електричних сигналів до миттєвих параметрів локальної або загальної енергетичної системи, зумовлених зміною режимів роботи генераторів електричної енергії та особливостями технологічних процесів.

За результатами проведеного аналізу можемо сформулювати такі причини різної модульованої зміни параметрів навантажень та генераторів, а у більш широкому сенсі – модульованої зміни параметрів елементів у виділених електротехнічних комплексах:

- робота у складі комплексів ВДЕ, у першу чергу генерація енергії сонячними панелями;
- зміна кількості електромобілів, які підключаються до заряджаючих пристроїв швидкого заряджання;
- паралельна робота пристроїв силової електроніки (ШП, випрямлячів, інверторів, бітиристорних регуляторів), для яких режими відбору струму від системи можуть накладатися;
- робота електричних приладів у будинках, комерційних та бюджетних будівлях, режими яких також можуть накладатися;
- наявність високочастотних ударних технологій;
- крокові механізми, крокові двигуни;
- джерела вторинного живлення, наприклад, на основі ШПП;
- паралельна робота в періодичних режимах «увімкнено/вимкнено» низки промислових навантажень (наприклад, холодильників, імпульсних навантажень);
- складні (складені) навантаження з імпульсним відбором потужності;
- комплекси з кроковими датчиками;
- електротехнології з переривчастим відбором струму різної форми;
- генерація та поширення кондуктивних завад, оцінка їхнього впливу на критичні елементи системи.

Звичайно, процес функціонування більшості наведеного обладнання та приладів є стохастичним. Однак для окремих інженерних розрахунків (наприклад, попередньої оцінки умов функціонування, проведення експрес-аналізу) режими роботи можна представити детермінованими функціями з циклічно-змінюваними параметрами.

## **2. Принципи аналізу (моделювання) ЕТК-Smart як систем з періодично змінюваними параметрами**

Застосування ЕТК-Smart зумовлює прискіпливу увагу до аналізу усталених та перехідних, у тому числі й модульованих, режимів, у випадку формування різноманітних графіків протікання енерготехнологічних та технологічних процесів, електроживлення різноманітних типів навантажень тощо [4, 7, 9, 10].

Різні типи ПЕЕ та навантажень в ЕТК-Smart мають різкозмінний характер споживання електроенергії. Вони обумовлюють режими, яким відповідають модульовані по амплітуді та фазі напруга і струм. Як наслідок, виникає необхідність моделювання електромагнітних процесів в ЕТК-Smart на інтервалі часу, який перевищує періоди роботи генераторів і перетворювачів (далі цей інтервал часу назвемо періодом технологічного процесу  $T_T$ ), врахування при цьому різних типів модуляції діючих сигналів та функцій зміни параметрів елементів, врахування нелінійностей та параметричних залежностей окремих елементів, які є суттєвими для функціонування ЕТК-Smart. Виникає задача формування відповідних типів математичних моделей та алгоритмів аналізу [11 – 15].

У переважній більшості випадків для аналізу електромагнітних процесів у виділених ЕТК-Smart здійснюють лінеаризації характеристик, однак прагнення лінеаризувати всі суттєво нелінійні процеси в багатьох випадках не дозволяє вирішити поставлені задачі [7, 15, 16]. Цілу низку важливих та

принципових задач електротехніки та силової електроніки неможливо вирішити без урахування нелінійних залежностей. До таких випадків, наприклад, відносять кусочно-постійні ступеневі зміни амплітуди коливань, збудження в генераторах вищих гармонік, захват частоти генератора тощо [7, 15].

Перехідні процеси в нелінійних електричних колах описуються нелінійними диференціальними рівняннями, загальних методів інтегрування яких не існує. На нелінійні кола не поширюється принцип суперпозиції, тому засновані на ньому методи, зокрема класичний або з використанням інтеграла Дюамеля, для розрахунку даних кіл непридатні. Аналіз перехідних режимів в ЕТК-Smart вимагає використання динамічних характеристик нелінійних елементів, які, у свою чергу, залежать від динамічних процесів, що відбуваються в них, і, отже, у загальному випадку наперед невідомі. Для інтегрування нелінійних диференціальних рівнянь розроблена велика кількість різноманітних математичних методів для їх обчислення, орієнтованих на різні типи рівнянь.

Для задач електротехніки всі методи розрахунку за своєю сутністю можуть бути розділені на три групи [7, 15, 16]:

- аналітичні методи, що припускають або аналітичне вираження характеристик нелінійних елементів, або їхню кусочно-лінійну апроксимацію;
- графічні методи, основними операціями у яких є графічні побудови, часто супроводжувані допоміжними обчислювальними етапами;
- чисельні методи, засновані на заміні диференціальних рівнянь алгебраїчними для збільшення перемінних за відповідні інтервали часу.

Вибір методу аналізу ЕКТ визначається структурою та характеристиками використаних моделей, елементів, які можуть бути лінійними, нелійними та параметричними [15, 17, 18]. Так, нелінійність конкретних елементів може бути суттєвою та несуттєвою. Суттєва нелінійність, на відміну від несуттєвої, частіше за все є причиною принципово нових явищ, які неможливі у лінійних колах, та у багатьох випадках лежать в основі принципу роботи пристроїв.

У випадках, коли точність аналізу ЕКТ не є необхідною, для розв'язання диференціальних рівнянь низьких порядків можна застосовувати графічні та інші наближені методи [7, 15]. Позитивом наближених методів є зручність їх практичного використання та можливість отримання розв'язку в загальному вигляді, в аналітичній формі. Це дозволяє дослідити в загальному вигляді вплив різних факторів на протікання перехідних процесів, визначити області значень параметрів, які допускають практичний розв'язок тощо. Однак для розв'язку задачі у загальному вигляді необхідно приймати додаткові припущення або обмеження, накладені або на клас схем, або на співвідношення між параметрами схеми, або на режими роботи перетворювача, або на вид збуджуючих факторів тощо.

Після широкого впровадження обчислювальної техніки поширення набули чисельні методи [7, 17 – 19]. Однак вони мають той само суттєвий недолік, що і графічні: отриманий розв'язок відповідає конкретному випадку, для якого задані конкретні параметри та початкові умови.

Цього недоліку немає у аналітичних методів, які хоча також звичайно є наближеними, однак існує можливість дослідження поведінки електричного кола при зміні окремих параметрів [7, 15, 17].

### **3. Розвиток можливостей методу окремих складових для моделювання усталених режимів у ЕТК-Smart**

Здійснення аналізу електромагнітних процесів у ЕТК-Smart із змінюваними параметрами та  $RL$ -навантаженням для складних періодичних функцій включає:

- 1) побудова графіків або таблиць залежностей циклічних змін параметрів електричного кола від часу, у однаковому масштабі, визначення функцій генератора  $U_T(t)$  та навантаження  $Z(t)$ ;
- 2) побудова зображень функцій генератора  $U(p)$  та навантаження  $Z(p)$  за допомогою перетворень Лапласа:  $U(p) = L\{U_T(t)\}$ ,  $Z(p) = L\{Z(t)\}$ ;
- 3) побудова зображень функцій струмів відповідно до закону Ома в операторній формі:  $I(p) = U(p) / Z(p)$ ;
- 4) знаходження оригіналів струмів за допомогою оберненого перетворення Лапласа  $i(t) = L^{-1}\{I(p)\}$ .

#### **Особливості аналізу системи у разі нелінійних елементів**

При аналізі систем, які містять нелінійні елементи, необхідно передбачати етап лінеаризації нелінійностей та визначення моментів часу  $t_i$ , коли необхідно здійснити перехід від апроксимації нелінійного елемента  $i$ -ю лінійною залежністю до апроксимації  $(i+1)$ -ю лінійною залежністю.

Для визначення моментів часу  $t_i$  в загальному випадку потрібно задіяти ітераційну процедуру розрахунку з послідовним уточненням таких моментів часу.

Також зазначимо, що за рахунок лінеаризації нелінійних елементів кількість інтервалів сталості структури, на яких параметри елементів ЕТК-Smart є незмінними, зростає. Проте методологія розрахунку електромагнітних процесів, розглянута у попередніх підрозділах дисертаційного дослідження, залишиться

без змін.

**Врахування при аналізі внутрішнього опору генератора  $R_G$  та лінії передачі  $R_L$ .**

Алгоритм врахування при аналізі внутрішнього опору генератора  $R_G$  та лінії передачі  $R_L$ :

- 1)  $R_{ВН} = R_G + R_L = 0$ ;  $E_{ЕКВ}^{(1)}(t) = E(t)$ ;
- 2) Перший крок ітераційного процесу: розрахунок миттєвих значень струму  $i_H^{(1)}(t)$  у виділеному контрольованому перетині;
- 3) Визначення параметрів еквівалентного генератора  $E_{ЕКВ}^{(2)}(t) = E_{ЕКВ}^{(1)}(t) - R_{ВН} \cdot i_H^{(1)}(t)$ ;
- 4) Другий крок ітераційного процесу: розрахунок миттєвих значень струму  $i_H^{(2)}(t)$  у виділеному контрольованому перетині;
- 5) Визначення параметрів еквівалентного генератора  $E_{ЕКВ}^{(3)}(t) = E_{ЕКВ}^{(2)}(t) - R_{ВН} \cdot i_H^{(2)}(t)$ ;
- 6) За результатами оцінки норми  $\| E_{ЕКВ}^{(3)}(t) - E_{ЕКВ}^{(2)}(t) \| \leq \epsilon_E$ ,  $\epsilon_E$  – точність апроксимації, визначається умова доцільності переходу на наступний крок ітераційного процесу.

Для інженерних розрахунків часто буває достатньо двох чи трьох кроків ітераційних процесів аналізу.

**Аналіз процесів при стрибкоподібній зміні параметрів реактивних елементів (індуктивності  $L$  та ємності  $C$ ).**

У разі стрибкоподібної зміни параметрів індуктивності  $L$  та ємності  $C$  у сформованій моделі системи, що розглядається, необхідно врахувати умови некоректної комутації в моменти  $t_i$  зміни параметрів реактивних елементів. Згідно з умовами некоректної комутації для реактивних елементів у моменти часу  $(t_i - 0)$  та  $(t_i + 0)$  має виконуватися принцип безперервності поточкозчеплення, тобто  $i(t_i - 0)L_{i-1} = i(t_i + 0)L_i$ .

Надалі розглянемо випадок стрибкоподібної зміни параметрів індуктивності  $L$  на двох інтервалах часу на період  $[0, T]$ . Наведений підхід надалі може бути поширеним на схеми моделювання за збільшення інтервалів стрибкоподібної зміни параметрів індуктивності  $L$  та ємності  $C$ .

Покладемо, що для 1-го та 2-го інтервалів часу (відповідно  $[0, t_1]$  та  $[t_1, T]$ ) величина індуктивності складає відповідно  $L_1$  та  $L_2$ .

Для моментів часу  $t_1$  та  $T$  запишемо безперервності поточкозчеплення для індуктивності  $L$ :

$$i(t_1 - 0)L_1 = i(t_1 + 0)L_2; i(T - 0)L_2 = i(T + 0)L_1. \quad (1)$$

Виконання принципу безперервності поточкозчеплення в моменти зміни параметрів індуктивності призведе до стрибкоподібної зміни значень струму в моменти  $(t_1 + 0)$  та  $(T + 0)$  у порівнянні відповідно з моментами часу  $(t_1 - 0)$  та  $(T - 0)$ :

$$i(t_1 + 0)L = i(t_1 - 0)L_1; i(T + 0)L = i(T - 0)L_2. \quad (2)$$

Розрахунок електромагнітних процесів має здійснюватися з врахуванням співвідношень (1) та (2), тобто за врахування стрибків струму в моменти зміни параметрів індуктивності  $L$ .

Для цього також може бути задіяний ітераційний процес. Як один із способів організації ітераційного розрахунку можна запропонувати на першому кроці здійснити розрахунок з усередненими значеннями індуктивності  $L_{CP1} = (L_1 + L_2) / 2$  чи  $L_{CP2} = (L_1 \cdot t_1 + L_2 \cdot (T - t_1)) / T$ .

**4. Аналіз впливу періодичних кондуктивних завод на електромагнітні процеси в елементах ЕТК-Smart з перетворювачами електроенергії**

**Дія заводи на змінному струмі**

Нехай лінія змінного струму характеризується активним опором  $R_L$  та реактивним елементом  $L_L$ . Покладемо, що у виділеній системі до лінії підключено джерело змінного струму з частотою  $f_M$ . Для розробки алгоритму оцінки дії періодичних завод на змінному струмі використаємо метод накладання з поєднанням методу розщеплення сигналів (представлення функції еквівалентного генератора дією кількох генераторів).

Алгоритм оцінки дії періодичних завод на змінному струмі містить наступні кроки:

1. Ідентифікація наявності періодичних завод  $U_3(t)$  у лінії змінного струму;
2. Ідентифікація параметрів періодичної функції заводи  $U_3(t)$ , наприклад, амплітуди  $U_{M3}$ , частоти  $f_3$  у разі дії синусоїдальної заводи;
3. Ідентифікація параметрів реактивних елементів, наприклад, індуктивності  $L_3$ , які можуть додатково «індукуватися» (викликатися) дією заводи на частоті  $f_3$  в лінії змінного струму. Можливі ситуації, коли значення, наприклад, індуктивності, таких «індукованих» реактивних елементів будуть нульові або такі малі за величиною, що ними можна знехтувати ( $L_3 = 0$ ).

4. Розрахунок струму  $i_3(t)$  в лінії змінного струму з параметрами  $R_L$  та  $L$  ( $L = L_L + L_3$ ) у разі дії

періодичної завади  $U_3(t)$ ;

5. Розрахунок діючого та максимального значень струму для функції  $i_3(t)$  на періоді  $T_3 = 1 / f_3$ .

6. Аналіз додаткових (привнесених) втрат енергії в лінії змінного струму на активному елементі  $R_L$  у разі дії завади періодичної форми  $U_3(t)$ :

– потужність втрат на активному елементі лінії у разі дії завади:

$$P_3 = R_L \cdot I_{3d}^2;$$

– втрати енергії від дії завади на виділеному інтервалі часу  $T_T$ :

$$W_{д,Т} = P_3 \cdot T_T;$$

7. Розрахунок максимальної накопиченої електромагнітної енергії на реактивному елементі  $L$  у разі дії завади:

$$W_{L3} = L \cdot I_{3M}^2 / 2,$$

де  $I_{3M}$  – максимальне значення струму у лінії, обумовленого дією періодичних завад;

8. Оцінка впливу завад на електромагнітні процеси в лінії змінного струму. Можна здійснити на основі аналізу коефіцієнтів:

$$K_{31} = P_3 / Q_3; \quad K_{32} = (P_3 \cdot f_M) / (P_{AC} \cdot f_3),$$

де  $P_{AC}$  – потужність втрат у лінії у разі дії змінної напруги.

За цим же алгоритмом можна оцінити сумарний вплив одночасної дії кількох завад, а також парціальний внесок у загальне спотворення дії окремої завади.

#### **Дія завади на постійному струмі**

Нехай лінія постійного струму характеризується активним опором  $r_L$ .

Алгоритм оцінки дії періодичних завад на постійному струмі включає такі кроки:

1. Ідентифікація наявності періодичних завад  $U_3(t)$ .

2. Ідентифікація параметрів періодичної функції  $U_3(t)$ : форми, зокрема, амплітуди  $U_{M3}$ , частоти  $f_3$ .

3. Ідентифікація параметрів реактивних елементів, наприклад, індуктивності  $L$ , які «індукуються» (викликаються) дією завади на частоті  $f_3$  в лінії постійного струму. Можливі ситуації, коли значення цих реактивних елементів будуть нульові або такі малі за значеннями, що ними можна знехтувати ( $L = 0$ ).

4. Розрахунок струму  $i_3(t)$  в лінії постійного струму з параметрами  $R_L$  у разі дії періодичної завади  $U_3(t)$ .

5. Розрахунок діючого значення струму для функції  $i_3(t)$  на періоді  $T_3 = 1 / f_3$ .

6. Аналіз додаткових (привнесених) втрат енергії в лінії постійного струму у разі дії завади періодичної форми  $U_3(t)$ :

– потужність втрат на активному елементі у разі дії завади

$$P_3 = R_L \cdot I_{3d}^2;$$

– втрати енергії від дії завади на виділеному інтервалі часу  $T_T$ :  $W_{д,Т} = P_3 \cdot T_T$ .

7. Аналіз потужність накопичення електромагнітної енергії на реактивному елементі  $L$  при дії завади:

$$Q_3 = R_L \cdot I_{3M}^2 / 2,$$

де  $I_{3M}$  – максимальне значення струму в лінії, обумовленого дією періодичних завад.

8. Оцінка впливу завад на електромагнітні процеси в лінії постійного струму. Можна здійснити на основі аналізу коефіцієнтів:

$$K_{31} = P_3 / Q_3; \quad K_{32} = P_3 / P_{CD},$$

де  $P_{CD}$  – потужність втрат у лінії у разі дії постійної напруги.

#### **5. Основи методичного забезпечення оцінки енергоефективності ЕТК-Smart як елементів інтелектуальних систем електроживлення**

Розроблену методологію аналізу доцільно застосовувати у разі аналізу груп навантажень щодо їх узгодженого / неузгодженого включення, оцінки можливості зміщення моментів включення, оптимізації графіків відбору потужності (графіків навантажень) за реалізації механізмів керування попитом (Demand Side Management, DSM), а також оцінки рівнів узгодженості керування змінними навантаженнями та генераторами, аналізу впливу завад, коли період дії основного сигналу та завади не співпадають.

Розроблена методологія аналізу може бути застосована у разі вибору фільтрокомпенсуючих пристроїв, аналізу процесів у трансформаторно-ключових виконавчих структурах, стабілізаторах напруги, трансформаторах, регульованих під напругою.

Власне побудова аналітичних виразів для миттєвих значень струму та побудова відповідних інтегральних показників (характеристики) в аналітичному вигляді дає можливість здійснювати експрес-аналіз у разі проведення електротехнічного обстеження (енергоаудиту) виділених типів електротехнічних комплексів. У цьому випадку буде забезпечуватися єдиний методологічний підхід до розгляду локальних систем, що працюють на змінному, постійному чи постійно/змінному струмі. Вона також може бути однотипно використана як у разі аналізу електромагнітних процесів, так і у разі формування законів

керування в аналітичному вигляді для систем керування. Аналітичні вирази можуть бути побудовані у разі розгляду періодичних функцій напруги та струму на інтервалі часу, який описує циклічну зміну параметрів, що значно перевищує період мережевої напруги.

Нижче представлено характеристики алгоритму (методичного забезпечення) електротехнічного обстеження (енергоаудиту) електротехнічних Smart-комплексів і Концепції формування (побудови) та модернізації (оптимізації) ЕТК-Smart для побудови енергетичної інфраструктури інтелектуального міста.

**Алгоритм (методичне забезпечення) електротехнічного обстеження (енергоаудиту) електротехнічних комплексів**

1. Загальна оцінка виділеного для розгляду електротехнічного комплексу (Microgrid).
2. Виділення значимих та незначимих електромагнітних процесів.
3. Визначення контрольованих перетинів у структурній схемі Microgrid, тобто перетинів, де здійснюється аналіз.
4. Для кожного  $i$ -го виділеного перетину  $\Pi_i$  із множини контрольованих перетинів  $\{\Pi_i\}$  визначення форми еквівалентного генератора напруги  $E_{ЕКВ}(t)$  та еквівалентного навантаження  $Z_{ЕКВ}(t)$ .
5. Ідентифікація параметрів еквівалентного генератора напруги  $E_{ЕКВ}(t)$  та еквівалентного навантаження  $Z_{ЕКВ}(t)$ ; здійснення за необхідності апроксимації функцій  $E_{ЕКВ}(t)$  та  $Z_{ЕКВ}(t)$  сумою базових функцій (синусоїдальні, експоненціальні, кусково-лінійні функції).
6. Побудова моделі електромагнітного процесу, тобто формування системи рівнянь, які описують процеси у  $i$ -го виділеного перетину.
7. Розрахунок струму  $i(t)$  в аналітичному вигляді – побудова аналітичного розв’язку за допомогою розробленого алгоритмічно-програмного забезпечення аналізу.
8. Оцінка нормальних, граничних та екстремальних режимів роботи електротехнічних комплексів у виділених контрольованих перетинах.
9. Оцінка інтегральних характеристик (показників) функціонування еквівалентного генератора  $E_{ЕКВ}(t)$  та еквівалентного навантаження  $Z_{ЕКВ}(t)$  для  $i$ -го виділеного контрольованого перетину.
10. Оцінка рівня енергоефективності функціонування Microgrid в цілому.
11. За необхідності розробка та видача рекомендацій щодо оптимізації (зміни) параметрів, режимів та структури електротехнічного комплексу.
12. Підготовка узагальнених висновків.

**Елементи Концепції формування (побудови) та модернізації (оптимізації) ЕТК-Smart для побудови енергетичної інфраструктури інтелектуального міста:**

1. Загальна характеристика Smart-мікрорайону інтелектуального міста.
2. Визначення основних напрямків розвитку Smart-мікрорайону інтелектуального міста з точки зору формування окремих типів Microgrid.
3. Визначення меж Smart-мікрорайону інтелектуального міста.
4. Оцінка доцільності введення додаткових ступенів трансформації напруги (амплітуди та частоти), роботи системи на постійному струмі.
5. Оцінка доцільності використання пристроїв силової електроніки.
6. Формування загальної ієрархії Microgrid за секторами застосування.
7. Розгляд Microgrid  $i$ -го рівня.
8. Визначення напрямків застосування змінного та постійного струму.
9. Залучення нових Smart-технологій для забезпечення електроживлення конкретної групи споживачів / навантажень (одного споживача / навантаження).
10. Формування узагальнених макромоделей з використанням операцій декомпозиції та редукції.
11. Формування переліку блоків Microgrid  $i$ -го рівня, де потрібно здійснити уточнення режимів, параметрів чи структури системи (прив’язка структури Microgrid до місця, вибір об’єктів для модернізації).
12. Задання меж зміни параметрів; проведення аналітичних розрахунків процесів; формування системи інтегральних характеристик (показників), які описують якість електроенергії та / чи якість електроживлення.
13. Вибір оптимальних параметрів чи режимів Microgrid  $i$ -го рівня.
14. Оцінка нормальних та / чи екстремальних режимів функціонування окремих Smart-технологій.
15. Оцінка показників (характеристик) енергоефективності функціонування Smart-мікрорайону інтелектуального міста.
16. Оцінка екологічних та соціальних факторів функціонування Smart-мікрорайону інтелектуального міста.

Мета Концепції – оптимізації параметрів, режимів та структури елементів Smart-технологій для енергетичної інфраструктури інтелектуального міста.

---

Основними технічними рішення з впровадження Smart Grid для побудови Smart City є [3]:

– створення єдиного диспетчерського центру керування енергосистемою з високим ступенем автоматизації, використанням «великих даних» (Big Data), можливостями безпосереднього керування компенсаторними потужностями та споживанням;

– скорочення радіусу енергозабезпечення шляхом застосування генераторів електроенергії малої та середньої потужності як основних та компенсаторних потужностей генерації електроенергії, зокрема газових міні-ТЕЦ в межах житлових комплексів та мікрорайонів, станцій спалювання біогазу та сміття та вітрогенераторів у передмістях;

– поширення використання сонячних батарей, зокрема, на дахах муніципальних будівель та багатоквартирних будинках;

– поширення використання локальних накопичувачів електроенергії, зокрема домашніх акумуляторів;

– поширення застосування систем «розумний будинок» / Microgrid з власними джерелами генерації та накопичення електроенергії;

– інтеграція систем енергозабезпечення громадського електротранспорту до єдиної мережі Smart Grid, використання електромобілів у екстрених та комунальних службах, у тому числі мобільних резервних джерел енергії;

– створення мережі енергоцентрів на базі станцій зарядки електромобілів та паркінгів, пов'язаних напряму з локальними потужностями сонячної енергетики.

## 6. Приклади аналізу

### Приклад 1.

Розглянемо приклад розрахунку струму для випадку прямокутного сигналу генератора, коли загальний період роботи схеми складає  $T_T = 8T_0$ , значення  $L = 0,01$  Гн,  $T_0 = 0,02$  с, амплітуда напруги завади  $U = 20$  В, а активний опір та напруга змінюються на кожному інтервалі, у першому випадку активний опір спадає на кожному півперіоді роботи схеми (графіки наведено на рис. 1), у другому випадку – зростає (графіки наведено на рис. 2). Значення  $R$  та  $U$  наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Значення  $R$  та  $U$  за розрахунку струму для випадку прямокутного сигналу генератора

Випадок 1	Номер інтервалу							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{i, В}$	20	40	60	20	-20	-60	-40	-20
Випадок 1 $R_{i, А}$	60	50	30	20	60	50	30	20
Випадок 2 $R_{i, А}$	20	30	50	60	20	30	50	60

Розраховані струми на рис. 1 та 2 демонструють залежність між значенням напруги та еквівалентного опору (за законом Ома) на  $i$ -му ( $i = 1, \dots, 8$ ) інтервалі.

### Приклад 2.

Для дослідження впливу імпульсних завод на роботу навантаження будемо за допомогою генератора періодичних імпульсів подавати прямокутні завади змінної полярності в систему з синусоїдальною напругою.

Розглянемо два випадки завади:

- 1) імпульсна завада на кожному з півперіоді складається з двох однополярних імпульсів (рис. 3);
- 2) імпульсна завада на кожному з півперіоді складається з двох різнополярних імпульсів (рис. 4)

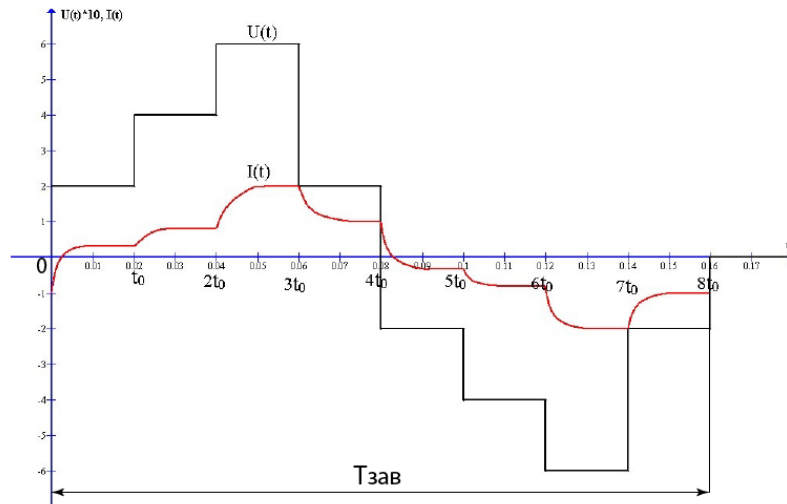


Рис. 1 – Графік напруги та струму заводи у разі зменшення активного опору

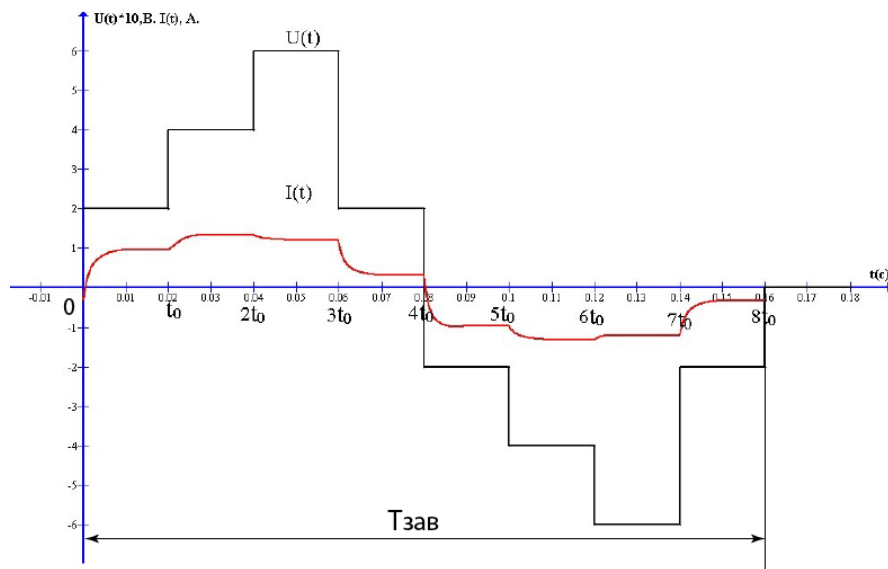


Рис. 2 – Графік напруги та струму заводи у разі зменшення активного опору

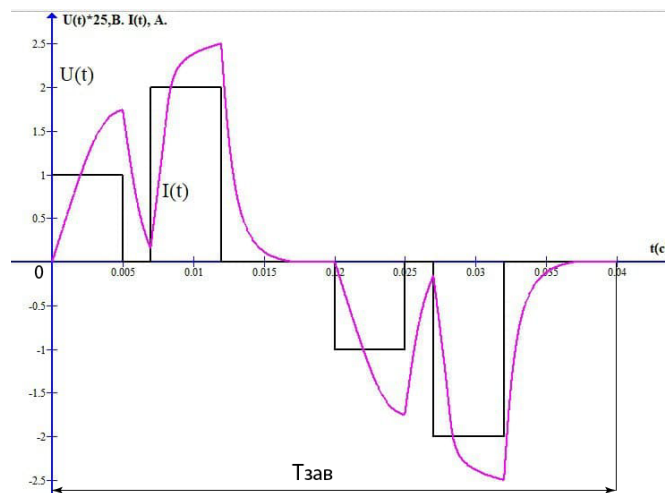


Рис. 3 – Графік струму та напруги заводи при збільшенні напруги та зменшенні активного опору



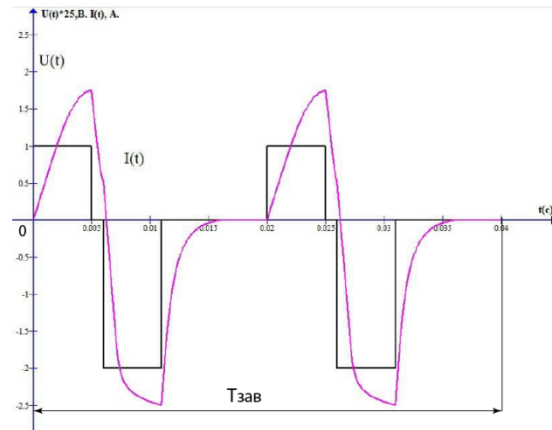


Рис. 4 – Графік струму та напруги завади при збільшенні напруги та зменшенні активного опору

Розраховані струми на рис. 3, 4 відображають однополярність та різнополярність імпульсів завад на півперіоді та величину шпаркості імпульсної послідовності.

**Приклад 3.** Розглянемо випадок розрахунку завади у вигляді синусоїдального сигналу, період якої вдвічі більший за період роботи схеми. Для прикладу використаємо значення  $L=0,05$  Гн,  $T_0=0,01$  с,  $T_{зав}=4T$ , амплітуда напруги завади  $U=20$  та  $10$  В, а активний опір (в омах) змінюється на кожному інтервалі  $T$  – у нашому випадку спадає ( $R_1=50, R_2=40, R_3=30, R_4=20$ ), графіки наведено на рис. 5, 6.

У даному випадку завада являє собою модульований синусоїдальний сигнал, причому на півперіоді  $T_{зав}/2$  послідовність двох «півсинусоїд» може бути як різнополярна (рис. 5), так і однополярна (рис. 6).

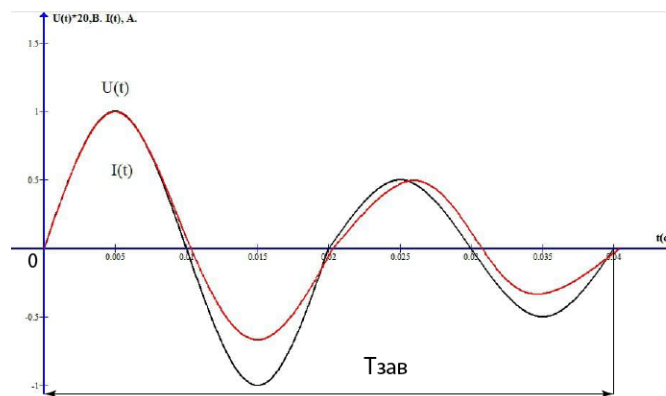


Рис. 5 – Графік напруги та струму завади за зменшення активного опору та зменшення напруги

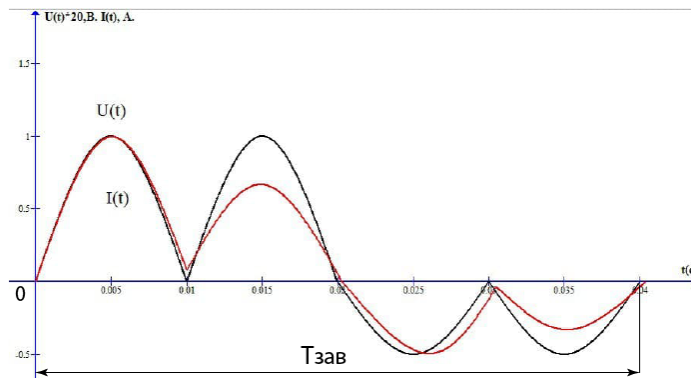


Рис. 6 – Графік напруги та струму завади за зменшення активного опору та зменшення напруги

Розрахований струм при дії модульованих періодичних завад (див. рис. 6) являє також модульований періодичний сигнал, форма якого визначається як дією періодичної модульованої напруги, так і наявності *RL*-навантаження.

#### **Висновки**

1. Проаналізовано науково-технічні проблеми, пов'язані з функціонуванням окремих типів ЕТК-Smart, визначено особливості аналізу електротехнічних комплексів з нелінійними елементами шляхом аналізу процесів у разі змін активних та реактивних навантажень, що дає змогу враховувати відповідні зміни параметрів при розрахунках електромагнітних процесів за допомогою аналітичних методів. Удосконалено методологію оцінки впливу кондуктивних періодичних завад на протікання усталеного режиму в ЕТК-Smart.

2. Сформульовано алгоритми розрахунку струмів у електричних комплексах з циклічно змінюваними параметрами, а також аналізу впливу періодичних кондуктивних завад в елементах ЕТК-Smart з перетворювачами електроенергії на основі розвитку можливостей методу окремих складових при моделюванні усталених режимів, що дозволяє здійснювати автоматизацію відповідних розрахунків за допомогою обчислювальної техніки.

3. Запропоновано алгоритм електротехнічного обстеження (енергоаудиту) електротехнічних комплексів шляхом застосування запропонованих аналітичних виразів та узагальненого алгоритму розрахунку електромагнітних процесів у електричних комплексах з циклічно змінюваними параметрами, що дає змогу здійснювати відповідні оцінки енергоефективності функціонування Microgrid.

4. Запропоновано концепцію формування (побудови) та модернізації оптимізації елементів Smart-технологій для Smart-мікрорайону інтелектуального міста шляхом розроблення алгоритму здійснення відповідних досліджень і оцінок та формування мережі Microgrid (ЕТК-Smart з перетворювачами електроенергії) кількох рівнів ієрархії, що дозволяє здійснювати вибір оптимальних параметрів Microgrid та оцінку загальних показників енергоефективності функціонування Smart-мікрорайону інтелектуального міста.

#### **Список використаної літератури**

1. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
2. Денисюк С.П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 1. – С. 7–21.
3. Denysiuk S., Melnychuk H. Decentralization of city energy supply systems in the conditions of technological transformations and formation of intellectual cities (smart city). Scientific foundations of modern engineering. Monograph. BOSTON (USA), 2020 P.181-204.
4. Denysiuk S., Strzelecki R., Opryshko V. The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – №4 (46). – С.7–17.
5. Мікромережі: світовий досвід та можливості для України. – <http://energycooperative.org.ua/2017/09/28/>
6. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія / П.Д. Лежнюк, О.А. Ковальчук, О.В. Нікіторович, В.В. Кулик. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 204 с.
7. Кириленко О.В., Жуйков В.Я., Денисюк С.П., Рибіна О.Б. Системи силової електроніки та методи їх аналізу. – К.: Текст, 2006. – 488 с.
8. Benysek G., Kazmierkowski M.P., Popczyk J., Strzelecki R. Power electronic systems as a crucial part of Smart Grid infrastructure – a survey. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, Vol. 59, No. 4, 2011. – P. 455–473.
9. Жежеленко И.В., Шидловский А.К., Пивняк Г.Г. и др. Электромагнитная совместимость потребителей. – М.: Машиностроение, 2012.
10. Hopkins D.C., Safiuddin M. Power electronics in a smart-grid distribution system. APEC – 10. 2010. Palm Springs, CA. 83 p.
11. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Застосування перетворення Лапласа для аналізу електромагнітних процесів в системах з циклічно змінюваними параметрами елементів // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2003. – № 3(6). – С. 102–108.
12. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Побудова перетворення Лапласа при аналізі електромагнітних процесів у комплексах з циклічно змінюваними параметрами // Електроніка та зв'язок. – 2005. – № 26. – С. 29 – 36.
13. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Формування системи рівнянь змінних стану для розрахунку

процесів у електричних комплексах з циклічно змінними режимами // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2005. – № 3(12). – С. 132–137.

14. Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Енергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами. – К.: Текст, 2010. – 264 с.

15. Жуйков В.Я., Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Моделювання систем з перетворювачами електроенергії з циклічно-змінюваними параметрами. – К.: ТОВ «Наш формат», 2018. – 165 с.

16. Руденко В.С. Жуйков В.Я., Коротеєв І.Е. Расчет устройств преобразовательной техники. –К.: Техніка, 1980. – 136 с.

17. Шидловський А.К., Кириленко О.В., Жуйков В.Я. Оцінка стану та перспективи розвитку методів аналізу електромагнітних процесів в перетворювачах електроенергії // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2005. – Ч. 1. – С. 3–16.

18. Белов В.Ф., Буткина А.А., Шамаев А.В. Математическое моделирование систем преобразования электрической энергии для микросетей // Автоматизация процессов управления. – 2014. – № 2 (36). – С. 43–51.

19. Автоматизированное проектирование силовых электронных силовых электронных схем / Жуйков В.Я., Сучик В.Е., Андриенко П.Д., Еременко М.А. – К.: Техніка, 1988. – 132 с.

**S. Denysiuk**, Dr. Sc. Sciences, Prof., ORCID 0000-0002-6299-3680

**M. Kolomiichuk**, student, ORCID 0000-0002-7967-6112

**National Technical University of Ukraine**

**"Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"**

**H. Melnychuk**, master of industrial electronics, ORCID 0000-0002-8173-0472

**Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine**

## **DEVELOPMENT OF POSSIBILITIES OF THE METHOD OF INDIVIDUAL COMPONENTS FOR ANALYSIS OF MODES IN ELECTRICAL SMART- COMPLEXES**

*The peculiarities of the formation of the local power system according to the concept of Smart Grid requires a qualitatively new architecture of the power supply system and new principles of operation - both at the level of technical solutions and mechanisms of organizational interaction at the technological level and financial calculations. The scientific and technical problems connected with functioning of separate types of electrotechnical Smart-complexes (ETK-Smart) are analyzed, features of the analysis of electrotechnical complexes with nonlinear elements by the analysis of processes in case of changes of active and reactive loadings that allows to consider corresponding changes of parameters at calculations of electromagnetic processes using analytical methods. The methodology for assessing the impact of conductive periodic interference on the flow of the steady state in electrical Smart-complexes has been improved. The principles of analysis (modeling) of ETC-Smart as systems with periodically changing parameters are considered. It is shown that the use of ETC-Smart requires meticulous attention to the analysis of steady-state and transient, including modulated, modes, in the case of formation of different schedules of energy and technological processes, power supply of various types of loads, etc. Algorithms for calculating currents in electrical complexes with cyclically variable parameters, as well as analysis of the influence of periodic conductive interference in ETC-Smart elements with power converters based on the development of the capabilities of the method of individual components in modeling steady-state modules. Thus, algorithms for analysis of electromagnetic processes in ETC-Smart with variable parameters and RL-load for complex periodic, system analysis in case of nonlinear elements, analysis of internal resistance of generator and transmission lines, analysis of processes in abrupt change of parameters of reactive elements (inductance  $L$ ) and capacitance  $C$ ), analysis of the influence of periodic conductive interference (AC and DC) on electromagnetic processes in the elements of ETC-Smart with power converters The basics of methodological support for assessing the energy efficiency of ETC-Smart as elements of intelligent power supply systems are presented. The algorithm of electrotechnical inspection (energy audit) of electrotechnical complexes by application of the offered analytical expressions and the generalized algorithm of calculation of electromagnetic processes in electric complexes with cyclically variable parameters is offered that allows to carry out the corresponding estimations of energy efficiency of functioning. The concept of formation (construction) and modernization of optimization of elements of Smart-technologies for the Smart-microdistrict of the intellectual city by development of algorithm of realization of the corresponding researches and estimations and formation of the Microgrid network (ETC-Smart with power converters) of several levels of hierarchy is offered. and assessment of the general energy efficiency indicators of*

*the Smart-microdistrict of the intellectual city. The presented examples of analysis confirm the effectiveness of the modification of the method of individual components for the analysis of steady-state ETC-Smart.*

**Keywords:** *electrical Smart-complexes, Microgrid, power converters, modification of the method of individual components, steady state, conductive interference, calculation algorithms, energy efficiency assessment.*

#### REFERENCES

1. Intelligent electrical networks: elements and modes. For the general ed. acad. NAS of Ukraine Kirilenko O. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. - 400 p.
2. Denysiuk S. Technological guidelines for the implementation of the Smart Grid concept in power systems // *Energy: economics, technology, ecology*. - 2014. - № 1. - P. 7–21.
3. Denysiuk S., Melnychuk H. Decentralization of city energy supply systems in the conditions of technological transformations and formation of intellectual cities (smart city). Scientific foundations of modern engineering. Monograph. BOSTON (USA), 2020 P.181-204.
4. Denysiuk S., Strzelecki R., Opryshko V. The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2016. – №4 (46). – С.7–17.
5. Micronetworks: world experience and opportunities for Ukraine. - <http://energycooperative.org.ua/2017/09/28/>
6. Renewable energy sources in distribution electric networks: monograph / Lezhniuk P., Kovalchuk O., Nikitorovich O., Kulik V. - Vinnytsia: VNTU, 2014. - 204 p.
7. Kirilenko O., Zhuikov V., Denysiuk S., Rybina O. Power electronics systems and methods of their analysis. - 2006. – 488 p.
8. Benysek G., Kazmierkowski M., Popczyk J., Strzelecki R. Power electronic systems as a crucial part of Smart Grid infrastructure – a survey. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, Vol. 59, No. 4, 2011. – P. 455–473.
9. Zhezhenko I., Shidlovsky A., Pivnyak G. etc. Electromagnetic compatibility of consumers. - М.: Mashinostroenie, 2012.
10. Hopkins D.C., Safiuddin M. Power electronics in a smart-grid distribution system. APEC – 10. 2010. Palm Springs, CA. 83 p.
11. Denysiuk S., Melnichuk G. Application of Laplace transform for analysis of electromagnetic processes in systems with cyclically variable parameters of elements // *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Coll. Science. pr.* - К.: IED NASU, 2003. - № 3 (6). - P. 102–108.
12. Denysiuk S., Melnichuk G. Construction of Laplace transform in the analysis of electromagnetic processes in complexes with cyclically variable parameters // *Electronics and communication*. - 2005. - № 26. - P. 29 - 36.
13. Denysiuk S., Melnichuk G. Formation of a system of equations of state variables for calculation of processes in electric complexes with cyclically variable modes // *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Coll. Science. pr.* - К.: IED NASU, 2005. - № 3 (12). - P. 132–137.
14. . Zhuikov V., Denysiuk S. Energy processes in electric circuits with key elements. – К.: TEKST, 2010. – 264 p.
15. Zhuikov V., Denysiuk S., Melnichuk G. Modeling of systems with power converters with cyclically variable parameters. - К.: «Nash format», 2018. - 165 p.
16. Rudenko V., Zhuikov V., Koroteev I. Calculation of devices of converting equipment. – К.: Machinery, 1980. - 136 с.
17. Shidlovsky A., Kirilenko O., Zhuikov V. Estimation of a condition and prospects of development of methods of the analysis of electromagnetic processes in converters of the electric power // *Techn. electrodynamics thematic issue "Power Electronics and Energy Efficiency"*. - 2005. - Ch. 1. - P. 3–16.
18. Belov V., Butkina A., Shamaev A. Mathematical modeling of electrical energy conversion systems for micronets // *Automation of control processes*. - 2014. - № 2 (36). - P. 43–51.
19. Автоматизированное проектирование силовых электронных силовых электронных схем / Жуйков В.Я., Сучик В.Е., Андриенко П.Д., Еременко М.А. – К.: Техніка, 1988. – 132 с. Automated design of power electronic power electronic circuits / Zhuikov V., Suchik V., Andrienko P., Eremenko M. - К.: Machinery, 1988. - 132 p.

Надійшла 15.03.2021

Received 15.03.2021

# ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

УДК 658:26

В.І. Дешко, докт. техн. наук, проф., проф. ORCID 0000-0002-8218-3933  
 М.М. Шовкалюк, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-1898-3493  
 Ю.С. Кузьміна, асп. ORCID 0000-0002-4217-4901  
 Національний технічний університет України  
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## БАЗА ДАНИХ СЕРТИФІКАТІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ В УКРАЇНІ: АНАЛІЗ ДЛЯ НОВОГО БУДІВНИЦТВА

Одним із інструментів впливу на зниження споживання ресурсів будівельного фонду є впровадження у нормативну базу вимог щодо підвищення рівня енергоефективності. Із вступом в дію Закону України «Про енергетичну сертифікацію будівель» розробка енергетичного сертифікату стала обов'язковою для нових будівель, будівель державної власності, будівель органів місцевого самоврядування та у випадку залучення державних коштів на їх термомодернізацію. Енергосертифікат розробляється атестованим енергоаудитором і вноситься у відкриту базу в Єдиній державній системі у сфері будівництва. Енергосертифікат містить клас енергетичної ефективності, визначений розрахунковим шляхом за методикою національного стандарту, що розроблено з урахуванням європейських підходів до розрахунків енергоспоживання на різні потреби будівель. Узагальнений аналіз даних з наявних сертифікатів становить значний інтерес для оцінювання характеристик огорожувальних конструкцій, інженерних систем і обладнання та фактичного і розрахункового питомого енергоспоживання різних типів будівель. У даному дослідженні увага авторів була зосереджена на показниках енергоефективності нових будівель (починаючи з 2019 року).

**Ключові слова:** будівля, енергетична сертифікація, клас енергоефективності, енергоспоживання.

### Вступ

Висока енергетична залежність від імпорту ресурсів та великі втрати при транспортуванні енергії до споживача – особливості енергетичної системи України. Найбільшим споживачем енергії наразі є побутовий сектор та промисловість (рис.1). Близько 40% енергії втрачається під час перетворення та транспортування до кінцевого споживача (в той час як в ЄС середній показник становить 32%).



Рисунок 1 - Споживання енергії в Україні, млн. т.н.е. [1]

Однією з найгостріших проблем житлово-комунального господарства (ЖКГ) в Україні є нераціональне використання паливно-енергетичних ресурсів. Впровадження у нормативну базу вимог щодо підвищення рівня енергоефективності будівельного фонду та енергетичної сертифікації будівель – вагомий інструмент впливу на енергоспоживання. В Україні діяльність з енергетичної сертифікації розпочалася з введенням в дію Закону України «Про енергетичну ефективність будівель» [2], що розроблено з урахуванням Директиви ЄС [3]. Впроваджено низку будівельних норм і стандартів, що регламентують вимоги до методів оцінювання показників енергоефективності та енергоаудиту будівель [4,5], а також комплекс нормативно-правових актів [6-9]. З 1-го грудня 2020 року вступила в дію частина третя статті 8 Закону України «Про енергетичну ефективність будівель» в редакції Закону № 199-IX від 17.10.2019, згідно з якою енергетичний сертифікат виготовляється атестованим енергоаудитором [10] з використанням Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва [11], а до цього часу сертифікати вносилися до бази Держенергоефективності [12].

### Мета та задачі

**Метою** статті є аналіз показників енергоефективності нових будівель (проекування, починаючи з 2019 р.), представлених у відкритій базі даних енергетичних сертифікатів України. Задачами дослідження буде порівняльний аналіз наступних показників: опір теплопередачі огорожень, питоме споживання енергії, первинна енергія, питомі викиди CO<sub>2</sub>, клас енергоефективності. Також актуальним буде визначення потенціалу економії енергії порівняно з подібними будівлями в Європейському Союзі.

### Матеріал і результати досліджень

На даний момент сертифіковано близько шести тисяч будівель (їх кількість невпинно зростає), основну частку з яких складають житлові будівлі (рис. 1)

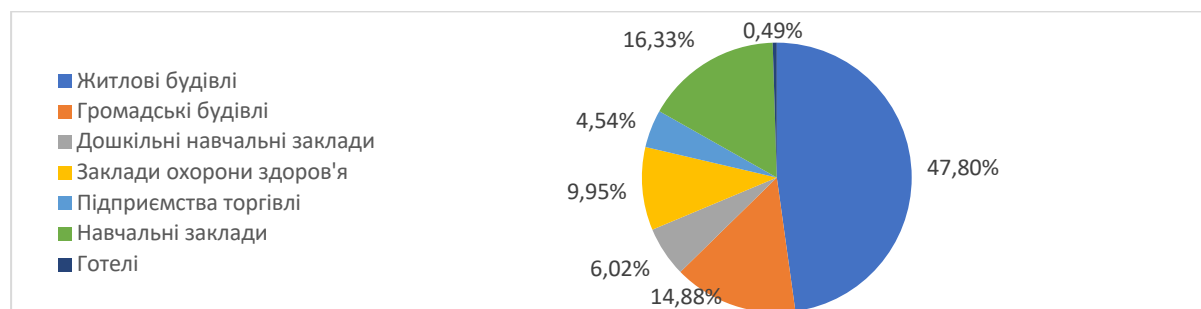


Рисунок 2 - Сертифіковані будівлі в Україні

У таблиці 1 показано результати порівняльного аналізу кількості сертифікованих будівель та їх класів енергоефективності, а у табл.2 – наведено дані у відсотковому відношенні (клас енергоефективності визначено по енергоспоживанню за [6]).

Таблиця 1 - Розподіл кількості сертифікованих будівель за типами та класами енергоефективності

Клас	Житлові будівлі	Громадські будівлі	Дошкільні навчальні заклади	Заклади охорони здоров'я	Підприємства торгівлі	Навчальні заклади	Готелі
A	14	32	2	1	31	0	2
B	105	196	31	35	174	43	6
C	767	140	54	74	47	92	9
D	263	67	33	58	3	81	3
E	204	81	43	70	2	68	3
F	128	71	47	71	1	95	0
G	1276	271	137	265	4	563	5
Σ	2757	858	347	574	262	942	28

Як бачимо, основними закладами, які отримали найнижчий клас (G) серед усіх сертифікованих будівель є навчальні заклади (59,77%) та житловий сектор (46,28%). Питання підвищення енергоефективності житлових будівель, як найбільших споживачів енергоресурсів, набуває все більшої актуальності. Фактично ефективність використання теплової енергії в будівлях України у 3–5 разів нижча,

ніж у західних країнах. Технічні характеристики більшості житлових будинків в Україні не відповідають сучасним вимогам до показників споживання енергоресурсів.

Таблиця 2 – Розподіл сертифікованих будівель за типами та класами енергоефективності, %

Клас	Житлові будівлі	Громадські будівлі	Дошкільні навчальні заклади	Заклади охорони здоров'я	Підприємства торгівлі	Навчальні заклади	Готелі
A	0,51%	3,73%	0,58%	0,17%	11,83%	0,00%	7,14%
B	3,81%	22,84%	8,93%	6,10%	66,41%	4,56%	21,43%
C	27,82%	16,32%	15,56%	12,89%	17,94%	9,77%	32,14%
D	9,54%	7,81%	9,51%	10,10%	1,15%	8,60%	10,71%
E	7,40%	9,44%	12,39%	12,20%	0,76%	7,22%	10,71%
F	4,64%	8,28%	13,54%	12,37%	0,38%	10,08%	0,00%
G	46,28%	31,59%	39,48%	46,17%	1,53%	59,77%	17,86%

Далі в ході дослідження більш детально вивчалися будівлі житлового сектору, (починаючи з 2019 року). Аналізувалися наступні показники енергоефективності: опір теплопередачі зовнішніх стін та світлопрозорих конструкцій, питоме енергоспоживання енергії, первинна енергія, питомі викиди CO<sub>2</sub>.

Потрібно зазначити, що нормативні вимоги щодо визначення класу енергоефективності змінювалися з часом. Так, до вступу в дію нової редакції ДБН «Теплова ізоляція будівель» клас по енергоспоживанню визначався спочатку за методикою [6] з урахуванням витрат на потреби опалення, охолодження та гарячого водопостачання з урахуванням нормативних об'ємних витрат гарячої води, що нормуються в ДБН В.2.5-64:2012 «Внутрішній водопровід та каналізація». З 2021 року при визначенні класу енергоефективності потрібно орієнтуватися на граничні показники витрат на опалення та охолодження за [8], а витрати на гаряче водопостачання наводяться в енергетичному сертифікаті з урахуванням таблиці узагальнених питомих значень енергопотребити з ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [4].

В ході дослідження було виявлено, що з 27 обраних будівель у м.Києві з класом енергоефективності G (по енергоспоживанню) коефіцієнт опору теплопередачі для зовнішніх стін не відповідає нормативному для 23 будівель, а коефіцієнт опору теплопередачі для світлопрозорих конструкцій – для 15 будівель. З обраних 85 будівель з класом енергоефективності C (для аналізу обиралися будівлі у м. Києві типу «нове будівництво або «проект») 20 будівель (23,5%) мають опір теплопередачі стін нижче нормативного. Середнє значення питомого споживання енергії - 84,6кВт·год/м<sup>2</sup>, а середнє значення питомих викидів CO<sub>2</sub> – 34 кг/м<sup>2</sup> в рік.

Розглянемо фактичне споживання всіх житлових будівель нового будівництва класів нижче класу C (по енергоспоживанню за методикою [6]) та проведемо оцінку потенціалу енергозбереження при досягненні максимально допустимого споживання до класу C та класу A з доведенням характеристик огорожень до нормативних значень [5]. Так як питоме споживання для будівель з різною поверховістю різний, розділимо житлові будівлі на 2 групи: 1-3 поверхи та 4 і більше поверхів (рис.3,4).

На рис.3 наведено порівняльну оцінку енергоспоживання житлових будівель нового будівництва (1-3 поверхи) до та після комплексної термомодернізації будівлі з доведенням до класу C та A відповідно (в базі даних представлено 57 таких будівель, енергоспоживання визначалося наростаючим підсумком для можливості оцінювання потенціалу збереження ресурсів). Аналогічно виконано аналіз для рис.4 (в базі представлено 57 будівель на момент проведення дослідження).

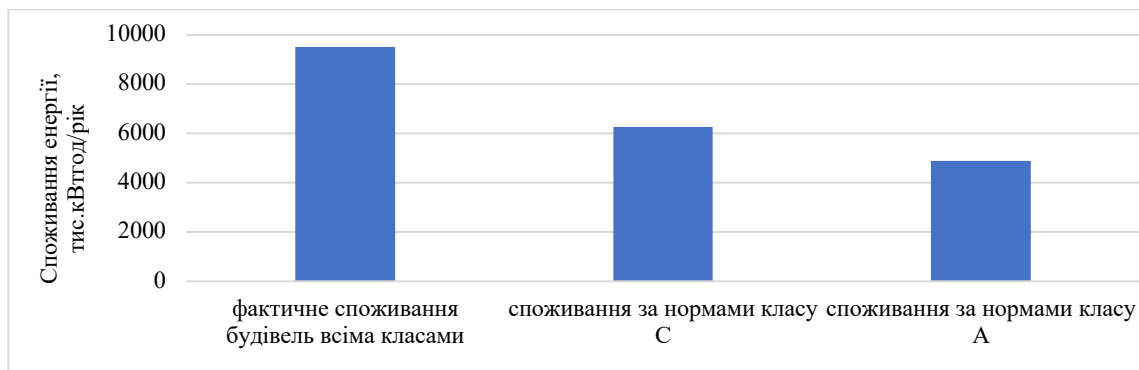


Рисунок 3 – Споживання фактичне та приведенне до норм класу C та A (для будівель 1-3 поверхів)

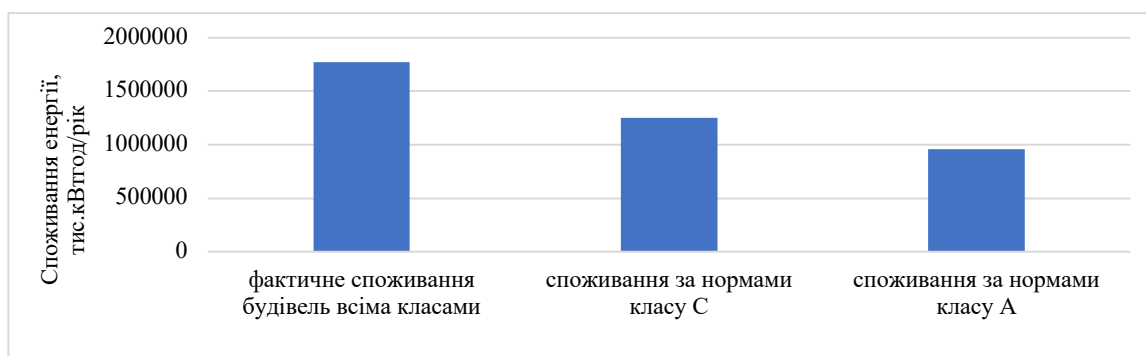


Рисунок 4 – Споживання фактичне та приведені до норм класу С та А (будівлі 4 і більше поверхів)

Розглянемо усі будівлі, сертифікація для яких здійснювалася з 2019 року (нове будівництво або реконструкція) за класами від А до G, щоб визначити середні значення. Житлові будівлі представлено на рис.5, громадські – на рис.6).

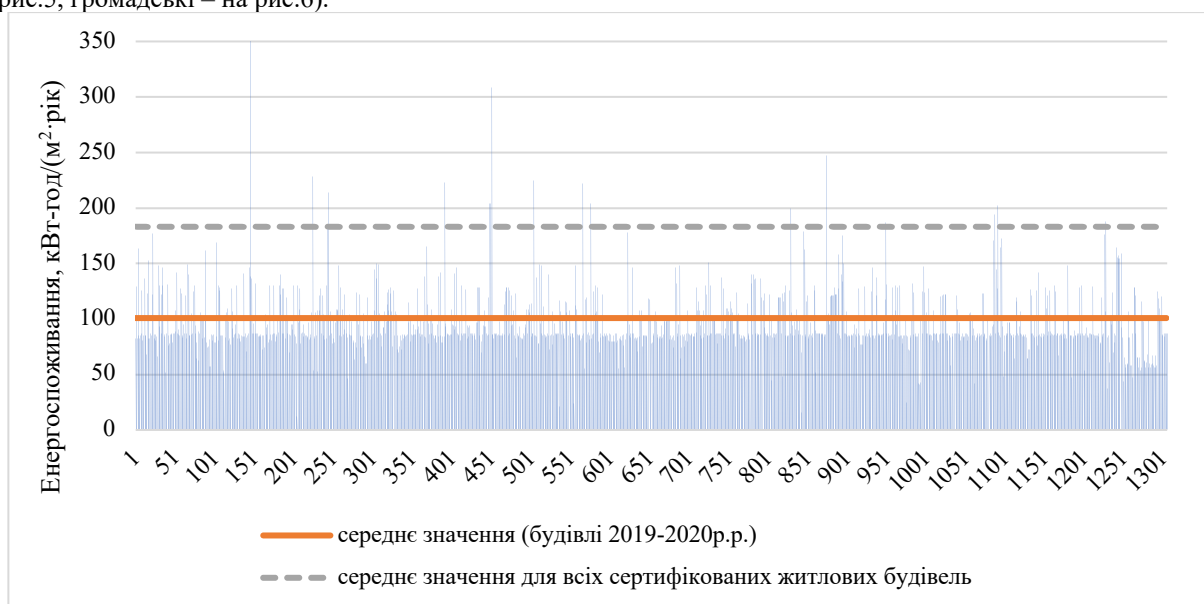


Рисунок 5 – Енергоспоживання житлових будівель класів А-Г

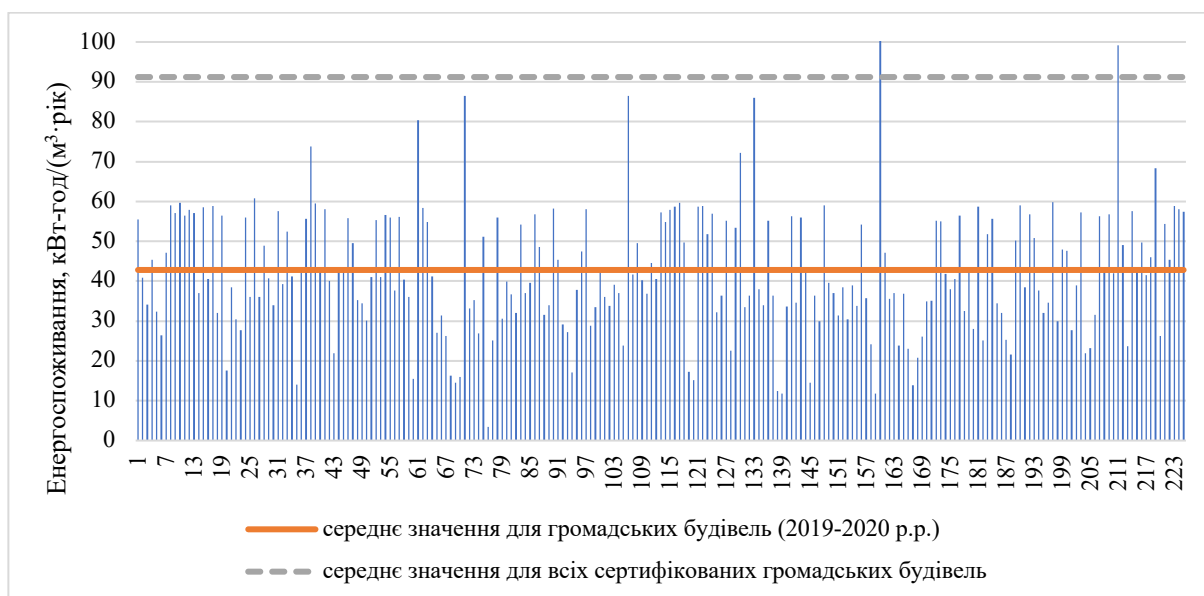


Рисунок 6 - Енергоспоживання громадських будівель класів А-Г



Було визначено, що середнє питоме споживання енергії для будівель житлового сектору, сертифікація для яких здійснювалося починаючи з 2019 року (1306 будівель, вид будівництва – нове будівництво або реконструкція) знаходиться на рівні 100,8 кВт·год/м<sup>2</sup>. Середній показник питомого енергоспоживання для Європи знаходиться у діапазоні від 50 до 80 кВт·год/м<sup>2</sup>, тобто Україна має значний потенціал енергозбереження, зважаючи на середнє значення 183,04 кВт·год/м<sup>2</sup> для усіх житлових будівель, представлених у відкритій базі енергетичних сертифікатів.

Середнє питоме споживання енергії для громадських будівель, сертифікація для яких здійснювалося починаючи з 2019 року (225 будівель, вид будівництва – нове будівництво або реконструкція) знаходиться на рівні 42,8 кВт·год/м<sup>3</sup>. Середнє значення показника питомого енергоспоживання для всіх громадських будівель, які отримали сертифікат енергетичної ефективності, становить 91,2 кВт·год/м<sup>3</sup>. Клас енергоефективності визначено по енергоспоживанню за методикою [6].

Окремо проведено порівняльний аналіз житлових будівель в Україні з класом А, з будівлями у м.Чикаго у США, що отримали LEED-сертифікат (The Leadership in Energy & Environmental Design). Для аналізу були доступні дані для 11 таких будівель у м.Чикаго. Визначено, що середнє питоме споживання енергії для будівель класу А знаходиться на рівні 40 кВт·год/м<sup>2</sup>. Натомість для будівель у м.Чикаго середнє значення питомого споживання енергії для житлових будівель коливається від 14кВт·год/м<sup>2</sup> до 18,6 кВт·год/м<sup>2</sup>, що вдвічі нижче, ніж в Україні, причому температура повітря за опалюваний період у м. Чикаго нижча на 2–3 °С, а в теплий період навпаки вища.

Також аналізувався вплив на екологію, а саме потенціал скорочення викидів вуглекислого газу (включено житлові будівлі класу С нового будівництва від 2019 р. у м. Києві). Враховувалось, що будівлі не змінюють джерело теплопостачання, а лише досягають економії енергоресурсів за рахунок утеплення, автоматизації енергосистем і т.д. Результати підрахунку потенціалу зменшення викидів CO<sub>2</sub> (накопичувальним підсумком) представлено на рис. 5.

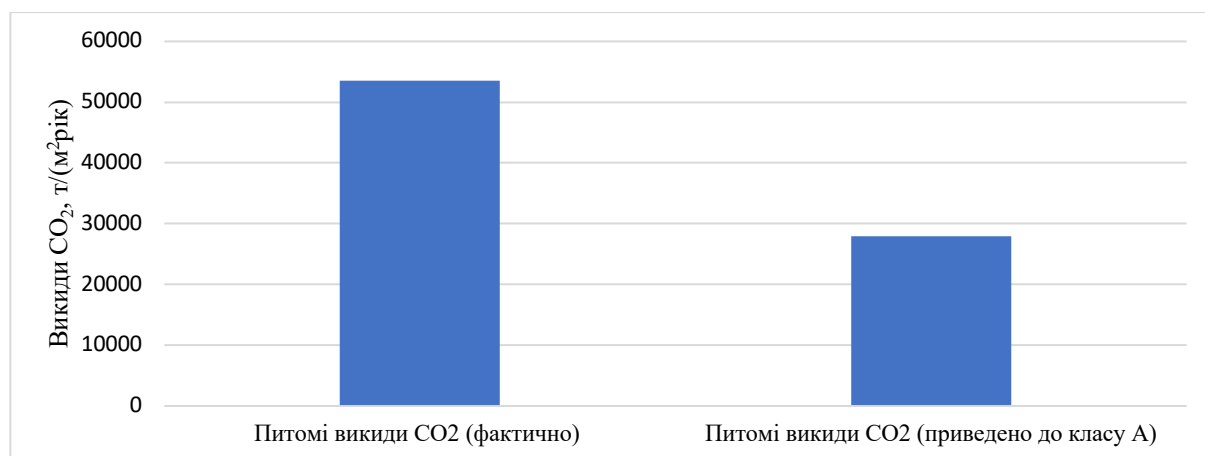


Рисунок 5 – Викиди вуглекислого газу для житлових будівель (фактичні та у разі приведення енергоспоживання до норм класу А)

**Висновки.** в ході дослідження аналізувалися показники енергетичної ефективності житлових та громадських будівель, внесені у енергетичні сертифікати. Виконано оцінку відповідності діючим на момент розробки сертифікату нормативним вимогам щодо теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій, аналіз питомого енергоспоживання та питомих викидів CO<sub>2</sub>. Висвітлено потенціал енергозбереження у порівнянні з аналогічними будівлями в країнах ЄС, а також розраховано потенціал скорочення викидів вуглекислого газу у разі впровадження комплексного утеплення огорожень та комплексної модернізації інженерних мереж з доведенням питомого енергоспоживання будівель до класу А.

Основними закладами, які отримали найнижчий клас G серед усіх сертифікованих будівель, є навчальні заклади (близько 60%) та житловий сектор (близько 47%). За масштабом та споживанню енергоресурсів житловий сектор має найбільшу частку споживання енергоресурсів в Україні, тому має привертати основну увагу для фінансування проєктів підвищення рівня енергоефективності. Нові будівлі 2019-2020 років побудови мають показники, які не відповідають нормативам. Вибірка з бази енергосертифікатів показує, що з усіх 27 сертифікованих будівель (нове будівництво) коефіцієнт опору теплопередачі для зовнішніх стін не відповідає нормативному для 23 будівель, а коефіцієнт опору теплопередачі для світлопрозорих конструкцій – для 15 будівель. Це в першу чергу пов'язано з питаннями

неузгодженості нормативної бази щодо сертифікації та визначення класу енергоефективності як за енергопотребою, так і за енергоспоживанням, але із прийняттям нової редакції будівельних норм [5] проблему буде врегульовано. Щодо споживання енергоресурсів, середній показник для нових будівель в Україні вищий у порівнянні з середнім значенням для європейських країн. Зокрема, для всіх житлових будівель, представлених у відкритій базі енергетичних сертифікатів, показник питомого енергоспоживання становить 163,87 кВт·год/м<sup>2</sup>, що є вдвічі більшим за середнє значення у країнах Європи, тому потенціал зниження споживання енергії, а також викидів вуглекислого газу у будівельному секторі України є суттєвим.

#### Список використаної літератури

1. Система енергоефективності в Україні. Проект до обговорення від 30 липня 2018 року. GIZ. Режим доступу: <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2018/09/GIZ-brochure.pdf>
2. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» №2118-VIII від 22.06.2017. Голос України. 22.07.2017. №134.
3. Directive 2010/31/eu of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) // Official Journal of the European Communities. 2010, L153. – p. 13-35.
4. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. К. Мінрегіонбуд України, 2016. 205 с.
5. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. К.: Мінбуд України, 2017. 37 с.
6. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. №169. Офіційний вісник України. 2018, № 55. С. 301.
7. Про затвердження Порядку проведення сертифікації енергетичної ефективності та форми енергетичного сертифіката: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. № 172. Офіційний вісник України. 2018, № 55. С. 334.
8. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.10.2020. №260. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
9. Про затвердження Змін до Методики визначення енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.10.2020. № 261. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1254-20>.
10. Порядок проведення професійної атестації осіб, які мають намір провадити діяльність із сертифікації енергетичної ефективності та обстеження інженерних систем // Затв. Постановою КМУ від 26.07.2018 № 605 – 16 с.
11. Портал державної електронної системи у сфері будівництва. Режим доступу: <https://e-construction.gov.ua/>
12. База даних енергетичних сертифікатів. Режим доступу: <https://sace.gov.ua/>

**V. Deshko**, Dr. Sc. (Eng.), Prof., **ORCID** 0000-0002-8218-3933

**M. Shovkaliuk**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, **ORCID** 0000-0002-1898-3493

**Yu. Kuzmyna**, Ph.D. student, **ORCID** 0000-0002-4217-4901

**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

## **DATABASE OF CERTIFICATES OF ENERGY EFFICIENCY OF BUILDINGS IN UKRAINE: ANALYSIS FOR NEW CONSTRUCTION**

Ukraine is an energy dependent country. The largest energy consumer in Ukraine is the household sector and industry. The technical characteristics of most existing serial buildings in Ukraine do not meet modern requirements for energy consumption. One of the tools to influence the reduction of consumption of construction resources is the introduction into the regulatory framework of requirements for improving energy efficiency. With the entry into force of the Law of Ukraine "On Energy Certification of Buildings", the development of an energy certificate has become mandatory for new buildings, state-owned buildings, local government buildings and in case of attracting public funds for thermal modernization of buildings. The energy certificate is developed by a certified energy auditor and entered into an open database in the Unified State System in the field of construction. The energy certificate contains an energy efficiency class determined by calculation according to the methodology of the national standard, which is developed taking into account European approaches to the calculation of energy

consumption for different needs of buildings. The generalized analysis of the data from the available certificates is of considerable interest for estimating the characteristics of enclosing structures, engineering systems and equipment and the actual and estimated specific energy consumption of different types of buildings. In this study, the authors focused on the energy efficiency of new buildings (starting in 2019). The following indicators of residential and public buildings were analyzed: heat transfer resistance of external walls and translucent structures, specific energy consumption, primary energy, specific CO<sub>2</sub> emissions, energy efficiency class. It was determined that the potential for energy savings compared to similar buildings in the European Union is significant, so improving the energy efficiency of the construction sector is an extremely important issue in Ukraine.

**Keywords:** building, energy certification, energy efficiency class, energy consumption.

#### REFERENCES

1. Energy saving system in Ukraine. Draft before negotiation on July 30, 2018. GIZ. Access mode: <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2018/09/GIZ-brochure.pdf>
2. Law of Ukraine "On Energy Efficiency of Buildings". Draft Law No.2118-VIII // Bulletin of the Verkhovna Rada, 2017, No.33, p.359.
3. Directive 2010/31/eu of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) // Official Journal of the European Communities. 2010, L153. – p. 13-35.
4. DSTU B A.2.2-12: 2015. Energy efficiency of buildings. Method of calculating energy consumption for heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply. K. Ministry of Regional Development of Ukraine, 2016. 205 p.
5. DBN B.2.6-31: 2016. Thermal insulation of buildings. K.: Ministry of Construction of Ukraine, 2017. 37 p.
6. On approval of the Methodology for determining the energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine dated 11.07.2018 №169. Official Gazette of Ukraine. 2018, № 55. S. 301.
7. On approval of the Procedure for certification of energy efficiency and forms of energy certificate: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine dated 11.07.2018 № 172. Official Gazette of Ukraine. 2018, № 55. S. 334.
8. On approval of the Minimum requirements for energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine dated 27.10.2020. №260. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
9. On approval of Amendments to the Methodology for determining the energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine dated 27.10.2020. №261. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1254-20>.
10. The procedure for professional certification of persons who intend to carry out activities for certification of energy efficiency and inspection of engineering systems // Approved. Resolution of the Cabinet of Ministers of July 26, 2018 № 605 - 16 p.
11. Portal of the state electronic system in the field of construction. Access mode: <https://e-construction.gov.ua/>
12. Database of energy certificates URL: <https://sace.gov.ua/>

Надійшла 17.03.2021

Received 17.03.2021

С.П. Денисюк, докт. техн. наук, професор, ORCID 0000-0002-6299-3680  
О.В. Коцар, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-7958-2335  
М.М. Шовкалюк, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-1898-3493  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ПІДГОТОВКА ФАХІВЦІВ З ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СЕРТИФІКАЦІЇ ТА ОБСТЕЖЕННЯ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ БУДІВЕЛЬ В ІЕЕ КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО

Європейська інтеграція – стратегічний напрямок розвитку нашої держави. На виконання угоди про асоціацію України з Європейським Союзом розроблено, зокрема, план імплементації Директиви Європарламенту щодо енергетичної ефективності будівель (2010/31/ЄС), яким передбачено запровадження енергетичної сертифікації будівель, як виду енергоаудиту. Зважаючи на суттєве споживання енергетичних ресурсів в Україні в порівнянні з іншими країнами, підвищення рівня енергетичної ефективності будівельного фонду є надзвичайно актуальним завданням. Інститут енергозбереження та енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського має багаторічний успішний досвід підготовки фахівців у сфері енергетики та підвищення рівня енергоефективності об'єктів промисловості та житлово-комунального господарства. На базі Центру підготовки енергоменеджерів запроваджено курси підвищення кваліфікації для осіб, які мають намір провадити діяльність із сертифікації енергетичної ефективності та обстеження інженерних систем будівель. Енергетичний сертифікат будівель є обов'язковим для нових будівель, будівель державної власності, будівель органів місцевого самоврядування та, у випадку залучення державних коштів, – на комплексну термомодернізацію. У статті представлено досвід роботи, розкрито зміст навчальної програми з підготовки, перепідготовки і підвищення кваліфікації енергоаудиторів та наведено результати діяльності Атестаційної комісії КПІ ім. Ігоря Сікорського.

**Ключові слова:** будівля, енергоефективність, атестація, навчання, енергетична сертифікація.

### Вступ

Енергоефективність є одним з провідних трендів ХХІ століття. Сьогодні раціональне використання енергетичних ресурсів з метою зниження шкідливого впливу на довкілля є невід'ємною умовою сталого розвитку суспільства. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» [1], який розроблено в рамках імплементації Директиви 2010/31/ЄС [2] та на виконання угоди про асоціацію України з ЄС [3], визначає правові, соціально-економічні та організаційні засади діяльності у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель і спрямований на зменшення споживання енергії у будівлях. На виконання Закону України [1] розроблено комплекс нормативно-правових актів [4-8] та стандартів [9], внесено зміни до будівельних норм [10] та інші Закони України, що регулюють діяльність у сфері житлово-комунального господарства (ЖКГ) [11-13]. На вимогу Закону України [1] 15 жовтня 2018 року наказом по Національному технічному університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ ім. Ігоря Сікорського) при Інституті енергозбереження та енергоменеджменту (ІЕЕ) на базі Центру підготовки енергоменеджерів (ЦПЕМ) створено Атестаційну комісію з проведення професійної атестації осіб, які мають намір провадити діяльність із сертифікації енергетичної ефективності та обстеження інженерних систем будівель, розроблено та затверджено навчальну програму з підготовки, перепідготовки і підвищення кваліфікації фахівців за зазначеними напрямками [14], організовано приймання кваліфікаційних іспитів та здійснюється професійна атестація енергоаудиторів.

### Мета та задачі

**Метою** статті є представлення досвіду роботи, опис навчальної програми з підготовки, перепідготовки і підвищення кваліфікації енергоаудиторів та аналіз результатів діяльності Атестаційної комісії КПІ ім. Ігоря Сікорського.

### Матеріал і результати досліджень

Атестаційну комісію КПІ ім. Ігоря Сікорського очолив директор ІЕЕ, науковий керівник кафедри електропостачання, д.т.н., професор С. П. Денисюк. До складу комісії також увійшли завідувач кафедри теплотехніки та енергозбереження, д.т.н., професор В. І. Дешко; директор ЦПЕМ, к.т.н., доцент кафедри електропостачання О. В. Коцар (заступник голови); к.т.н., доцент кафедри теплотехніки та енергозбережен-

© С.П. Денисюк, О.В. Коцар, М.М. Шовкалюк, 2021

ня М. М. Шовкалюк (секретар). Зважаючи на практичний характер діяльності атестованих енергоаудиторів, окрім викладачів-науковців КПІ ім. Ігоря Сікорського до складу атестаційної комісії увійшли член-кореспондент НАН України, завідувач відділу теплофізичних основ енергоощадних технологій Інституту технічної теплофізики НАН України, д.т.н., професор Б. І. Басок, президент Всеукраїнської громадської організації «Вища рада енергоаудиторів та енергоменеджерів України» В. Ю. Улида і голова правління Громадської спілки «Асоціація інженерів енергетиків України» О. В. Овдієнко. Таким чином, в Атестаційній комісії КПІ ім. Ігоря Сікорського збалансовано представлено освітню, наукову та інжинірингову складову за спеціальностями 141 «Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка» та 144 «Теплоенергетика», що повною мірою відповідає характеру діяльності енергоаудиторів, які атестуються.

Відповідно до вимог Закону України [1] навчання та професійну атестацію орієнтовано на фахівців, які набули освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр» (за напрямом: сертифікація енергетичної ефективності) та «бакалавр» (за напрямом: обстеження інженерних систем) в спеціалізованих галузях знань і мають визначений [8] стаж роботи у сфері енергетики, енергоефективності та енергозбереження, будівництва та архітектури або ЖКГ. Навчальною програмою передбачено опрацювання питань у сфері політики енергоефективності в Україні, зокрема, щодо імплементації директив Європейського Союзу, вимог Міжнародного валютного фонду та державних програм до фінансування заходів на об'єктах житлово-комунального господарства; законодавчого та нормативно-правового забезпечення діяльності з енергоаудиту, енергетичного менеджменту та реалізації енергоефективних заходів в Україні; проведення енергетичного аудиту та обстеження інженерних систем будівель; впровадження енергоефективних заходів і технологій, зокрема, з використанням альтернативних та відновлюваних джерел енергії, а також формування фінансової оцінки енергоефективних проектів. На вивчення програми відведено 108 годин / 3,5 кредити ECTS, що складаються з лекційних і практичних занять, домашніх завдань та самостійної роботи.

Відповідно до затвердженої навчальної програми в ЦПЕМ було відкрито тренінгові курси та розпочато прийом кваліфікаційних іспитів відповідно до Порядку професійної атестації [8]. До підготовки, перепідготовки та підвищення кваліфікації енергоаудиторів залучені найфаховіші викладачі ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського, які мають багаторічний досвід практичної діяльності з проведення енергетичного аудиту, розроблення і впровадження систем енергетичного менеджменту та реалізації заходів з підвищення рівня енергетичної ефективності. Викладання орієнтовано переважно на виконання практичних завдань, що дозволяє фахівцям набути необхідних навичок та умінь для підготовки звітів за результатами обстеження інженерних систем та розроблення сертифікатів енергетичної ефективності будівель. З метою актуалізації знань і використання найсучасніших технологій, а також задля забезпечення ефективної взаємодії енергоаудиторів з галузевими установами і державними інституціями до підготовки фахівців в КПІ ім. Ігоря Сікорського також залучено представників Науково-дослідного інституту будівельних конструкцій (ДП НДІБК), Фонду енергоефективності України та Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження (ДАЕЕ). Суттєву увагу під час навчання приділено вивченню чинної нормативно-правової бази, реєстрації та принципам незалежного моніторингу енергетичних сертифікатів.

Відповідно до Порядку [8] професійна атестація проводиться шляхом складання кандидатами письмового кваліфікаційного іспиту (окремо за кожним напрямом), яким передбачено розв'язання 25 тестових і 3 ситуаційних завдань. Тестові і ситуаційні завдання розроблено з урахуванням вимог чинного законодавства та нормативної бази України щодо проведення сертифікації енергетичної ефективності будівель (для осіб, які мають намір провадити діяльність із сертифікації енергетичної ефективності будівель) та обстеження інженерних систем будівель (для осіб, які мають намір проводити обстеження інженерних систем будівель). Зразки тестових і ситуаційних завдань викладено на сайті ЦПЕМ за посиланням: <http://tcem.iee.kpi.ua/attcommision>. Кваліфікаційний іспит вважається таким, що складено, якщо кандидат вірно розв'язав не менше 70% від загальної кількості тестових та загальної кількості ситуаційних завдань.

Вже 20 листопада 2018 року в ЦПЕМ було організовано складання кваліфікаційних іспитів, за результатами яких Атестаційною комісією КПІ ім. Ігоря Сікорського було атестовано 9 енергоаудиторів із сертифікації енергетичної ефективності та 10 фахівців з обстеження інженерних систем будівель, серед яких три особи – випускники ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського минулих років. Станом на квітень 2021 року в ІЕЕ на базі ЦПЕМ загалом підготовлено та атестовано 123 енергоаудитори із сертифікації енергетичної ефективності та 122 фахівці з обстеження інженерних систем будівель, серед яких вісім осіб – випускники ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського. Один кандидат не зміг скласти кваліфікаційні іспити. Також, на підставі результатів незалежного моніторингу енергетичних сертифікатів за поданням ДАЕЕ Атестаційною комісією КПІ ім. Ігоря Сікорського було анульовано кваліфікаційний атестат енергоаудитора за повторне порушення нормативних вимог.

За результатами професійної атестації в КПІ ім. Ігоря Сікорського особи, що мають намір провадити діяльність із сертифікації енергетичної ефективності та обстеження інженерних систем, які перед складанням кваліфікаційних іспитів пройшли підвищення кваліфікації в ЦПЕМ, показали переконливіші результати. Так, середній рівень розв'язання ситуаційних завдань енергоаудиторами із сертифікації енергетичної ефективності будівель, які пройшли навчання в ЦПЕМ, складає 93,8% в порівнянні з енергоаудиторами, які склали кваліфікаційний іспит екстерном (92%). Також, серед енергоаудиторів, які пройшли підвищення кваліфікації, кращі результати розв'язання тестових завдань: 94,2% (в середньому енергоаудитори розв'язували 23,5 завдання з 25) в порівнянні з 92,8% (в середньому розв'язано 23,2 завдання з 25) енергоаудиторами, які навчання не проходили. Подібна тенденція спостерігається і під час професійної атестації фахівців з обстеження інженерних систем. Середній рівень розв'язання ситуаційних завдань серед фахівців, які пройшли підвищення кваліфікації в ЦПЕМ, складає 93,8% в порівнянні з фахівцями, які навчання не проходили (93,4%). Фахівці, які пройшли підвищення кваліфікації, також показали кращі результати розв'язання тестових завдань: 95,6% (в середньому фахівці розв'язували 23,9 завдання з 25) проти 93,3% (в середньому розв'язано 23,3 завдання з 25). Наведені результати підтверджують доцільність та ефективність підвищення кваліфікації в ЦПЕМ за розробленою в ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського навчальною програмою перед складанням кваліфікаційних іспитів.

Влітку 2019 року викладачі ІЕЕ М. М. Шовкалюк, Д. Г. Дерев'янку, Т. Ю. Оборонов та В. І. Василенко успішно пройшли підвищення кваліфікації в рамках проекту «Підтримка національного Фонду енергоефективності та програми екологічних реформ (S21) в Україні», що виконувалася Німецьким товариством міжнародного співробітництва (GIZ) від імені Федерального агентства довкілля, охорони природи та безпеки ядерних реакторів Німеччини. Метою програми була підготовка висококваліфікованих викладачів-тренерів, які зможуть навчати енергоаудиторів взаємодії з Фондом енергоефективності. Дев'ятиденна програма підготовки охоплювала не лише лекційні і групові практичні заняття, а й індивідуальне завдання (енергоаудит будівлі та визначення енергоспоживання за національними стандартами), а також два екзаменаційні тести. Дуальний підхід до навчання є надзвичайно прогресивним і широко застосовується у світі. Навчальний тренінг проводили провідні експерти – фахівці у сфері енергетичного аудиту та сертифікації, представники Фонду енергоефективності, Міністерства розвитку громад та територій України та GIZ. Отримані під час навчання матеріали і знання було використано під час розробки навчальної програми з двоступеневої підготовки, перепідготовки та підвищення кваліфікації фахівців в КПІ ім. Ігоря Сікорського за модулями:

- Модуль 1: «Професійна підготовка осіб, які мають намір провадити діяльність із сертифікації енергетичної ефективності та обстеження інженерних систем будівель».
- Модуль 2: «Робота енергоаудиторів з Фондом енергоефективності».

Навчальною програмою Модуля 1 охоплено наступні питання:

- законодавча та нормативна база стосовно політики енергоефективності та програми підтримки заходів з енергозбереження в ЖКГ, зокрема, енергосервісні (ЕСКО) контракти;
- енергетичні обстеження будівель (збір вихідної інформації, опитувальні листи, облік енергоресурсів, прилади для проведення енергоаудиту, аналіз даних, енергетичні баланси та базовий рівень енергоспоживання);
- нормативні вимоги до огорожувальних конструкцій, зовнішнього повітря та внутрішнього мікроклімату приміщень, розрахункові параметри;
- інженерні системи будівлі та джерела енергії (опалення, вентиляції та кондиціювання, гарячого водопостачання, електропостачання та освітлення, теплові пункти, котельні, альтернативні та відновлювані джерела енергії);
- рекомендації щодо вибору заходів з енергозбереження та енергетичний ефект;
- фінансова та екологічна оцінка комплексу заходів і звіт з енергоаудиту;
- енергетичний сертифікат та звіт з обстеження інженерних систем будівель, зокрема, детальні розрахунки за чинним національним стандартом [9].

Навчальна програма Модуля 2 відповідає рекомендаціям ЄС та Фонду енергоефективності щодо розробки програм тренінгів. В рамках Модуля 2 фахівці отримують необхідні знання, практичні навички та рекомендації з:

- роботи з Фондом енергоефективності;
- заповнення форм опису проекту;
- підготовки технічного завдання;
- фінансово-економічної оцінки результатів;
- верифікації проекту;
- рекомендації для енергоаудиторів щодо роботи з об'єднаннями співвласників багатоквартирних будинків (ОСББ).

Також, в рамках Модуля 2 заплановано формування вихідної інформації та заповнення опитувальних листів з виїздом на діючі об'єкти, а в умовах карантинних обмежень – віртуальна екскурсія.

Слід зазначити, що до навчання за Модулем 2 допускаються енергоаудитори, яких кваліфіковано (успішно складено кваліфікаційні іспити і отримано кваліфікаційний атестат) на провадження діяльності із сертифікації енергетичної ефективності будівель за Модулем 1.

Після оголошення пандемії коронавірусної хвороби COVID-19 в ЦПЕМ розроблено дистанційні курси з підвищення кваліфікації кадрів у повній відповідності до вимог Закону України [1], в умовах епідеміологічних обмежень організовано складання кваліфікаційних іспитів в дистанційному режимі. В період з листопада 2020 року онлайн підготовлено 23 енергоаудитори із сертифікації енергетичної ефективності та 24 фахівці з обстеження інженерних систем будівель. Всі фахівці успішно склали кваліфікаційні іспити, отримали кваліфікаційні атестати встановленого зразка і внесені до національної бази даних атестованих енергоаудиторів.

З 1-го грудня 2020 року вступили в дію зміни до Закону України [1]. Згідно з частиною третьою статті 8 Закону України «Про енергетичну ефективність будівель» енергетичний сертифікат виготовляється енергоаудитором з використанням Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва та з присвоєнням реєстраційного номера в цій системі.

**Висновки.** Розроблені в ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського навчальні програми і організація на базі ЦПЕМ навчання з підготовки, перепідготовки та підвищення кваліфікації фахівців за Модулем 1 «Професійна підготовка осіб, які мають намір провадити діяльність із сертифікації енергетичної ефективності та обстеження інженерних систем будівель» та Модулем 2: «Робота енергоаудиторів з Фондом енергоефективності» цілком відповідають вимогам національного законодавства і рекомендаціям Європейського Союзу щодо підготовки енергоаудиторів та забезпечують актуалізацію теоретичних знань і набуття необхідних практичних навичок.

Підготовка, перепідготовка та підвищення кваліфікації кадрів за затвердженими навчальними програмами і проведення професійної атестації енергоаудиторів дозволило в стислі терміни наповнити ринок праці кваліфікованими фахівцями із сертифікації енергетичної ефективності та обстеження інженерних систем будівель. Це, в свою чергу, дозволить розв'язувати нагальні завдання з підвищення енергоефективності будівельного фонду, зокрема, нових та існуючих будівель, які експлуатуються, що є одним із головних напрямків державної політики України.

За результатами освітньої діяльності ІЕЕ Атестаційною комісією КПІ ім. Ігоря Сікорського атестовано близько 8% енергоаудиторів із сертифікації енергетичної ефективності та понад 10% фахівців з обстеження інженерних систем будівель в Україні, яких занесено у відкриту базу даних.

#### **Список використаної літератури**

1. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» №2118-VIII від 22.06.2017. Голос України. 22.07.2017. №134.
2. Directive 2010/31/eu of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) // Official Journal of the European Communities. 2010, L153. – p. 13-35.
3. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої. Документ 984\_011 від 30.11.2015 р. Режим доступу: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text)
4. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. №169. Офіційний вісник України. 2018, № 55. С. 301.
5. Про затвердження Порядку проведення сертифікації енергетичної ефективності та форми енергетичного сертифіката: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. № 172. Офіційний вісник України. 2018, № 55. С. 334.
6. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.10.2020. №260. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
7. Про затвердження Змін до Методики визначення енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.10.2020. № 261. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1254-20>.

8. Порядок проведення професійної атестації осіб, які мають намір провадити діяльність із сертифікації енергетичної ефективності та обстеження інженерних систем // Затв. Постановою КМУ від 26.07.2018 № 605 – 16 с.

9. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. К. Мінрегіонбуд України, 2016. 205 с.

10. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. К.: Мінбуд України, 2017. 37 с.

11. Закон України «Про Фонд енергоефективності» № 2095-VIII від 01.12.2020. Відомості Верховної Ради, 2017, № 32, с. 344.

12. Закон України «Про особливості здійснення права власності у багатоквартирних будинках» № 417-8, від 10.06.2018. Цивільний кодекс України ч. 2 ст. 382 в редакції Закону № 417-8, від 14.05.2015.

13. Закон України «Про житлово-комунальні послуги» № 2189-VIII від 02.04.2020. Відомості Верховної Ради, 2018, № 1, с. 1.

14. Денисюк С.П., Коцар О.В., Шовкалюк М.М. Програма навчання фахівців з енергетичної сертифікації будівель та обстеження інженерних систем // Збірн. матеріалів VI Міжнародної науково-практичної та навчально-методичної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'19», 04-07 червня 2019 року – Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського – С. 66 – 67.

15. Портал державної електронної системи у сфері будівництва. Режим доступу: <https://e-construction.gov.ua/>

**S. Denysiuk**, Dr. Sc. (Eng.), Prof., **ORCID** 0000-0002-6299-3680  
**O. Kotsar**, Cand. Sc. (Eng.), Conf. Assoc. Prof, **ORCID** 0000-0002-7958-2335  
**M. Shovkaliuk**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, **ORCID** 0000-0002-1898-3493  
**National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**

## **TRAINING OF SPECIALISTS IN ENERGY CERTIFICATION AND INSPECTION OF ENGINEERING SYSTEMS OF BUILDINGS IN THE IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE**

European integration is a strategic direction for the development of our country's foreign policy. In pursuance of the Association Agreement between Ukraine and the European Union, a plan for the implementation of the European Parliament Directive on the energy performance of buildings (2010/31/EU) has been developed, which provides for the introduction of energy certification of buildings as a type of energy audit. Given the significant energy consumption in Ukraine compared to other countries, improving the energy efficiency of the buildings is an extremely important objective. The greatest effect in the existing buildings is achieved only in the case of integrated implementation of energy saving measures for fencing structures, utilities and equipment, and such projects require significant funds. To obtain funding from various investment funds and to be able to participate in state or local funding programs, it is necessary to perform an energy audit and justify energy saving measures, to assess the energy efficiency class of the building. The result of the implementation of measures will be a reduction in the total consumption of energy resources, as well as the cost of paying for them, improving the conditions of the microclimate. Institute of Energy Saving and Energy Management of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute has many years of successful experience in training specialists in the area of energy and improving the energy efficiency of industry and utilities. On basis of the Training Center for Energy Management, advanced training courses have been introduced for specialists who intend to carry out activities on certification of energy efficiency and inspection of engineering systems of buildings. Energy certificates of buildings are mandatory for new buildings, state-owned buildings, local government buildings and in case of attracting public funds for complex thermal modernization. In this paper highlighted the experience, reveals the content of the curriculum for training, retraining and advanced training of energy auditors and presents the results of the Attestation Commission of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

**Keywords:** building, energy efficiency, energy audit, training, energy certification.

### **REFERENCES**

1. Law of Ukraine "On Energy Efficiency of Buildings". Draft Law No.2118-VIII // Bulletin of the Verkhovna Rada, 2017, No.33, p.359.



2. Directive 2010/31/eu of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) // Official Journal of the European Communities. 2010, L153. – p. 13-35.
3. Association Agreement between Ukraine, of the one part, and the European Union, the European Atomic Energy Community and their Member States, of the other part. Document 984\_011 dated 30.11.2015.  
Access mode: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text)
4. On approval of the Methodology for determining the energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine dated 11.07.2018 №169. Official Gazette of Ukraine. 2018, № 55. S. 301.
5. On approval of the Procedure for certification of energy efficiency and forms of energy certificate: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine dated 11.07.2018 № 172. Official Gazette of Ukraine. 2018, № 55. S. 334.
6. On approval of the Minimum requirements for energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine dated 27.10.2020. №260. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
7. On approval of Amendments to the Methodology for determining the energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine dated 27.10.2020. №261. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1254-20>.
8. The procedure for professional certification of persons who intend to carry out activities for certification of energy efficiency and inspection of engineering systems // Approved. Resolution of the Cabinet of Ministers of July 26, 2018 № 605 - 16 p.
9. DSTU B A.2.2-12: 2015. Energy efficiency of buildings. Method of calculating energy consumption for heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply. K. Ministry of Regional Development of Ukraine, 2016. 205 p.
10. DBN B.2.6-31: 2016. Thermal insulation of buildings. K. : Ministry of Construction of Ukraine, 2017. 37 p.
11. Law of Ukraine "On the Energy Efficiency Fund" № 2095-VIII of 01.12.2020. Information of the Verkhovna Rada, 2017, №32, p.344.
12. Law of Ukraine "On the peculiarities of the exercise of property rights in apartment buildings" №417-8, from 10.06.2018. Civil Code of Ukraine Part 2 of Art. 382 as amended by the Law № 417-8, dated 14.05.2015.
13. Law of Ukraine "On Housing and Communal Services" № 2189-VIII of 02.04.2020. Information of the Verkhovna Rada, 2018, №1, p.1.
14. Serhii Denysiuk, Oleg Kotsar, Maryna Shovkaliuk. Training program for specialists in energy certification of buildings and inspection of engineering systems // Collection. materials of the VI International scientific-practical and educational-methodical conference "Energy management: state and prospects of development - PEMS'19", June 4-07, 2019 - Kyiv, KPI. Igor Sikorsky – P. 66 – 67.
15. Portal of the state electronic system in the field of construction. Access mode: <https://e-construction.gov.ua/>

Надійшла 18.03.2021

Received 18.03.2021

**B. Basok**, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-8935-4248

**O. Nedbailo**, Dr. Eng. Sc., SRF, ORCID 0000-0003-1416-9651

**I. Bozhko**, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-7458-0835

**M. Tkachenko**, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-8345-1613

**Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine**

## **TECHNICAL FEATURES OF USING A COMPLEX WIND-SOLAR POWER SUPPLY SYSTEM OF AN ENERGY-EFFICIENT HOUSE**

*The wish to achieve energy savings of organic fuel while reducing the negative man-made impact on the environment, especially in the context of global warming, encourages for the search for new approaches in the construction of energy efficient houses and buildings. Analysis of the accumulated meteorological data on wind and solar potentials in Kyiv shows that in an urban city it is possible to create a fully autonomous house, which will be supplied with electricity using solar and wind energy. Year-round monitoring of atmospheric parameters such as current values of wind speed and direction, relative humidity and barometric air pressure was carried out using a portable meteorological station TFA Nexus using appropriate Primus software, which allowed to collect and analyze measurement data. Data on insolation for the location of the energy-efficient house were obtained experimentally in 2019 using measurements with a pyranometer SR-U1. The developed system consists of a wind generator, solar modules, charge controllers, inverters and batteries. The calculation of electricity production by the solar station was performed in the PVSyst program according to meteorological data Meteonorm. At the same time, it should be noted that the energy contribution from photomodules is crucial for the power supply of an energy-efficient house. The proposed instrumental methods for determining the parameters of insolation provide an opportunity to assess its technically available potential for a given area, as well as to use the obtained data for the design of complex power supply systems using energy of wind and solar. The research results prove that in the conditions of the city of Kyiv there are potential opportunities for the creation of residential buildings with zero energy balance, in which, for the purpose of power supply, wind generators and solar modules can be used quite successfully.*

**Keywords:** wind-solar power supply system, electricity production, insolation.

### **Introduction**

The wish to achieve energy savings of organic fuel while reducing the negative man-made impact on the environment, especially in the context of global warming, encourages for the search for new approaches in the construction of energy efficient houses and buildings. One of the approaches to solving the above problem is to create passive and "0-energy" houses [1, 2].

On the territory of the Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine in Kyiv, an energy-efficient house has been implemented as a scientific, technical and technological thermophysical laboratory. The experimental building investigates and optimizes air conditioning systems using renewable energy sources, advanced technologies for automation and informatization of heat transfer processes in energy supply systems. The successful implementation of this project clearly demonstrates the possibility of creating houses with zero energy balance in the climatic conditions of northern Ukraine, and its operation will provide a large amount of experimental scientific and practical information. At the same time, a consistent implementation of the technological chain is carried out: high energy efficiency house - passive house - intelligent house - Micro Smart-Grid-0-Energy system.

### **Materials and methods of research**

The average annual amount of total solar radiation received per 1 m<sup>2</sup> of surface in Ukraine is in the range from 1070 kWh/m<sup>2</sup> in the northern part of Ukraine and up to 1400 kWh/m<sup>2</sup> in the southern.

In the conditions of climate of Ukraine with the help of wind turbines it is possible to use 15 ÷ 19% of the volume of wind energy passing through the cross section of the windmill surface. The expected volumes of electricity production from 1 m<sup>2</sup> of cross section of the wind wheel area in promising regions are more than 800 ÷ 1000 kWh/m<sup>2</sup> per year.

Analysis of the accumulated meteorological data on wind and solar potentials in Kyiv shows that in an urban city it is possible to create a fully autonomous house, which will be supplied with electricity using solar and wind energy.

The developed system consists of a wind generator, solar modules, charge controllers, inverters and batteries (Fig. 1). To reserve and ensure uninterrupted operation, the system provides automatic input of reserve or the involvement of a diesel generator [3].

---

© Б.І. Басок, О.М. Недбайло, І.К. Божко, М.В. Ткаченко, 2021

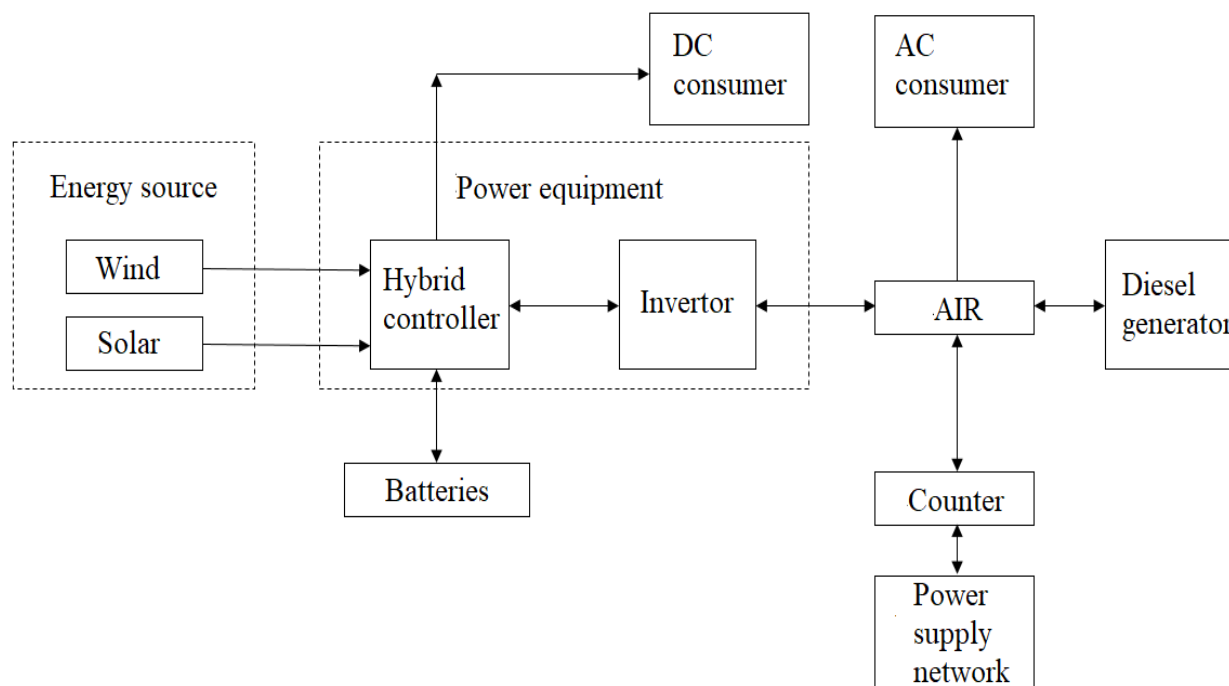


Fig. 1. Schematic diagram of power supply systems of energy efficient house of Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

The required amount of electricity production for the most efficient operation of an energy-efficient house is about 750 kWh per month. To provide electricity to technical consumers of the house on a pitched roof at an angle of 33° installed 22 single-crystal photovoltaic modules QSolar QS-240W with a capacity of 240 W and 60 polycrystalline photovoltaic modules Calyxo CX3 (based on cadmium telluride) with a capacity of 80 W. For Kyiv, the recommended angle of maximum annual electricity generation (angle of inclination to the horizontal plane of photovoltaic modules) is 38°.

EPSolar eTracer ET6415N charge controllers are used to prevent emergency battery charging from photovoltaic converters and increase energy efficiency from photovoltaic modules.

In order to ensure the charging of the batteries from the wind turbine under these conditions at the appropriate speed and, taking into account the use of another energy source (including photovoltaic modules) to power the facility, it will be appropriate to install a device with a rated power of at least average hourly consumption. In this case, a Fortis Montana wind turbine with a rated power of 5 kW DC 48 V with a built-in charge controller is used [3].

3 Axpert Abi – Solar KS – 5K inverters connected in parallel as part of the power supply system provide a constant load of 4 kW and a short-term load (up to 5 seconds) of 8 kW.

The total capacity of the battery pack is selected based on the calculation of the sufficiency of three-day autonomous operation of the control of boiler with pellet burner, taking into account the depth of discharge up to 70% of the maximum allowable. AGM Ventura GPL12-100 batteries (12 V, 100 Ah) are installed to ensure uninterrupted power supply.

Year-round monitoring of atmospheric parameters such as current values of wind speed and direction, relative humidity and barometric air pressure was carried out using a portable meteorological station TFA Nexus using appropriate Primus software, which allowed to collect and analyze measurement data.

### **Results and discussion**

When using data from solar radiation, taken from climatic reference books and regulations [4], cloudiness and radiation properties of the atmosphere of this area are not taken into account, which cannot be calculated. The data from the reference sources themselves, today, need to be clarified in connection with climate change. Therefore, when selecting parameters and operating expensive equipment to convert solar radiation energy into heat, there is a need for refined parameters of insolation, which comes at different angles to the horizontal surface.

Data on insolation for the location of the energy-efficient house were obtained experimentally in 2019 using measurements with a pyranometer SR-U1 (Fig. 2), located on the roof of the building №1 at Kyiv, st. Bulakhovsky, 2.

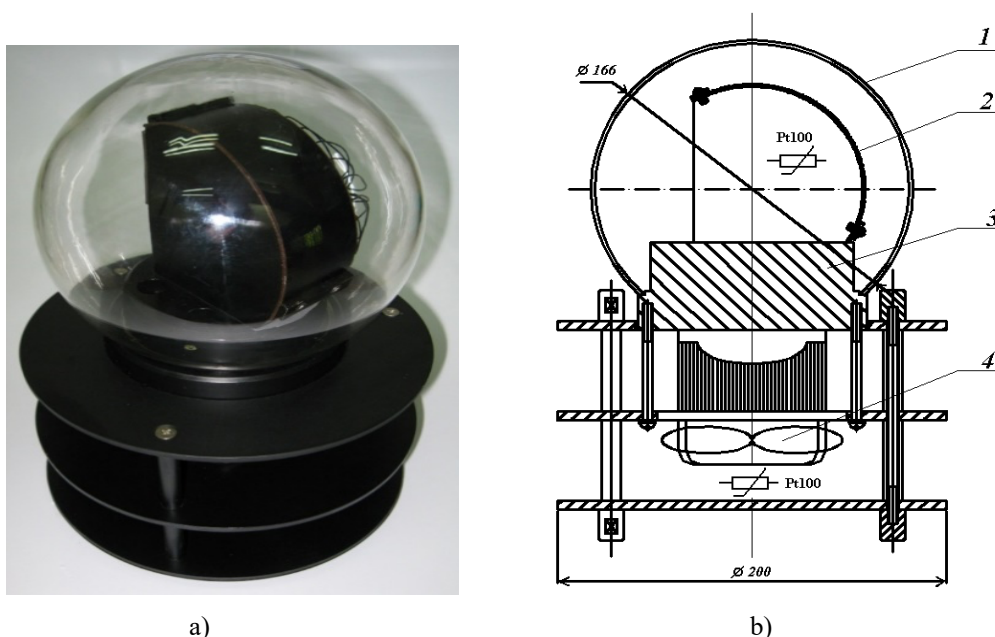


Fig. 2. Pyranometer SR-U1

a) appearance, b) scheme: 1 - glass dome; 2 - multi-section heat flow converter (PTP); 3 - heat runoff; 4 - forced cooling system.

Its design was developed in the Department of Thermometry of the Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine in Kyiv. The pyranometer belongs to the actinometric group and allows to determine the density of total solar radiation ( $W/m^2$ ) coming to the plane with an angle of inclination to the horizon from  $0^\circ$  to  $90^\circ$  with a step of  $10^\circ$ . Such data allow us to estimate the possible technically available potential for the use of solar radiation during the year for a given area.

It should be noted that the largest value of the energy of solar radiation enters the area of the converter of the pyranometer, which has an angle of inclination to the horizontal plane of  $50^\circ$ . At maximum cloudiness, this is the case for the surface, which is located at angles to the horizon  $0^\circ \div 10^\circ$ . This is due to the fact that in a cloudy sky, the maximum value of the diffuse component of solar radiation falls on the horizontal surface. Figure 3 shows the instantaneous values of the energy flow from insolation in December for the city of Kyiv at an angle of inclination of the surface of  $33^\circ$  to the horizontal plane.

The calculation of electricity production by the solar station was performed in the PVSyst program according to meteorological data Meteonorm. The results of the calculation are presented in table 1.

Table 1. The results of the calculation of electricity production by a solar station

Month	Intensity of insolation on a horizontal surface, kWh/m <sup>2</sup>	Air temperature, C	The intensity of insolation on the surface at an angle of 30° to the horizontal, kWh/m <sup>2</sup>	Electricity is received in photovoltaic modules, kWh
January	28	-4,2	42,4	339
February	48	-3,7	70,4	596
March	88	1,9	109,6	947
April	122	8,5	135,7	1163
May	185	15,2	191,6	1621
June	178	18,0	176,0	1470
July	176	19,1	175,6	1459
August	156	18,5	170,0	1418
September	101	14,1	119,9	999
October	67	8,0	95,5	802
November	29	1,3	40,3	317
December	21	-2,0	32,6	247

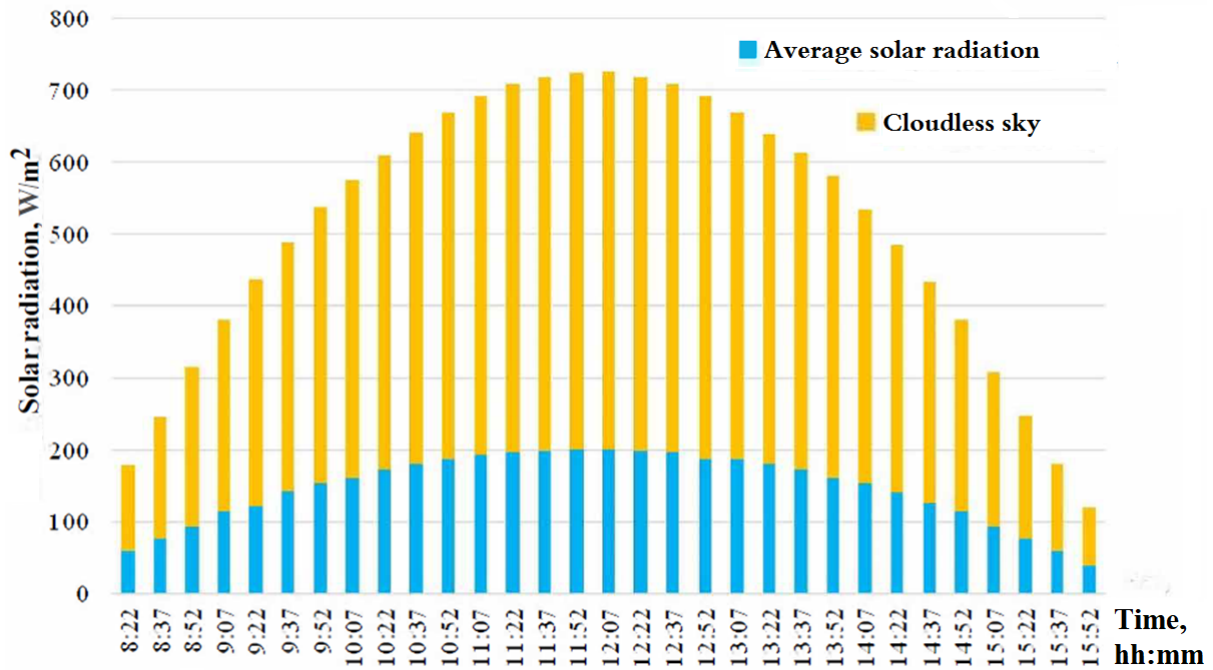


Fig. 3. Instantaneous value of energy flow from insolation to a surface with an angle of inclination of 33° in December for the city of Kyiv

The results of the calculation of electricity production by the wind turbine are shown in table 2.

Fig. 4 shows a histogram of the distribution of total electricity production by the complex system (solar and wind power plants) for 2019. When using such a wind generator in climatic conditions, it is possible to achieve an average monthly electricity production of about 285 kWh.

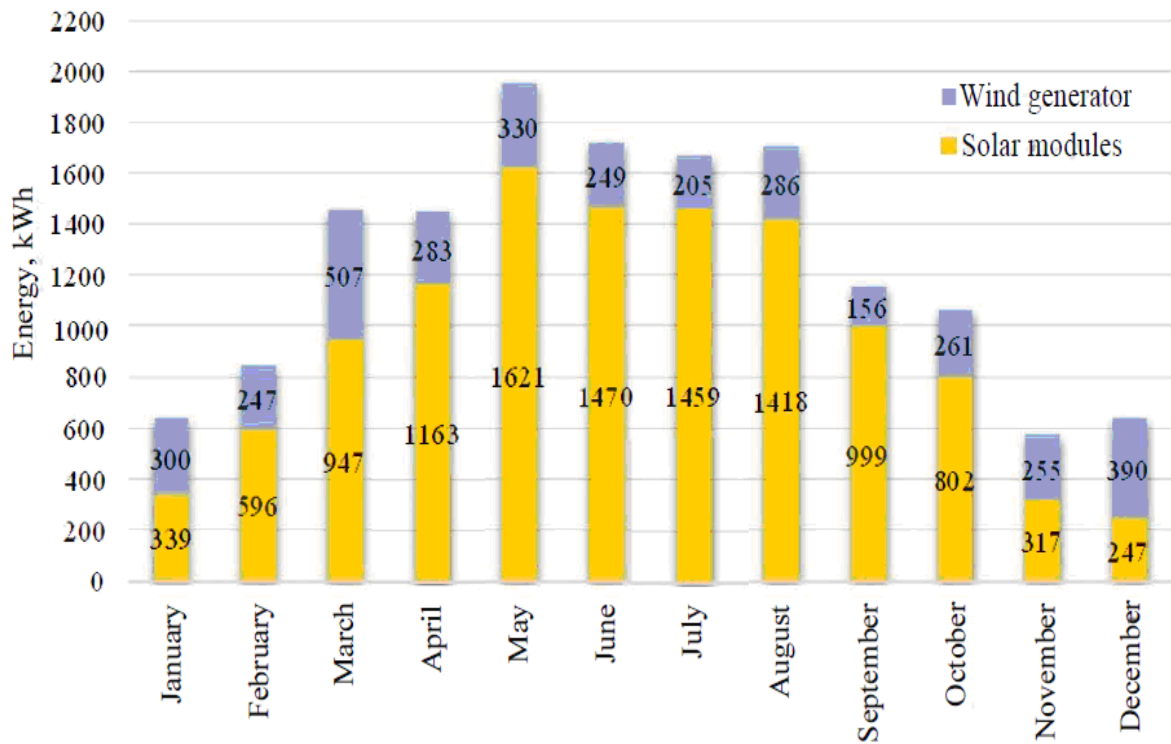


Fig. 4. Histogram of total electricity production by a complex system

Table 2. The results of the calculation of electricity production by a wind turbine

Month	Electricity production, kWh
January	300
February	247
March	507
April	283
May	330
June	249
July	205
August	286
September	156
October	261
November	255
December	390

At the same time, it should be noted that the energy contribution from photomodules is crucial for the power supply of an energy-efficient house.

Electricity produced by the complex system during the most favorable periods of the year sometimes reaches more than 2000 kWh per month. The average daily production of electricity by this system is about 45 kWh.

#### Conclusions.

1. The proposed instrumental methods for determining the parameters of insolation provide an opportunity to assess its technically available potential for a given area, as well as to use the obtained data for the design of complex power supply systems using energy of wind and solar.

2. The research results prove that in the conditions of the city of Kyiv there are potential opportunities for the creation of residential buildings with zero energy balance, in which, for the purpose of power supply, wind generators and solar modules can be used quite successfully.

3. Estimates show that electricity from photovoltaic modules (total installed capacity of the solar station is 10,7 kW) and wind turbine (rated power 5,0 kW) is sufficient to provide an energy efficient house with a total area of 302 m<sup>2</sup>.

#### REFERENCES

1. Басок Б.И., Хибина М.А., Беляева Т.Г. Энергоэффективные дома типа «нуль энергии». Принципы создания и пути развития. Промышленная теплотехника, Т. 35. №6. 2013. С. 43 – 50.
2. Долінський А.А., Басок Б.І., Недбайло О.М., Беляєва Т.Г., Хибина М.А., Ткаченко М.В., Новіцька М.П. Концептуальні основи створення експериментального будинку типу «нуль енергії». Будівельні конструкції. Вп. 77. 2013. С. 222 – 227.
3. Б.І. Басок, Т.Г. Беляєва, І.К. Божко, О.М. Недбайло, В.Г. Новіков, М.А. Хибина Система електрозабезпечення експериментального будинку типу 0-енергії (площею 300 м<sup>2</sup>) на основі використання відновлюваних і альтернативних джерел енергії. Наука та інновації. 2015. Т. 11, № 6. С. 29 - 39. DOI: doi.org/10.15407/scin11.06.029
4. Будівельна кліматологія: ДСТУ НБВ.1.1-27:2010 – [Чинний від 1 листопада 2011 р.]. – К. : Держспоживстандарт України, 2011. – 123 с. : табл. – (Національні стандарти України).
5. Басок Б.І., Жовнір М.С., Засецький І.Г. Електропостачання житлових будинків на основі відновлюваних джерел енергії. Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ. – Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2014. – С. 61 – 67.

1. Basok B.I., Khibina M.A., Belyaeva T.G. Energoeffektivnyie doma tipa «nul energii». Printsipy sozdaniya i puti razvitiya. Promyishlennaya teplotekhnika, T. 35. №6. 2013. P. 43 – 50.

2. Dolinskiy A.A., Basok B.I., Nedbailo O.M., Belyaeva T.G., Khibina M.A., Tkachenko M.V., Novitska M.P. Kontseptualni osnovy stvorenniya eksperimentalnogo budynku tipu «nul energiyi». Budivelni konstruktsiyi. Vp. 77. 2013. P. 222 – 227.

3. B.I. Basok, T.H. Byelyayeva, I.K. Bozhko, O.M. Nedbailo, V.H. Novikov, M.A. Khibina Systema elektrozabezpechennya eksperymental'noho budynku tipu 0-enerhiyi (ploshcheyu 300 m<sup>2</sup>) na osnovi

vykorystannya vidnovlyuvanykh i al'ternatyvnykh dzherel enerhiyi. Nauka ta innovatsiyi. 2015. T. 11, № 6. P. 29 - 39. DOI: doi.org/10.15407/scin11.06.029

4. Budivěl'na klimatolohiya: DSTU NBV.1.1-27:2010 – [Chynnyu vid 1 lystopada 2011 r.]. – K. : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2011. – 123 p. : tabl. – (Natsional'ni standarty Ukrainy).

5. Basok B.I., Zhovnir M.S., Zaset's'kyu I.H. Elektropostachannya zhytlovykh budynkiv na osnovi vidnovlyuvanykh dzherel enerhiyi. Enerhetyka. Ekolohiya. Lyudyna. Naukovi pratsi NTUU «KPI», IEE. – Kyiv: NTUU «KPI», IEE, 2014. – P. 61 – 67.

УДК 621.316

**Б.І. Басок**, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8935-4248

**О.М. Недбайло**, д-р техн. наук, старш. наук. співр., ORCID 0000-0003-1416-9651

**І.К. Божко**, канд. техн. наук, старш. наук. співр., ORCID 0000-0001-7458-0835

**М.В. Ткаченко**, канд. техн. наук, старш. наук. співр., ORCID 0000-0001-8345-1613

Інститут технічної теплофізики НАН України

## ТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ВІТРО-СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО БУДИНКУ

*Бажання досягти економії енергії органічного палива, зменшуючи негативний техногенний вплив на навколишнє середовище, особливо в умовах глобального потепління, спонукає до пошуку нових підходів у будівництві енергоефективних будинків та будівель. Аналіз накопичених метеорологічних даних про вітровий та сонячний потенціали Києва показує, що в місті можна створити повністю автономний будинок, який буде забезпечуватися електрикою за допомогою сонячної та вітрової енергії. Цілорічний моніторинг атмосферних параметрів, таких як поточні значення швидкості та напрямку вітру, відносної вологості та атмосферного тиску повітря, здійснювався за допомогою портативної метеорологічної станції TFA Nexis за допомогою відповідного програмного забезпечення Primus, що дозволяло збирати та аналізувати дані вимірювань. Дані про інсоляцію для розташування енергоефективного будинку були отримані експериментально у 2019 році за допомогою вимірювань з піранометром SR-U1. Розроблена система складається з вітрогенератора, сонячних модулів, контролерів заряду, інверторів та акумуляторів. Розрахунок виробництва електроенергії сонячною станцією проводився у програмі PVSyst за метеорологічними даними Meteoport. Водночас слід зазначити, що енергетичний внесок фотомодулів має вирішальне значення для електропостачання енергоефективного будинку. Запропоновані інструментальні методи визначення параметрів інсоляції дають можливість оцінити її технічно доступний потенціал для певної території, а також використовувати отримані дані для проектування складних систем електропостачання з використанням енергії вітру та сонячної енергії. Результати дослідження доводять, що в умовах міста Києва існують потенційні можливості для створення житлових будинків з нульовим балансом енергії, в яких з метою електропостачання вітрогенератори та сонячні модулі можуть бути досить успішно використані.*

**Ключові слова:** вітро-сонячна система електропостачання, виробництво електроенергії, інсоляція.

Надійшла 20.03.2021

Received 20.03.2021

В.І. Дешко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8218-3933  
І.Ю. Білоус, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6640-103X  
І.О. Суходуб, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-5895-1306  
О.І. Яценко, ORCID 0000-0002-8001-5987

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ РОЗПОДІЛЕННЯ ПОВІТРООБМІНУ МІЖ КІМНАТАМИ НА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ КВАРТИРИ

Сучасні результати енергетичного аналізу будівель різного призначення в Україні показують, що 30-50% теплоти, що надходить у будівлі, йде на нагрівання припливного повітря ззовні, що складає найбільшу частку в енергетичному балансі будівель. З точки зору енергоспоживання ефективність режиму вентиляції приміщення значною мірою залежить від експлуатаційного графіку та встановлених вимог до повітрообміну в приміщеннях різного призначення. Врахування графіку повітрообміну в першу чергу має сенс при наявності індивідуального регулювання опалення. В такому випадку, при використанні приміщень можна забезпечити комфортний рівень повітрообміну, а при відсутності мешканців знизити його до мінімального рівня. Відповідно до результатів дослідження, застосування переривчастого режиму повітрообміну в досліджуваній квартирі в робочі дні, призводить до зменшення енергоспоживання порівняно з постійним повітрообміном на рівні верхніх значень змінного графіка. З точки зору енергоефективності найбільш ефективним виявилось використання постійного значення кратності повітрообміну за ASHRAE Std 62. Що стосується якості повітря та концентрації CO<sub>2</sub> всередині, то більш ефективним є підхід до вентиляції з збільшеним повітрообміном протягом годин використання приміщень за EN 16798. Таким чином використання нормативних та експериментальних значень кратності повітрообміну для формування погодинних графіків дозволяє більш точно визначити енергетичні показники будівель та вибрати оптимальний графік експлуатації технічних систем для забезпечення якості повітря всередині та теплового комфорту в години присутності людей.

**Ключові слова:** повітрообмін, природня вентиляція, переривчастий режим опалення, EnergyPlus, енергозбереження.

### Вступ

Значна частина житлових будинків в країнах Центральної та Східної Європи не відповідають сучасним вимогам щодо енергоефективності [1]. Програми державної підтримки енергозбереження орієнтовані в першу чергу на утеплення огорожувальних конструкцій та модернізацію систем опалення. Найменша увага приділяється питанням якості повітря в приміщеннях. Сучасні результати енергетичного аналізу будівель різного призначення в Україні показують, що 30-50% теплоти, що надходить у будівлі, йде на нагрівання припливного повітря ззовні, що складає найбільшу частку в енергетичному балансі будівель.

На енергоспоживання будівлі впливають шість основних факторів: зовнішні кліматичні умови, оболонка будівлі, обладнання та енергетичні джерела і системи, експлуатація та технічне обслуговування, діяльність та поведінка мешканців, комфортні умови середовища всередині будівлі [2]. Причому останні три фактори залежать від мешканців та можуть впливати більше ніж три попередні при підвищенні рівня енергоефективності. Щоденна взаємодія людей із інженерними будівельними системами є основою режиму експлуатації будівлі. Режим експлуатації впливає на рівень внутрішніх теплонаходжень, на регулювання налаштувань термостата, провітрювання приміщень, використання електричного та освітлювального обладнання, використання віконних жалюзі та споживання гарячої води для побутових потреб [3].

Більшість досліджень в області вентиляції сфокусована окремо на тепловому комфорті, або на якості внутрішнього повітря, або на енергоспоживанні [4-6]. Значна частка досліджень включає перші два аспекти [7-11]. В роботі [11], на основі річних спостережень, поведінка мешканців названа ключовим фактором який, впливає на кратність повітрообміну, якість внутрішнього повітря та тепловий комфорт в житлових будівлях. Але для найбільш оптимальної оцінки впливу повітрообміну доцільно враховувати всі три аспекти. Взимку робота вентиляційної системи пов'язана з додатковими втратами теплової енергії на нагрівання зовнішнього повітряного потоку, що надходить до приміщень. Тож питання повітрообміну необхідно розглядати комплексно, враховуючи не лише тепловий комфорт та якість внутрішнього повітря, © В.І. Дешко, І.Ю. Білоус, І.О. Суходуб, О.І. Яценко, 2021



а й вплив на енергетичні показники будівлі. З точки зору енергоефективності зменшення швидкості повітрообміну сприяє економії енергоресурсів. Зважаючи на ці принципово важливі критерії, визначення оптимального рівня повітрообміну є важливим завданням при проектуванні будівель та вентиляційних систем, а вивчення якості повітря в приміщенні та параметрів повітрообміну вимагає значної уваги при експлуатації та при термомодернізації для підвищення енергетичних стандартів як у низькоефективних, так і в енергетично ефективних будівлях.

Нормативні документи, що стосуються вентиляції житлових приміщень, відрізняються в залежності від країни де вони застосовуються. Багато країн, в тому числі європейські, використовують вимоги щодо повітрообміну житлових приміщень, подібні до тих, що зазначені у Стандарті ASHRAE 62.2 “Вентиляція та допустима якість повітря в малоповерхових житлових будинках” [12]. На сьогоднішній день даний стандарт містить обґрунтування основних вимог до швидкості повітрообміну та розрахунків вимог до зовнішнього повітря, що надходить в приміщення, для мультизонних систем. ASHRAE також розробила супутнє керівництво до цього стандарту для підтвердження високої якості внутрішнього повітря.

Відповідно до європейських нормативних актів Directive 2010/31/EU та Directive 2012/27/EU, оновлених в 2018 та 2019 роках відповідно, країни Європейського Союзу повинні використовувати національні вимоги щодо енергоефективності, які дозволяють проводити міжнародне порівняння [13]. Національні стандарти країн ЄС не визначають конкретного підходу до вентиляції житлових будівель. В більшості країн може застосовуватися як природня система вентиляції, так і механічна чи гібридна. Норма повітрообміну у більшості стандартів країн ЄС визначена за одним або декількома методами, описаними в EN 16798 [14] (раніше EN-15251), де повітряний потік визначається в л/с на м<sup>2</sup>, л/с на особу або через кратність повітрообміну в год<sup>-1</sup>. При цьому майже кожна країна визначає власне положення з точки зору місцевого витяжного потоку повітря (л/с або год<sup>-1</sup>). В Україні цей стандарт введений в якості національного.

Більшість стандартів не дають чіткого підходу для встановлення нормативного повітрообміну, а лише рекомендують ту чи іншу стратегію для розрахунку. Тож проектувальники мають приймати власне рішення, обґрунтовуючи його на основі національних стандартів. Для енергетичних розрахунків зазвичай використовуються значення кратності повітрообміну, рекомендовані національними стандартами. В Україні та в деяких країнах центральної і східної Європи, при проведенні енергетичних аудитів будівель, існує практика застосування значень постійної кратності повітрообміну для будівлі в цілому. При цьому в національних стандартах також передбачено, що кратність повітрообміну всередині будівлі може бути визначена в ході випробувань.

Експериментальне визначення кратності повітрообміну, при врахуванні організованого повітрообміну та неконтрольованих потоків повітря, для зміни умов експлуатації є складним завданням. На точність вимірювань також впливають динамічні параметри, такі як різниця температур всередині-зовні, зовнішній тиск, а також напрям і швидкість вітру [10]. В статті [15] описано підхід до визначення кратності повітрообміну на базі ряду експериментів за методом вимірювання концентрації CO<sub>2</sub> в житловому приміщенні, яке є об'єктом дослідження в даній роботі.

Альтернативний метод визначення рівня повітрообміну полягає у використанні емпіричних методів визначення швидкості повітрообміну на основі стандартів ASHRAE та BLAST. Вентиляція створюється на основі трьох механізмів: стак ефект, вітровий ефект та робота механічної системи, при цьому перші два стосуються природної складової. Серед цих механізмів ефект вітру має найскладніший характер і залежить від поверховості, орієнтації швидкості руху та напрямку вітру та іншого [16]. Емпіричні підходи знайшли відображення в програмному забезпеченні для розрахунку енергетичних показників будівель, найбільш поширені: eQuest, EnergyPlus, TRNSYS, DOE2, DesignBuilder та Ecotect Analysis. Наприклад, в [17] запропоновано метод оцінки інфільтрації в комерційних будівлях за допомогою EnergyPlus, який враховує величину швидкості вітру, різницю температур (більшість емпіричних методів враховує лише температурний ефект), але не враховує напрямок вітру.

Зважаючи на обмежену кількість досліджень повітрообміну при експлуатації будівель в Україні і країнах Центральної та Східної Європи актуальним є поєднання аналізу якості повітря з рівнем повітрообміну і потребою на опалення для житлових приміщень будівель. У даній роботі вплив розподілу повітрообміну в приміщеннях квартири вивчається на базі результатів експериментального визначення кратності за методом вимірювання концентрації CO<sub>2</sub> та використання значень, рекомендованих діючими нормативами. Для кількісної оцінки впливу статичних та динамічних факторів застосовувалися програми для енергетичного моделювання будівель. Одним з найбільш популярних підходів до оцінки енергетичних показників будівель є використання програми EnergyPlus разом з користувацьким інтерфейсом DesignBuilder. За допомогою даного програмного забезпечення було отримані дані у місячному розрізі щодо теплового навантаження та енергоспоживання досліджуваного приміщення квартири при різних режимах повітрообміну, заданих виходячи з результатів експерименту та діючих норм. В роботі [18] вже було досліджено вплив зовнішніх факторів на енергоспоживання об'єкту за постійного рівня повітрообміну.

В даній роботі дослідження дозволяють оцінити енергетичну ефективність використання природної вентиляції в квартирі, а також проаналізувати наведені підходи до задання повітрообміну в енергетичних розрахунках.

#### Мета та завдання

Метою роботи є визначення впливу фактичних та нормативних умов повітрообміну на динаміку споживання енергії у квартирі з переривчастим режимом опалення.

Для досягнення поставленої мети були виконані наступні завдання:

- 1) аналіз впливу розподілу фактичних значень кратності повітрообміну на енергоспоживання квартири;
- 2) аналіз впливу розподілу нормативних значень кратності повітрообміну на енергоспоживання квартири;
- 3) порівняння різних підходів до задання повітрообміну при енергетичних розрахунках, включаючи використання постійних значень кратності із діючих стандартів та графіку повітрообміну за результатами експерименту та значеннями зі стандартів;

- 4) оцінка впливу сонячних теплонадходжень на енергоспоживання квартири при досліджуваних режимах повітрообміну.

#### Матеріал та результати досліджень

##### Вихідні дані.

Об'єктом дослідження обрано існуюче житлове приміщення. Це двокімнатна квартира, розміщена на четвертому поверсі п'ятиповерхового житлового будинку м. Києва, побудованому у 2016 році. Досліджувана квартира має дві зовнішні стіни. Загальна площа приміщень квартири, без балкону, становить 49,44 м<sup>2</sup>, висота приміщень – 2,7 м. Базові геометричні параметри досліджуваної моделі квартири представлено на плані на рис. 1. При створенні енергетичної моделі приміщення квартири було розділено на п'ять зон, відповідних кімнатам: дві спальні, кухня, санвузол та коридор. Таке рішення пов'язано з необхідністю врахування того факту, що кожна кімната квартири має специфічні поведінкові та експлуатаційні характеристики. Дані щодо площі та опору теплопередачі огорожувальних конструкцій об'єкту дослідження зведені в табл. 1.

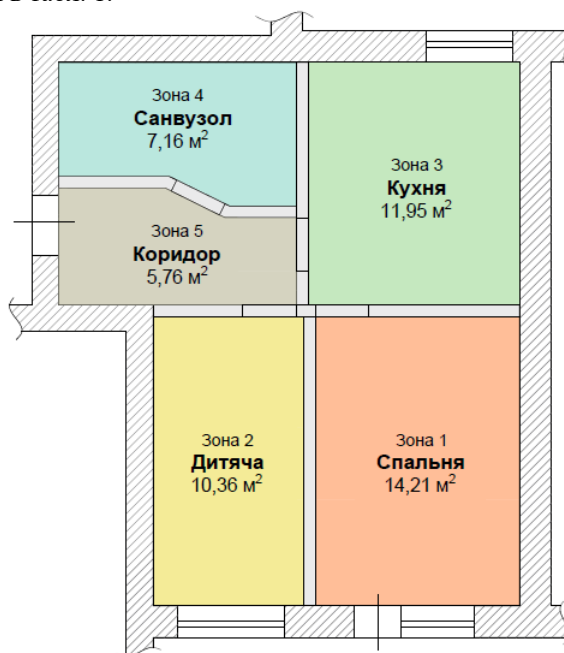


Рисунок 1 – План об'єкту дослідження

Таблиця 1 – Характеристика огорожувальних конструкцій

Тип конструкції	Опір теплопередачі конструкції <sup>1</sup> , $R_i, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$	Площа конструкції, $A_i, \text{ м}^2$
Зовнішні стіни	1,506	16,1
Вікна та балконні двері	0,945	7,47
Підлога	-	49,44
Стеля	-	49,44

<sup>1</sup> – опір теплопередачі зовнішніх стін визначений з урахуванням теплопровідних включень.

Джерелом тепlopостачання квартири є індивідуальний двоконтурний газовий котел, який застосовуються для забезпечення контурів опалення та гарячого водopостачання. Опалення квартири здійснюється протягом 176 діб опалювального періоду. Внутрішня водяна система опалення квартири двотрубна, горизонтальна. Опалювальні прилади (радіатори) у спальнях та кухні встановлено біля зовнішніх стін під вікнами без радіаційного захисту, у санвузлі опалення здійснюється за допомогою теплої підлоги. В програмній моделі передбачено, що регулювання температури повітря в кімнатах здійснюється мешканцями за допомогою електронного термостату. Термостат обладнаний датчиками температури, розміщеними в кімнатах де є опалення. Наявність термостату запобігає зниженню температури нижче запрограмованої в кімнатах де розміщені датчики. Температурний режим програмується окремо для робочих та вихідних днів.

Система вентиляції квартири припливно-витяжна з природним спонуканням. Приплив свіжого повітря всередину відбувається шляхом інфільтрації (через нещільності у вікнах та дверях), а також через систему мікропровітрювання вікон. Повітрообмін відбувається за рахунок перепаду тиску всередині та зовні будівлі. Будівля оснащена системою витяжних вентиляційних повітроводів, які в місцях виходу обладнані механічними витяжними системами. Продуктивність кухонної витяжки 400-800 м<sup>3</sup>/год, в залежності від вибраного режиму її роботи. Продуктивність витяжного вентилятора у санвузлі 125 м<sup>3</sup>/год.

У досліджуваній квартирі проживає три людини, активність яких відрізняється у робочі та вихідні дні. Внутрішній режим експлуатації приміщень квартири безпосередньо впливає на графік використання теплової енергії та на внутрішні теплові надходження від людей, системи освітлення та електричного обладнання. Дані що внутрішніх теплонадходжень протягом робочого та вихідного днів зведені у таблицях 2 і 3 відповідно.

Таблиця 2 – Теплонадходження в робочий день

	Мешканці, Вт					Освітлення, Вт					Обладнання, Вт				
	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор
0-6	162,1	80,9	0	0	0	0	0	0	0	0	5,1	3,7	47,8	0	0,9
6-7	27,0	27,0	143,9	107,9	54,4	14,2	10,4	29,9	20,1	12,1	30,5	22,2	143,4	8,6	9,0
7-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,1	3,7	47,8	0	0,9
18-19	20,3	26,9	71,9	27,1	27,2	22,7	16,6	20,9	4,3	1,7	22,9	16,7	95,6	4,8	2,7
19-20	40,6	53,7	143,9	54,1	54,4	45,5	33,1	41,8	8,6	3,5	50,9	37,1	143,4	9,7	5,4
20-21	40,6	53,7	143,9	54,1	54,4	45,5	33,1	41,8	8,6	3,5	50,9	37,1	143,4	8,6	5,4
21-22	40,6	53,7	143,9	54,1	54,4	45,5	33,1	41,8	8,6	3,5	50,9	37,1	143,4	6,4	5,4
22-23	162,1	80,9	0	0	0	11,4	8,3	0	0	0	35,6	26,0	47,8	0	0,9
23-0	162,1	80,9	0	0	0	11,4	8,3	0	0	0	15,3	11,1	47,8	0	0,9

Таблиця 3 – Теплонадходження у вихідний день

	Мешканці, Вт					Освітлення, Вт					Обладнання, Вт				
	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор	Сп	Дит	Кух	Сан	Кор
0-6	162,1	80,9	0	0	0	0	0	0	0	0	5,1	3,7	47,8	0	0,9
6-8	80,9	80,9	72,1	37,9	24,3	8,5	6,2	14,9	11,5	5,2	20,4	14,8	95,6	4,3	3,6
8-9	40,6	40,6	108	26,9	0	0	0	6,0	4,3	1,7	25,4	18,5	95,6	4,3	3,6
9-12	40,6	40,6	108	26,9	0	0	0	6,0	4,3	1,7	40,7	29,7	95,6	5,4	3,6
12-13	40,6	40,6	108	26,9	0	0	0	6,0	4,3	1,7	30,5	22,2	95,6	5,4	3,6
13-16	40,6	40,6	108	26,9	0	0	0	6,0	4,3	1,7	30,5	22,2	95,6	2,1	3,6
16-17	40,6	40,6	108	26,9	0	19,9	14,5	6,0	4,3	1,7	30,5	22,2	95,6	2,1	3,6
17-18	40,6	40,6	108	26,9	0	19,9	14,5	6,0	4,3	1,7	40,7	29,7	95,6	2,1	3,6
18-19	40,6	40,6	108	26,9	0	19,9	14,5	6,0	4,3	1,7	50,9	37,1	95,6	3,8	3,6
19-22	60,8	80,9	108	37,9	24,3	45,5	33,1	35,8	8,6	3,5	50,9	37,1	95,6	5,4	3,6
22-23	162,1	80,9	0	0	0	11,4	8,3	0	0	0	35,6	26,0	47,8	0	0,9
23-0	162,1	80,9	0	0	0	11,4	8,3	0	0	0	15,3	11,1	47,8	0	0,9

У досліджуваній квартирі реалізований переривчастий режим опалення згідно графіку присутності мешканців. Цей режим полягає у зниженні внутрішньої температури у робочий час, коли мешканці відсутні в квартирі, та у нічні години. Фактичний переривчастий режим опалення, заданий в EnergyPlus за допомогою графіків для робочого та вихідного днів опалювального періоду:

– в робочі дні: з 06:00 до 07:00 – 22°C, з 07:00 до 18:30 – 16°C, з 18:30 до 22:00 – 22°C, з 22:00 до 06:00 – 20°C;

– у вихідні дні: з 06:00 до 22:00 – 22°C, з 22:00 до 06:00 – 20°C.

Вплив глобального потепління призводить до того, що період, типовий для міжсезоння займає тепер значно більшу кількість часу опалювального періоду ніж раніше, тому застосування переривчастого режиму опалення і вентиляції у такі періоди потребує більш детального аналізу. Для представлення результатів моделювання було обрано місяць березень. З метою наближення умов моделювання до реальних, було використано фактичні погодинні дані зовнішньої температури, швидкості та напрямку вітру, зібрані за даними з найближчої до досліджуваного об'єкту метеостанції. Згідно з фактичними даними для

березня місяця середньомісячна температура становила 5,6°C, швидкість вітру – 4 м/с, переважний напрямок вітру – південно-південно-західний. Для погодинних досліджень було обрано погодні умови для типового дня березня, коли проводилися експериментальні вимірювання кратності повітрообміну. Параметри навколишнього середовища для вибраного дня (температура повітря, швидкість вітру та сонячні теплонадходження на вертикальні поверхні) представлено на рис. 2. Сонячні теплонадходження представлені саме для південної та північної орієнтації, оскільки моделювання проводилося для цих двох варіантів, - коли зовнішні стіни спалень орієнтовані на південь та навпаки. Коефіцієнт пропускання сонячної радіації вікнами – 0,579.

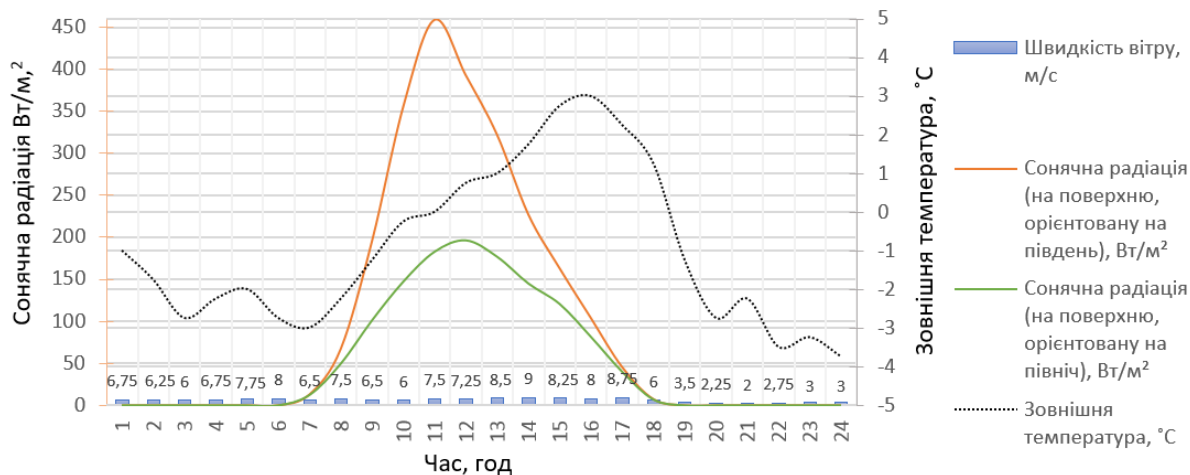


Рисунок 2 – Параметри навколишнього середовища для репрезентативного дня

З метою аналізу впливу повітрообміну на теплове навантаження приміщень було проведено дослідження ряду підходів до задання повітрообміну в житлових приміщеннях, рекомендованих діючими стандартами: ASHRAE Std 62.2-2019 [12], EN 16798-1:2019 [14] та українським ДБН В.2.2-15:2019 [19]. Нормативні значення кратності повітрообміну та витяжних повітряних потоків за цими нормами для досліджуваного приміщення квартири зведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Вимоги до повітрообміну досліджуваного приміщення (відповідно до діючих стандартів)

Стандарт	Приточний повітряний потік				Витяжний повітряний потік			
	Будівля в цілому		Спальня		Кухня		Санвузол	
	л/с	год <sup>-1</sup>	л/с, особу	год <sup>-1</sup>	л/с	год <sup>-1</sup>	л/с	год <sup>-1</sup>
ASHRAE Std 62.2-2019	17,92	0,483			50		25	
EN 16798-1:2019	20,76	0,56	7		20		25	
ДБН В.2.2-15-2019				0,5		1,5		1,5

В ASHRAE Std 62.2-2019 є можливість використання загальних значень кратності повітрообміну для всього житла. В стандарті приведено таблиці з вимогами щодо витрати зовнішнього повітря в залежності від площі житла та кількості спалень. Також, за цим стандартом є можливість визначення потреби в зовнішньому повітрі (л/с) за формулою:

$$Q_{tot} = 0.15A_{floor} + 3.5(N_{br} + 1) \quad (1)$$

де  
 $Q_{tot}$  – загальний необхідний рівень повітрообміну, л/с;  
 $A_{floor}$  – площа житла, м<sup>2</sup>  
 $N_{br}$  – кількість спалень.

Загальна витрата повітря, розрахована за формулою (1) для досліджуваного житла з двома спальнями та загальною площею 49,44 м<sup>2</sup>, складає 17,92 л/с, що еквівалентно кратності повітрообміну 0,483 год<sup>-1</sup> (табл. 4).

Підхід до визначення необхідного повітрообміну за EN 16798-1:2019 заснований на принципі врахування всіх наявних джерел забруднення у будинку. Як і в Standard 62.2, в даному документі представлено приклад загальних норм вентиляції при неперервному режимі вентилявання протягом часу використання житла. Але в цьому стандарті така норма визначається за категорією будівлі, яка залежить від підвищення внутрішньої концентрації CO<sub>2</sub>, в порівнянні з зовнішньою у PPM. Оцінка категорії внутрішнього середовища будівлі базується на категоріях ряду факторів: розрахункова внутрішня температура протягом періодів опалення та охолодження, розрахункове значення вентиляції, вологості, освітлення, шуму. Досліджуване приміщення відноситься до категорії II, що відображає нормальний рівень очікувань щодо більшості факторів. Загальна норма вентиляції житла в EN 16798-1:2019 виражена в л/с на квадратний метр, а також через кратність повітрообміну, при внутрішній висоті стелі 2,5 м. Для досліджуваного приміщення використовувалось значення витрати повітря 0,42 л/с на квадратний метр, що еквівалентно кратності повітрообміну 0,56 год<sup>-1</sup> при внутрішній висоті 2,7 м (табл. 4).

Українські будівельні норми для житлових будинків ДБН В.2.2-15:2019 визначають мінімальні вимоги до повітрообміну в різних приміщеннях при природній системі вентиляції. Так мінімальна кратність повітрообміну для спалень за цим документом визначається на рівні 0,5 год<sup>-1</sup>, для кухні та сміщеного санвузла – 1,5 год<sup>-1</sup> (табл. 4).

Три підходи, наведені вище, засновуються на використанні значень загальної норми повітрообміну для житла в цілому або для окремих кімнат (ДБН В.2.2-15:2019). Для наближення розрахункових умов повітрообміну до реального експлуатаційного графіку було також проведено дослідження нормативного рівня повітрообміну для окремих приміщень за EN 16798-1:2019, з врахуванням годин використання та невикористання приміщень. В цьому стандарті, окрім загальної норми повітрообміну для житла в цілому, також приведено значення необхідної витрати повітря на одну людину. Для будівлі II категорії це значення становить 7 л/с на людину. Для кухні та санвузла за цим стандартом норма визначається за витратою витяжного повітряного потоку на точку. У випадку досліджуваної квартири необхідна витрата для кухні становить 20 л/с, для санвузла – 25 л/с. Необхідно зазначити, що при створенні графіку вентиляції за нормами EN 16798-1:2019 витяжні потоки було скориговано відповідно до експлуатаційного режиму квартири. В періоди відсутності людей відсутня потреба забезпечення комфортного рівня повітрообміну. В EN 16798-1:2019 рекомендується використовувати мінімальну норму вентиляції на рівні від 0,05 л/с на м<sup>2</sup> до 0,1 л/с на м<sup>2</sup> протягом годин невикористання приміщень. В українському ДБН В.2.5-67:2013 ОВК також зазначено, що кратність повітрообміну слід приймати 0,1 год<sup>-1</sup> у період невикористання приміщення за умови зачинених вікон і дверей. Тож задана нормативна кратність повітрообміну житла в робочі дні, в період відсутності людей (з 7:00 до 18:30) визначена на рівні 0,1 год<sup>-1</sup>. Дане значення також застосовано для всіх приміщень, окрім спалень, в той час коли вони не використовуються за графіком присутності людей. Заданий режим повітрообміну на основі експлуатаційного режиму та нормативних вимог EN 16798-1:2019, для робочого та вихідного днів представлено в табл. 5.

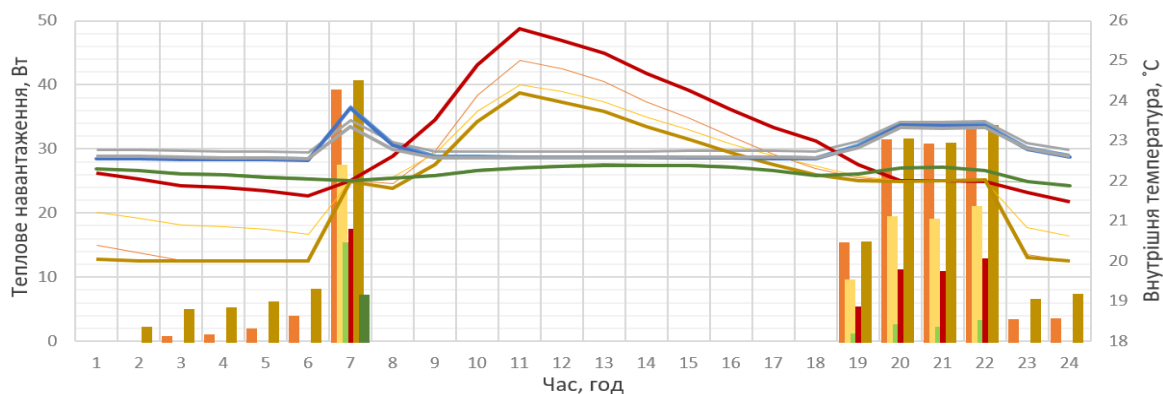
Таблиця 5 – Погодинна кратність повітрообміну за рекомендаціями EN 16798-1:2019 та за результатами фактичних вимірів, задана відповідно до експлуатаційного режиму робочого та вихідного дня

	EN 16798-1:2019					Експеримент				
	Робочий день					Вихідний день				
	Спальня	Дитяча	Кухня	Санвузол	Коридор	Спальня	Дитяча	Кухня	Санвузол	Коридор
0-6	1,33	0,92	0,12	0,05	0,05	0,73	1,43	0,15	0,05	0,05
6-18	1,8	1,39	1,23	0,05	0,05	1,17	1,87	0,94	0,05	0,05
18-22	1,65	1,24	0,71	0,05	0,05	1,02	1,72	0,54	0,05	0,05
22-0	1,33	0,92	0,12	0,05	0,05	0,73	1,43	0,15	0,05	0,05
0-6	1,33	0,92	0,12	0,05	0,05	0,73	1,43	0,15	0,05	0,05
6-8	1,47	1,06	0,53	0,05	0,05	0,86	1,56	0,38	0,05	0,05
8-18	1,47	1,06	0,26	0,05	0,05	0,86	1,56	0,28	0,05	0,05
18-19	1,47	1,06	0,26	0,05	0,05	0,86	1,56	0,28	0,05	0,05
19-22	1,47	1,06	0,53	0,05	0,05	0,86	1,56	0,38	0,05	0,05
22-0	1,33	0,92	0,12	0,05	0,05	0,73	1,43	0,15	0,05	0,05

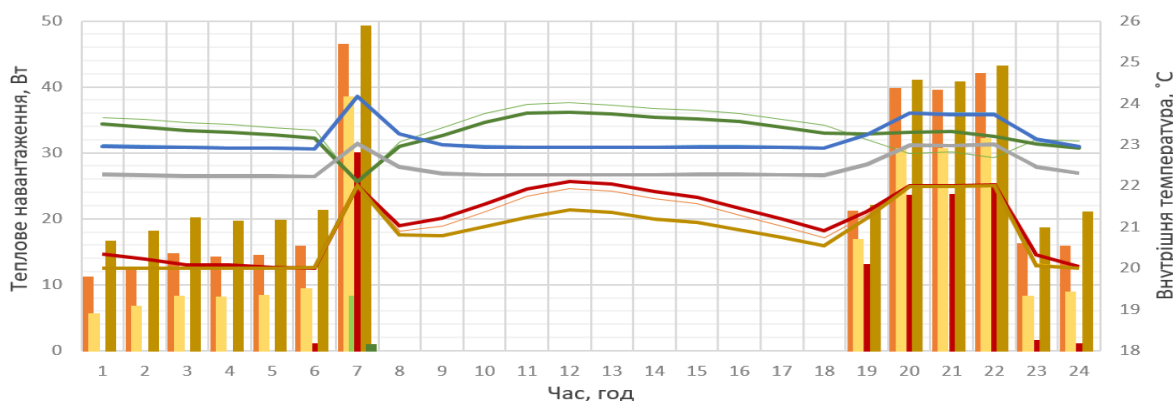
За результатами проведеного в роботі [15] експерименту було проаналізовано фактичні дані про витрату повітря у кожній кімнаті. При заданні графіку повітрообміну за результатами вимірювань в квартирі, передбачається, що зовнішнє повітря надходить безпосередньо до приміщень, в яких є вікна (спальні та кухня), шляхом інфільтрації. Фактичний рівень повітрообміну для спальної та дитячої кімнат обрано за експериментально виміряною кратністю повітрообміну: в режимі мікропровітрювання, за присутності людей в квартирі – 0,73 год<sup>-1</sup> та 1,43 год<sup>-1</sup>; при закритих вікнах, за відсутності людей – 0,1 год<sup>-1</sup>

та  $0,14 \text{ год}^{-1}$  для спальні та дитячої кімнат відповідно. Усереднена погодинна кратність повітрообміну в кухні та санвузлі визначена за витратою повітря при включенні механічних витяжних систем. Частота використання витяжок визначена експлуатаційним режимом приміщень та графіком присутності людей. Подача повітря до коридору та санвузла здійснюється шляхом перенесення нагрітого повітря зі спалень і кухні та збільшується при включенні витяжних систем на витрату витяжного повітряного потоку. Тож за умови, що повітря нагрівається в кімнатах, через які воно надходить при формуванні графіку повітрообміну вважаємо, що кратність повітрообміну по відношенню до припливного зовнішнього повітря в коридорі та санвузлі задається на мінімальному рівні  $0,05 \text{ год}^{-1}$ . Користуючись результатами аналізу даних щодо фактичної кратності повітрообміну в приміщеннях, а також продуктивності наявних витяжних систем в кухні та санвузлі, задана кратність повітрообміну по відношенню до припливного зовнішнього повітря зведена в табл. 5.

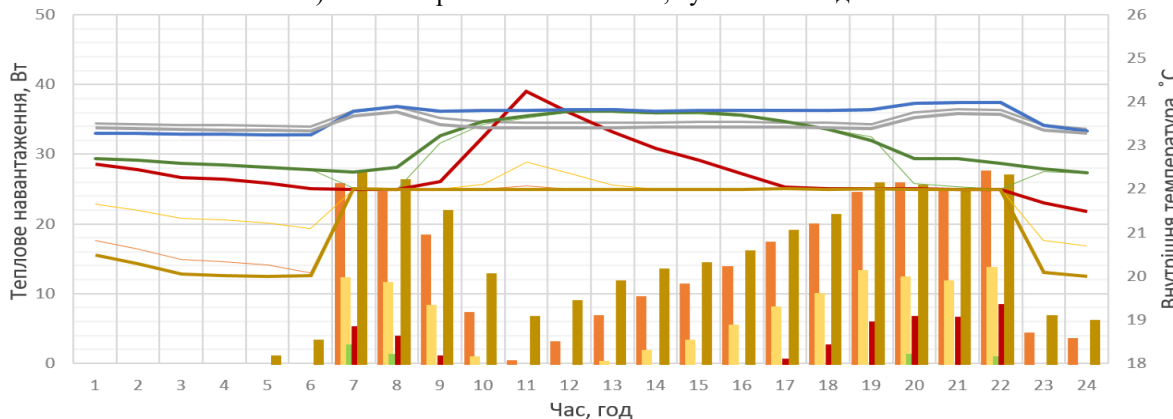
Результати моделювання теплового навантаження кімнат квартири та внутрішніх температур за умов нормативного повітрообміну за заданим графіком відповідно до рекомендацій EN 16798-1:2019 та за графіком за результатами фактичних вимірів (табл. 5) для обраної доби (рис. 2) при експлуатаційному режимі робочого та вихідного дня та для різної орієнтації вікон за сторонами світу представлені на рис. 3.



а) спальні орієнтовані на південь, кухня – на північ



б) спальні орієнтовані на північ, кухня – на південь



в) спальні орієнтовані на південь, кухня – на північ

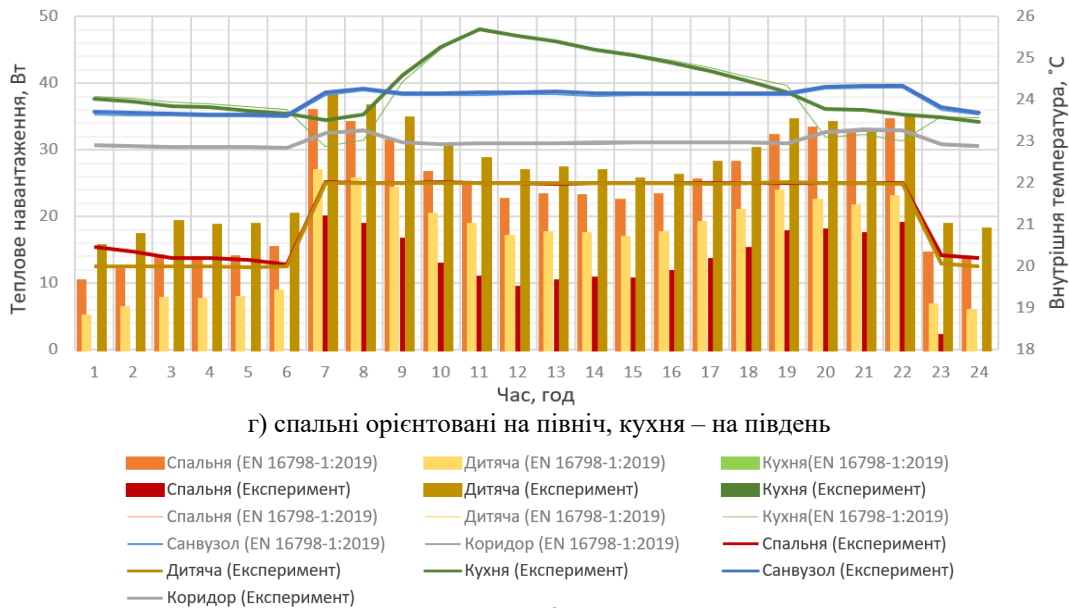


Рисунок 3 – Погодинне теплове навантаження при використанні заданого графіку повітрообміну за EN 16798-1:2019 та результатами експерименту (табл. 5) для робочого (а, б) та вихідного (в, г) дня

Відповідно до рис. 3 (а, б) в години невикористання квартири котел вимикається тому що внутрішня температура в кімнатах не досягає нижньої запрограмованої грані – 16°C. Відсутність теплового навантаження в кухні на більшості графіків пояснюється низьким рівнем повітрообміну, зафіксованим під час роботи витяжки. Теплове навантаження санвузла відсутнє, так як на нього майже не впливає повітрообмін через те що до санвузла, як і до коридору, потрапляє вже нагріте в інших кімнатах повітря. В денні години в спальнях або в кухні внутрішня температура часту перевищує задану 22°C. Це пов'язано з наявністю сонячних теплонадходжень через світлопрозорі конструкції від 7 до 19 год (рис. 2), значне підвищення внутрішньої температури спостерігаються в кімнатах, огорожувальні конструкції яких орієнтовані на південь.

За результатами моделювання було проведено оцінку впливу режиму повітрообміну на рівень і динаміку енергетичних показників квартири при переривчастому опаленні з урахуванням графіків зміни режиму експлуатації і погодних умов. В таблицю 6 зведено дані результатів моделювання за різних підходів до задання повітрообміну в квартирі з переривчастим режимом опалення. Результати включають дані щодо енергоспоживання, середньозваженої кратності повітрообміну та внутрішньої температури досліджуваного приміщення для експлуатаційних режимів робочого та вихідного дня за однакових погодних умов (рис. 2) щодо цих показників. Графічна інтерпретація результатів представлена на рис. 4. Досліджені підходи включають як метод задання постійної кратності повітрообміну (CVA) для всього житла, визначеної згідно рекомендацій ASHRAE Std 62.2, EN 16798-1:2019 та ДБН В.2.2-15:2019, так і використання графіків повітрообміну в різних кімнатах (SVA) відповідно до EN 16798-1:2019 та типового експлуатаційного режиму в різних кімнатах.

Таблиця 6 – Результати моделювання за різними підходами до задання повітрообміну в квартирі

Підхід до задання повітрообміну	Орієнтація <sup>1</sup>	Споживання теплової енергії, кВт·год			Внутрішня температура, °C			Середньозважена кратність повітрообміну, год <sup>-1</sup>		
		Середньо-добова	Робочий день	Вихідний день	Середньо-добова	Робочий день	Вихідний день	Середньо-добова	Робочий день	Вихідний день
ASHRAE Std 62.2, 2019 (постійна кратність)	Пд-Пн	1,97	1,23	2,98	21,21	21,02	21,56	0,483	0,483	0,483
	Пн-Пд	3,44	3,15	7,07	20,47	20,09	20,91			
EN 16798-1:2019 (постійна кратність)	Пд-Пн	2,83	2,72	5,16	20,88	20,63	21,22	0,56	0,56	0,56
	Пн-Пд	4,46	4,55	9,54	20,26	19,8	20,74			
ДБН В.2.2-15:2019 (постійна кратність)	Пд-Пн	7,36	8,25	14,6	21,26	20,95	21,92	0,828	0,828	0,828
	Пн-Пд	8,72	10,47	19,4	20,43	19,9	21,2			
EN 16798-1:2019 (за графіком, табл. 5)	Пд-Пн	2,59	3,56	4,98	22,37	22,43	22,67	0,503	0,435	0,7
	Пн-Пд	5,02	6,54	11,93	22,16	22,17	22,77			
За результатами експерименту (за графіком, табл. 5)	Пд-Пн	2,09	2,85	3,85	22,42	22,5	22,78	0,449	0,387	0,628
	Пн-Пд	4,37	5,28	9,94	22,17	22,17	22,82			

<sup>1</sup> – Пд-Пн – спальні орієнтовані на південь, кухня – на північ; – Пн-Пд – спальні орієнтовані на північ, кухня – на південь.

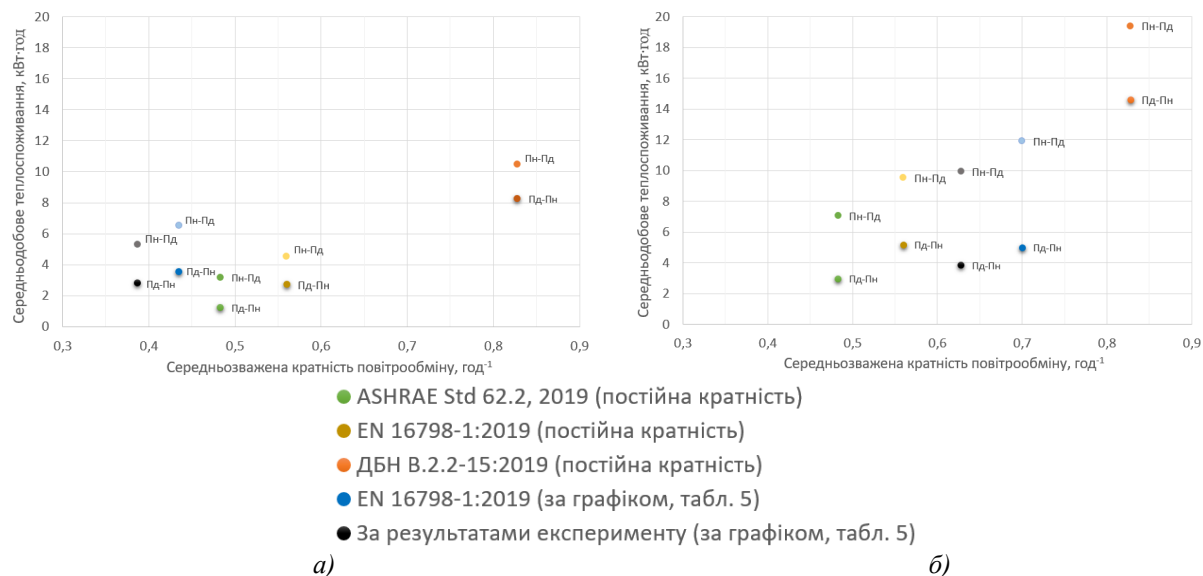


Рисунок 4 – Залежність середньодобового енергоспоживання від середньозваженої кратності повітрообміну, на базі різних підходів до задання повітрообміну, для робочого (а) та вихідного (б) дня

Результати динамічного моделювання свідчать про те, що від обраного підходу до задання повітрообміну в значній мірі залежить кількість теплоти, що витрачається на нагрів свіжого повітря, яке надходить ззовні, та результат визначення споживання енергії на опалення. У випадку використання постійних значень кратності той самий рівень повітрообміну забезпечується у години використання і невикористання приміщень. При цьому маємо практично пряму пропорційну залежність кратності повітрообміну від енергоспоживання для робочого та вихідного дня (рис. 4). За заданим режимом переривчастого опалення у робочі дні, при відсутності людей в квартирі (7:00 – 18:30), в результаті моделювання виявлено, що використання навіть найвищого з досліджуваних значень кратності не призведе до увімкнення котла та збільшення теплового навантаження в ці години. Це відповідає режиму роботи котла, що має місце на практиці для розглянутих погодних умов. За умов поєднання з впливами графіків переривчастого опалення та теплонадходжень від інших джерел, перш за все від сонця, вплив кратності на середні температури внутрішнього повітря не має регулярного характеру. Для репрезентативних робочого та вихідного днів прийняті найбільш холодні для обраного періоду погодні умови, тому для цих днів дані по споживанню енергії на опалення вищі за середньодобові за місяць (табл. 5). Таким чином, результати свідчать про те, що підхід до врахування режиму повітрообміну безпосередньо впливає на енергоспоживання будівлі.

## Висновки.

В результаті дослідження вимог до повітрообміну житлових приміщень виявлено, що вентиляція в спальнях визначає загальний рівень вентиляції всього житла в типових малогабаритних квартирах. Зазвичай, для розрахунку рівня енергетичної ефективності будівель використовують нормативне значення кратності повітрообміну. Використання постійних значень кратності повітрообміну (наведених в нормах ASHRAE і CEN) при розрахунках житлових будівель, є доцільним для визначення енергетичних показників цих будівель за умов експлуатації, що доводиться подібним рівнем енергоспоживання як при постійній кратності повітрообміну так і при врахуванні експлуатаційного режиму. Необхідно зазначити, що українські норми ДБН В.2.2-15:2019 є завищеними, порівняно з вищезгаданими, оскільки вони є проєктними. Врахування ж графіку повітрообміну в першу чергу має сенс за наявності індивідуального регулювання опалення. В такому випадку, при використанні приміщень можна забезпечити комфортний рівень повітрообміну, а за відсутності людей низити його до мінімального рівня. Використання експериментально-розрахункових значень кратності повітрообміну дозволить більш точно визначити енергетичні характеристики будівель відповідно до реальних умов та підібрати оптимальний графік управління інженерними мережами будівлі, в тому числі підібрати оптимальні переривчасті режими опалення з забезпечення комфортних умов в робочі години.

З точки зору енергоефективності встановлення вікон на мікропровітрювання за присутності людей, їх закриття за відсутності, та контроль роботи витяжних систем може забезпечити рівень енергоспоживання, властивий приміщенням з механічною системою вентиляції. Але для виключення впливу людського фактору більш доцільним є використання сучасних вентиляційних систем з контролем



витрати повітря. Застосування регульованого режиму повітрообміну дозволяє підтримувати високу якість внутрішнього повітря за присутності людей, уникаючи при цьому підвищених втрат теплоти на нагрівання зовнішнього повітря в години невикористання приміщень. При цьому механічна система вентиляції має бути обладнана сенсорними датчиками присутності людей, внутрішньої температури, концентрації CO<sub>2</sub> та летючих органічних сполук. Необхідно також зазначити, що з метою енергозбереження, використання вентиляційних систем з контролем витрати повітря має супроводжуватись можливістю задання переривчастого режиму опалення приміщень за допомогою термостатів в кожній кімнаті. З точки зору індивідуального рівня комфортності застосування контролю повітрообміну за графіком може забезпечити кращу якість повітря в години використання приміщення.

#### **Список використаної літератури**

1. Földváry, V., Bekö, G., Langer, S., Arrhenius, K., Petráš, D. (2017) Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia. *Building and Environment*. Vol. 122. Pp. 363–372.
2. Yoshino H., Hong T., Nord N. (2017) IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings – Analysis and evaluation methods. *Energy and Buildings*, 152, 124–136.
3. Hong, T., Taylor-Lange, S. C., D’Oca, S., Yan, D., & Corngati, S. P. (2016). Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. *Energy and Buildings*, 116, 694–702.
4. Canha, N., Lage, J., Candeias, S., Alves, C., & Almeida, S. M. (2017). Indoor air quality during sleep under different ventilation patterns. *Atmospheric Pollution Research*, 8(6), 1132–1142.
5. Ren, Z., & Chen, D. (2015). Simulation of Air Infiltration of Australian Housing and its Impact on Energy Consumption. *Energy Procedia*, 78, 2717–2723.
6. Lu, D. B., & Warsinger, D. M. (2020). Energy savings of retrofitting residential buildings with variable air volume systems across different climates. *Journal of Building Engineering*, 30, 101223.
7. Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period. *Journal of Building Engineering*, 100917.
8. Simanic, B., Nordquist, B., Bagge, H., & Johansson, D. (2019). Indoor air temperatures, CO<sub>2</sub> concentrations and ventilation rates: Long-term measurements in newly built low-energy schools in Sweden. *Journal of Building Engineering*, 25, 100827.
9. M Cehlin, T Karimipannah, U Larsson, A Ameen. (2019). Comparing thermal comfort and air quality performance of two active chilled beam systems in an open-plan office. *Journal of Building Engineering*, 100827.
10. Leivo, V., Prasauskas, T., Du, L., Turunen, M., Kiviste, M., Aaltonen, A., Haverinen-Shaughnessy, U. (2018). Indoor thermal environment, air exchange rates, and carbon dioxide concentrations before and after energy retro fits in Finnish and Lithuanian multi-family buildings. *Science of The Total Environment*, 621, 398–406.
11. P.F. Pereira, N.M. Ramos, R.M. Almeida, M.L. Simoes, E. Barreira, Occupant influence on residential ventilation patterns in mild climate conditions, *Energy Procedia* 132 (2017) 837–842 (11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway).
12. ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2019. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings, ASHRAE, Atlanta, Georgia.
13. D. Zukowska, G. Rojas, E. Burman, G. Guyot, M. del C. Bocanegra-Yanez, J. Laverge, G. Cao, J. Kolarik, Ventilation in low energy residences—a survey on code requirements, implementation barriers and operational challenges from seven European countries, *Int. J. Vent.* (2020) 1–20
14. EN 16798-1, Energy Performance of Buildings – Part 1: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics – Module M1-6, European Standard, 2018.
15. Експериментальне дослідження якості повітря та повітрообміну в закладах освіти та житлових будівлях / Дешко В.І., Білоус І.Ю., Винорадов-Салтиков В.О., Суходуб І.О., Яценко О.І. // Журнал «Вісник КНУТД». Випуск № 4 (148). Київ 2021, С. 25-37
16. Bilous, I.Yu., Deshko, V.I., Sukhodub, I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. 96(4). Pp. 27–41.
17. Ng, L., Persily, A., Emmerich, S. (2015) Improving infiltration modeling in commercial building energy models. *Energy and Buildings*, 88, 316–323.
18. Deshko V., Sukhodub I., Yatsenko O. (2020). Joint influence of intermittent heating mode and outdoor factors on apartment heat load. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 191, 18-27.
19. ДБН В.2.2-15:2019 Житлові будинки. Основні положення. [Чинний з 01.12.2019]. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019. 44 с.

V. Deshko, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-8218-3933

I. Bilous, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-6640-103X

I. Sukhodub, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-5895-1306

O. Yatsenko, Asst. Lect., ORCID 0000-0002-8001-5987

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF AIR EXCHANGE DISTRIBUTION BETWEEN ROOMS ON THE APARTMENT ENERGY CONSUMPTION

*Modern results of Ukrainian buildings energy analysis show that 30-50% of the energy for heating goes to heat the supply air, and that is the largest share in the building energy balance. In terms of energy consumption, efficiency of the air exchange mode largely depends on occupancy schedule and air distribution in time and space. The application of air exchange schedule approach makes more sense in case when individual heating control is carried out. Therefore, during occupied hours, the comfortable ventilation level can be ensured, and, during unoccupied hours, it can be reduced to a minimum. According to the results of the study, the use of intermittent air exchange mode in the studied apartment on weekdays, leads to decrease in energy consumption compared to constant air exchange at the level of upper values of the ventilation schedule. In terms of energy efficiency, the use of the constant air change rate from ASHRAE Std 62 is the most efficient approach. In terms of indoor air quality and concentration of CO<sub>2</sub> and VOCs, the scheduled air exchange approach with increased air change rates (from EN 16798) during occupied hours is more efficient. Therefore, the use of required and experimental air change rate values to create the hourly schedules allows to define more precisely a building energy consumption and to choose an optimal operation schedule for building engineering systems to provide thermal comfort and indoor air quality during occupied hours.*

**Keywords:** air exchange, natural ventilation, intermittent heating mode, EnergyPlus, energy saving.

### REFERENCES

1. Földváry, V., Bekö, G., Langer, S., Arrhenius, K., Petráš, D. (2017) Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia. *Building and Environment*. Vol. 122. Pp. 363–372.
2. Yoshino H., Hongb T., Nord N. (2017) IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings – Analysis and evaluation methods. *Energy and Buildings*, 152, 124–136.
3. Hong, T., Taylor-Lange, S. C., D’Oca, S., Yan, D., & Corngati, S. P. (2016). Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. *Energy and Buildings*, 116, 694–702.
4. Canha, N., Lage, J., Candeias, S., Alves, C., & Almeida, S. M. (2017). Indoor air quality during sleep under different ventilation patterns. *Atmospheric Pollution Research*, 8(6), 1132–1142.
5. Ren, Z., & Chen, D. (2015). Simulation of Air Infiltration of Australian Housing and its Impact on Energy Consumption. *Energy Procedia*, 78, 2717–2723.
6. Lu, D. B., & Warsinger, D. M. (2020). Energy savings of retrofitting residential buildings with variable air volume systems across different climates. *Journal of Building Engineering*, 30, 101223.
7. Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period. *Journal of Building Engineering*, 100917.
8. Simanic, B., Nordquist, B., Bagge, H., & Johansson, D. (2019). Indoor air temperatures, CO<sub>2</sub> concentrations and ventilation rates: Long-term measurements in newly built low-energy schools in Sweden. *Journal of Building Engineering*, 25, 100827.
9. M Cehlin, T Karimipannah, U Larsson, A Ameen. (2019). Comparing thermal comfort and air quality performance of two active chilled beam systems in an open-plan office. *Journal of Building Engineering*, 100827.
10. Leivo, V., Prasauskas, T., Du, L., Turunen, M., Kivistie, M., Aaltonen, A., Haverinen-Shaughnessy, U. (2018). Indoor thermal environment, air exchange rates, and carbon dioxide concentrations before and after energy retro fits in Finnish and Lithuanian multi-family buildings. *Science of The Total Environment*, 621, 398–406.
11. P.F. Pereira, N.M. Ramos, R.M. Almeida, M.L. Simoes, E. Barreira, Occupant influence on residential ventilation patterns in mild climate conditions, *Energy Procedia* 132 (2017) 837–842 (11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway).
12. ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2019. Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings, ASHRAE, Atlanta, Georgia.

13. D. Zukowska, G. Rojas, E. Burman, G. Guyot, M. del C. Bocanegra-Yanez, J. Laverge, G. Cao, J. Kolarik, Ventilation in low energy residences—a survey on code requirements, implementation barriers and operational challenges from seven European countries, *Int. J. Vent.* (2020) 1–20
14. EN 16798-1, Energy Performance of Buildings – Part 1: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics – Module M1-6, European Standard, 2018.
15. Deshko V., Bilous I., Vynogradov-Saltykov V., Sukhodub I., Yatsenko O. Eksperimentalne doslidzhennya yakosti povitrya ta povitroobminu v zakladah osviti ta zhitlovih budivlyah. [Experimental study of air quality and air exchange in educational and residential buildings]. *Vipusk №4 (148). Kyiv 2021, S. 25-37*
16. Bilous, I.Yu., Dshko, V.I., Sukhodub, I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of Civil Engineering.* 2020. 96(4). Pp. 27–41.
17. Ng, L., Persily, A., Emmerich, S. (2015) Improving infiltration modeling in commercial building energy models. *Energy and Buildings*, 88, 316–323.
18. Dshko V., Sukhodub I., Yatsenko O. (2020). Joint influence of intermittent heating mode and outdoor factors on apartment heat load. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 191, 18-27.
19. DBN V.2.2-15:2019 Zhitlovi budinki. Osnovni polozhennya. [Chinnij z 01.12.2019]. K.: Ministerstvo regionalnogo rozvitku, budivnictva ta zhitlovo-komunalnogo gospodarstva Ukrayini, 2019. 44 s.

Надійшла 23.03.2021  
Received 23.03.2021

# МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

---

УДК 621.43

С.В. Зайченко, д.т.н., професор, ORCID 0000-0002-8446-5408  
С.В. Король, кандидат технічних наук, ORCID 0000-0003-6521-6322  
Д.Г. Дерев'янку, доцент, к.т.н., ORCID 0000-0003-4963-2490  
В.П. Опришко, доцент, к.т.н., ORCID 0000-0003-4963-2490  
Н.І. Жукова, старший викладач, ORCID 0000-0002-4215-6981  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО УПРАВЛІННЯ ГАЗОРОЗПОДІЛОМ ГЕНЕРАТОРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ З ДВИГУНОМ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ

Використання генераторів при різному рівні навантаження дозволяє використовувати частину номінальної потужності двигунів шляхом зменшення частоти обертання двигуна внутрішнього згорання, таким чином зменшувати витрату палива і підвищити загальний коефіцієнт корисної дії системи в цілому. Однак слід зазначити, що оптимальна робота двигуна внутрішнього згорання при фіксованих параметрах газорозподілу можлива лише при певній частоті обертання двигуна. Зменшення частоти обертання двигуна призводить до погіршення його наповнення паливо-повітряною сумішшю і випуску відпрацьованих газів двигуна, що супроводжується впусканням вихлопних газів у впускний колектор і викиду частини горючої суміші в вихлопну трубу. У роботі представлено результати дослідження параметрів генераторів і загальна концепція створення системи управління автономним джерелом живлення на базі двигуна внутрішнього згорання, з метою зменшення питомих показників генерації електричної енергії. Експериментально доведена доцільність регулювання рівня потужності двигуна внутрішнього згорання. Для досягнення мети запропоновано регулювання кутів відкриття і закриття двигуна внутрішнього згорання електромагнітним клапаном. Застосування даної системи дозволяє зменшити питомі витрати більше ніж в 4 рази при генерації електричної енергії з низьким рівнем навантаження генератора. На основі діаграми фазового газорозподілу ДВС запропоновано залежність зміни кутів відкриття і закриття впускного і випускного клапанів від потужності автономного джерела енергії.

**Ключові слова:** автономне джерело енергії, коефіцієнт корисної дії, система газорозподілу, електромагнітний клапан

### Вступ

Сучасний етап розвитку енергетичної безпеки характеризується широким застосуванням альтернативних та відновлюваних джерел енергії. Такі системи в цілому є складними за своєю структурою і мають високу питому вартість електричної енергії. Доступність відновлюваних джерел енергії дозволяє використовувати їх як автономні, проте ефективність і надійність повністю залежить від циркадних ритмів і сезону. Вказані особливості суттєво обмежують застосування альтернативних джерел енергії у якості надійного автономного джерела живлення електричною енергією [1, 2]. Наявність надійного резервного джерела живлення електричною енергією на сучасному підприємстві є запорукою безпечної і якісної роботи.

Єдиним надійним і економічно ефективним рішенням резервування джерел живлення залишаються

© С.В. Зайченко, С.В. Король, Д.Г. Дерев'янку, В.П. Опришко, Н.І. Жукова, 2021

---

енергетичні установки на базі двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ). Використання даного типу обладнання для генерації електричної енергії військовими та судовими енергетичними установками є свідченням його найвищої надійності і безпечності серед можливих варіантів автономного живлення [3].

Проте слід відзначити, що оптимальна робота двигуна внутрішнього згорання можлива при певній частоті обертання двигуна [4]. Це видно з діаграм ККД двигуна внутрішнього згорання, які мають куполоподібну форму з максимумом в точці 2500-3500 об/хв в залежності від конструкції. Зменшення частоти обертання двигуна призводить до погіршення наповнення паливо-повітряною сумішшю і випуску відпрацьованих газів двигуна, що супроводжується впуском вихлопних газів у впускний колектор і викиду частини горючої суміші в вихлопну трубу. Енергетичні втрати при виникненні даних ефектів можуть сягати до 20%, що суттєво знижує ефект використання інвертора при генерації електричної енергії.

Серед широкого асортименту автономних генераторів, авторами було приділено увагу генеруючим установкам на базі одноциліндрового бензинового чотирьох тактного двигуна внутрішнього згорання з орієнтовним об'ємом двигуна 180–220 см<sup>3</sup>. Вибір об'єкта дослідження було визначено з проведеного аналізу існуючого попиту генераторів і власною практикою, що обумовлено відносно низькою вартістю генеруючої установки порівняно з дизельними генераторами і мінімально необхідної потужності для роботи потужних побутових приладів, яка в середньому становить 2,2 кВт. Слід відзначити, що найбільш поширеним автономним джерелом електричної енергії залишаються синхронні генератори без інвертора, особливістю роботи яких є постійна частота обертання колінчастого валу двигуна без можливості регулювання потужності.

Враховуючи вищесказане, для підвищення енергоефективності автономного джерела живлення інвертором базі двигуна внутрішнього згорання шляхом регулювання механізму газорозподілу є актуальною науковою задачею.

#### **Мета і завдання дослідження**

Метою даного дослідження є визначення алгоритму роботи і параметрів системи керування автономного джерела електричної енергії з двигуном внутрішнього згорання енергії шляхом регулювання газорозподілу двигуна внутрішнього згорання з метою підвищення загального коефіцієнту корисної дії.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувались наступні задачі:

- Розробка схеми керування автономним джерелом живлення на базі двигуна внутрішнього згорання і інвертора.
- Дослідження зміни параметрів енергоефективності системи двигун-генератор від рівня навантаження.
- Створення рекомендацій щодо регулювання параметрів і способів реалізації керування двигуном внутрішнього згорання при зміні потужності автономного джерела живлення.
- Математичне моделювання процесу роботи електромагнітного клапану двигуна внутрішнього згорання при зміні навантаження генератора.

#### **Матеріал і результати дослідження**

При визначенні оптимальних керуючих впливів на складові елементи системи необхідно встановити особливості їх роботи при різному навантаженні окремо.

Для дослідження генератора при різних рівнях навантаження використано модель, яка знайшла найбільший попит на ринку України.



Рис.1 – Зовнішній вигляд генератора електричної енергії з двигуном внутрішнього згорання

У системі, що досліджується, двигун внутрішнього згоряння є найменш енергоєфективним елементом. Коефіцієнт корисної дії чотиритактних двигунів внутрішнього згоряння при оптимальній частоті обертання і навантаженні складає в межах 45%(50%) дизельних двигунів і 39% для бензинових. При цьому (рис. 2), аналізуючи графіки [5] зміни коефіцієнту корисної дії від потужності для ДВЗ, необхідно відзначити суттєве (до 30%) падіння з різким зростання питомих витрат палива (до 500%) [6, 7]. Так для випадку експериментального обладнання при використанні генератора потужності 0,7 і 0,2 від номінальної відношення питомих значень витрат палива становить 4,4. Адаптація процесу газорозподілу зі зменшенням частоти обертання двигуна дозволяє уникнути втрат палива.

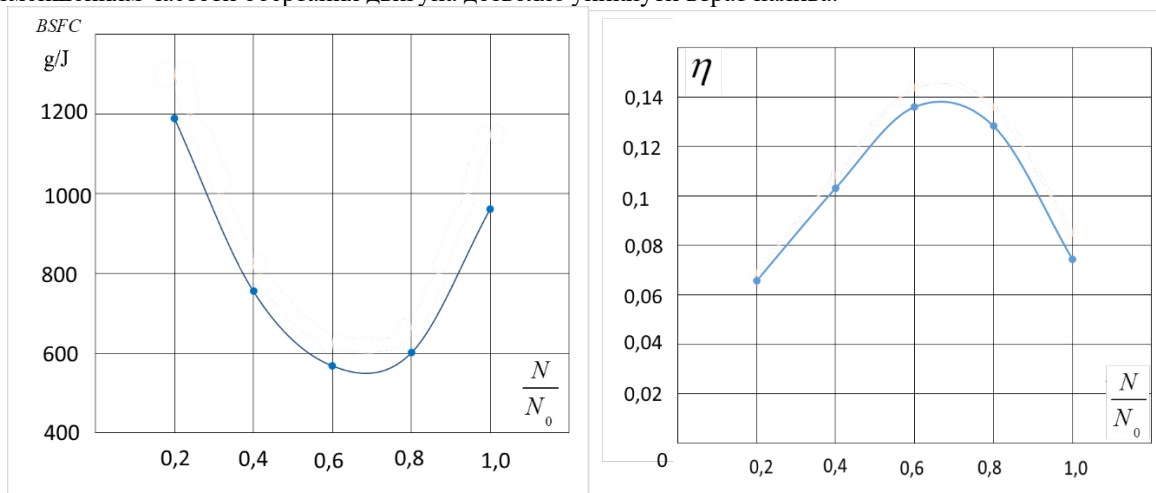
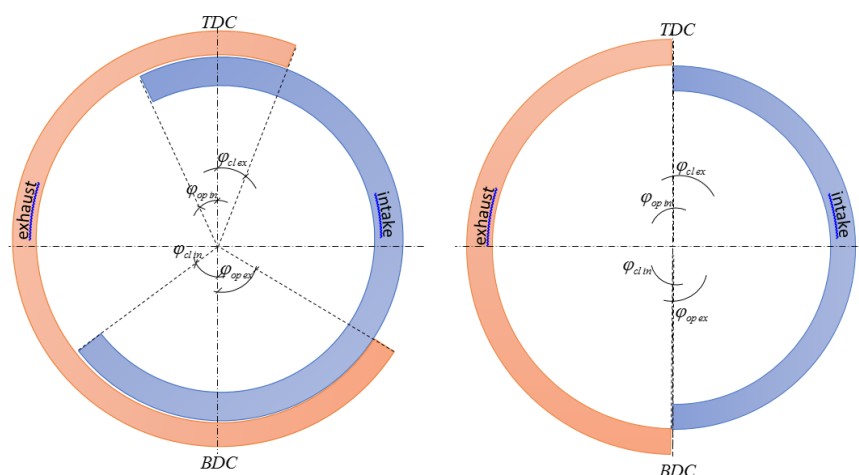


Рис. 2 – Графіки зміни ККД і BSFC

Причиною даного явища є цілий ряд негативних явищ, що супроводжують процес зменшення частоти обертання двигуна. До основних слід віднести погіршення газонаповнення циліндра, зменшення турбулізації з викидом частини заряду з циліндра у вхідну систему в період запізнювання закриття впускного клапана після НМТ. Попередження даного явища можливе шляхом регулювання часу і висоти відкриття клапанів, а саме – звуження циклів з пізнім відкриттям і раннім закриттям клапанів без перекриття[8].

На рис. 3, а представлено типову діаграму фазового газорозподілення ДВС при номінальній частоті обертання. З діаграми очевидно, що перекриття кутів зон випуску і впуску на величину кутів відкриття впускного  $\varphi_{op in}$  і закриття впускного  $\varphi_{cl ex}$  клапанів. Значення кутів підбирається з умови отримання максимального крутного моменту і ККД двигуна[9]. Один із можливих варіантів, при якому можливе уникнення вказаних негативних явищ, – це зменшення до мінімуму кутів відкриття впускного і закриття впускного клапанів (рис. 2, б) при зниженні обертів двигуна.



аб

Рис. 3 – Діаграми фазового газорозподілу ДВС:  
а – при номінальних обертах; б - при мінімальних обертах.

Для встановлення кутів відкриття і закриття впускних клапанів від рівня потужності  $P$  запропоновано систему лінійних рівнянь [10, 11]:

$$\varphi_{opin}(P) = \frac{\varphi_{opin}}{P_0 - P_1}(P - P_1); \quad (1)$$

$$\varphi_{opex}(P) = \frac{\varphi_{opex}}{P_0 - P_1}(P - P_1); \quad (2)$$

$$\varphi_{clin}(P) = \frac{\varphi_{clin}}{P_0 - P_1}(P - P_1); \quad (3)$$

$$\varphi_{cl ex}(P) = \frac{\varphi_{cl ex}}{P_0 - P_1}(P - P_1). \quad (4)$$

Реалізація запропонованого методу керування газорозподілом ДВС автономного джерела живлення можлива шляхом використання спеціальних приводів газорозподільного механізму. Серед поширених варіантів механічні, гідромеханічні і електричні приводи. Причому серед вказаних видів приводів високим ступенем швидкодії відрізняються приводи з електромагнітним приводом, з причини повільного руху клапана при кулачковому і гідравлічному приводах [12, 13].

Визначимо головні параметри процесу руху випускного клапана двигуна при дії електромагніту (рис. 4). При русі клапана 2 в низ електромагніт 1 повинен розвивати силу  $F_{em}$  яка дорівнює сумарному опору від дії пружини 3  $F_1$ , від дії газів  $F_2$  і сил інерції. В загальному випадку рівняння динаміки руху клапана має наступний вигляд:

$$m_v \frac{d^2 \bar{z}}{dt^2} + \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{F}_{em} = 0, \quad (5)$$

де  $m_v$  – маса клапана з якорем.

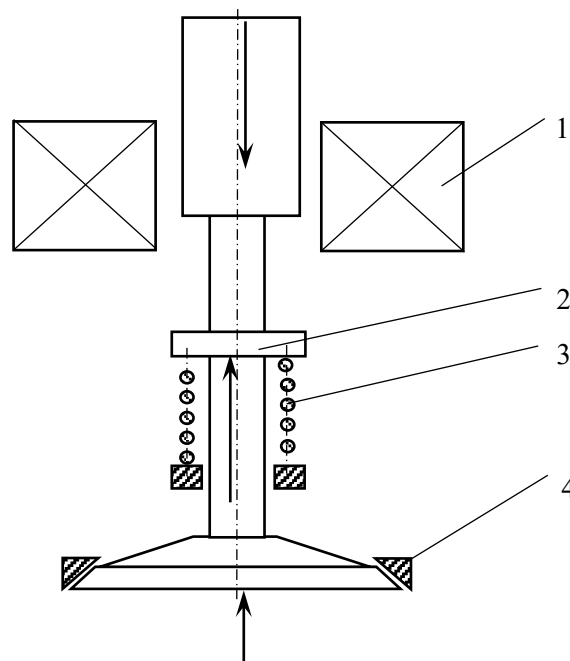


Рис. 4 Схема дії сил електромагнітного випускного клапана:  
1 – електромагніт; 2 – клапан; 3 – пружина; 4 – сідло клапана

Сила опору від дії пружини:

$$F_1 = F_1' + cz, \quad (5)$$

$F_1'$  – попередня сила стиснення пружини;  $c$  – жорсткість пружини.

Сила опору від дії стиснених газів залежить від моменту і висоти відкриття клапана. Значення початкового тиску відповідає кінцю такту розширення і для випадку бензинового двигуна складає

$p_1 = 0,3 - 0,4 \text{ MPa}$ . Подальший рух клапана супроводжується стрімким падінням тиску до  $p_2 = 0,03 - 0,04 \text{ MPa}$ . Закриття клапана відбувається при розрідженні. Як зазначено вище, головною перевагою електромагнітного приводу механізму газорозподілення двигуна є швидкодія. Для визначення необхідної сили електромагніту при реалізації рівноприскореного руху клапана встановимо параметри тахограми руху (Рис. 4). Загальний час руху клапана:

$$t_0 = \frac{\varphi_{opex} + \varphi_{clcx} + \frac{\pi}{2}}{\omega} \quad (6)$$

$\omega$  – швидкість обертання колінчастого валу.

Час відкриття і закриття клапана в сучасних двигунах з кулачковим приводом залежить від заданого профілю кулачка і для деяких випадків може дорівнювати загальному часу руху клапану. Прийнемо фіксоване значення кутів  $\varphi'_{opex}, \varphi'_{clcx}$  ( $5$  і  $5^\circ$ ), при яких випускний клапан повністю відкриється на висоту  $h$ . Час відкриття і закриття клапану:

$$t_1 = \frac{\varphi'_{opex}}{\omega}; t_2 = \frac{\varphi'_{clcx}}{\omega} \cdot 5/57/314 \quad (8)$$

Відповідно прискорення:

$$a_1 = \pm 4h \left( \frac{\omega}{\varphi'_{opex}} \right)^2; a_2 = \mp 4h \left( \frac{\omega}{\varphi'_{clcx}} \right)^2 \quad (9)$$

Враховуючи сказане, сила опору від дії стиснених газів і розрідження :

$$F_2 = \frac{\pi D^2}{4} \frac{(p_1 - p_2)}{t_1} t; F_2' = \frac{\pi D^2}{4} p' \quad (10)$$

де  $D$  - діаметр поршня.

Для моделювання використаємо найбільш поширений тип двигуна внутрішнього згорання, що використовується для автономних джерел енергії: Honda GX-200. Параметри необхідні для розрахунку наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри системи газорозподілення Honda GX-200

№ параметру	Параметр	Одиниця виміру	Значення
1	Маса клапана	<i>kg</i>	0,022
2	Висота відкриття клапана	<i>m</i>	0,006
3	Швидкість обертання колінчастого валу	<i>c<sup>-1</sup></i>	302
4	Кут відкриття клапана $\varphi'_{opex}$	<i>rad</i>	0,35
5	Попередня сила стискання пружини	<i>H</i>	100
6	Жорсткість пружини	<i>H/m</i>	10000
7	Діаметр головки поршня	<i>m</i>	0,027
8	Початковий тиск	<i>Pa</i>	300000
9	Кінцевий тиск	<i>Pa</i>	30000

Математичне моделювання системи було виконано з використанням пакету прикладних програм Matlab/Simulink(рис.4).

Проведене дослідження за допомогою комп'ютерного моделювання з використанням блоку інтегрування дозволила встановити кінематичні характеристики руху переміщення клапана за конкретних умов(табл. 1). Дія електромагніту представлена постійною складовою. Графіки переміщення швидкості представлено на рис. 5.

З діаграм швидкості прискорення видно, що відкриття і закриття клапана відбувається по параболічному закону з миттєвою зупинкою і нижній точці(6мм), що відповідає точці упору клапана. Дане негативне явище запропоновано усунути шляхом зміни сили дії електромагніту, під час руху клапана.



В цілому математичне моделювання підтвердило можливість керування клапаном двигуна внутрішнього згорання електричного генератора з метою зменшення питомих енергетичних витрат.

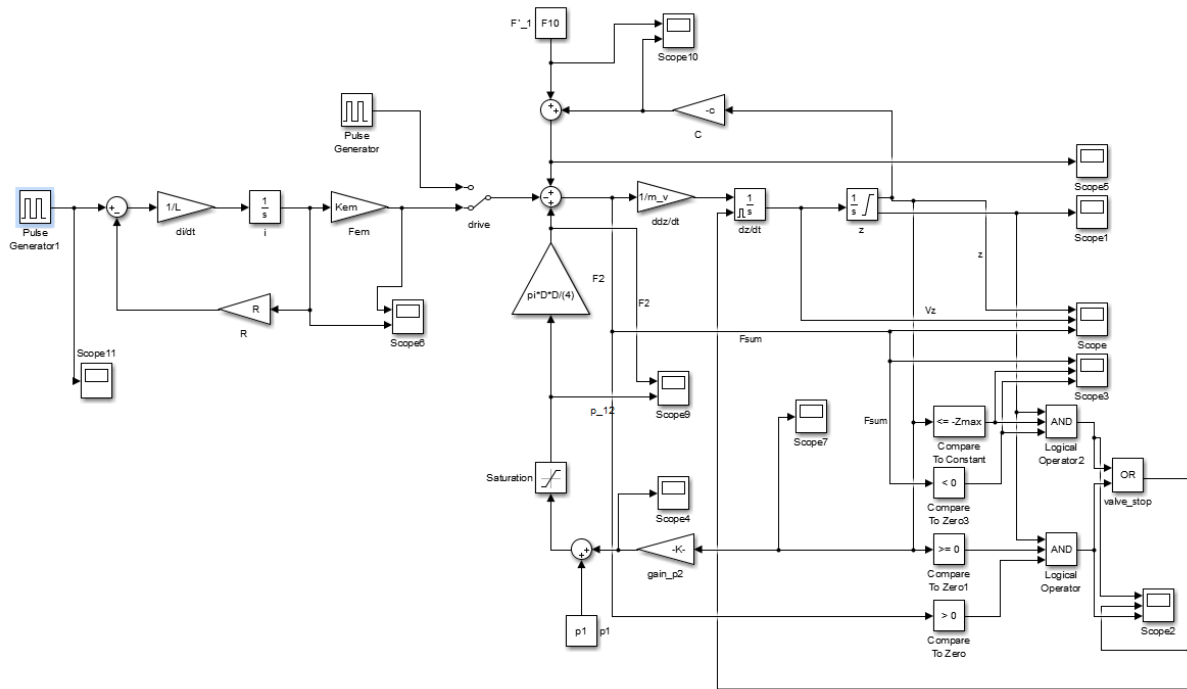


Рис. 4 Структурна схема системи керування електромагнітним клапаном двигуна внутрішнього згорання

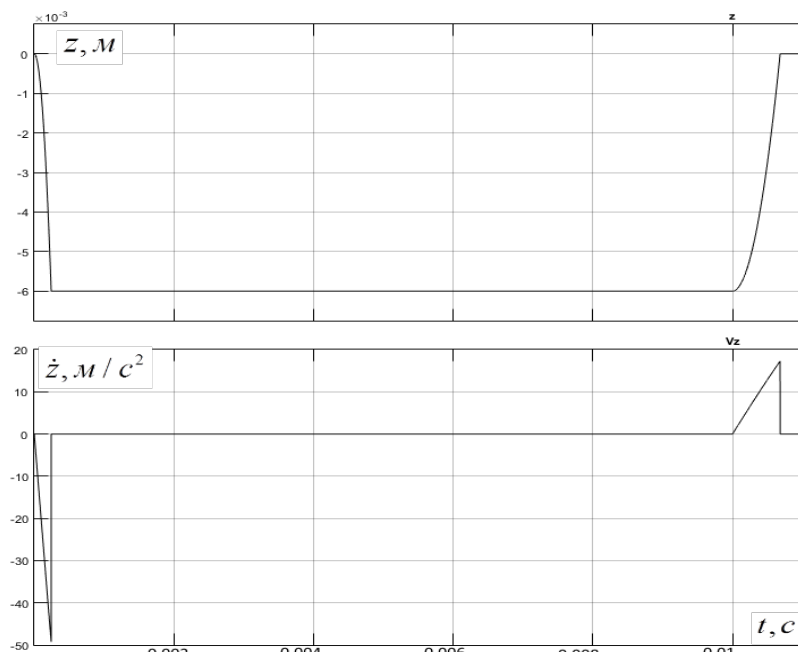


Рис. 6 Діаграми переміщення і прискорення клапана

**Висновки.**

1. В роботі представлено загальну концепцію створення системи керування автономним джерелом живлення на базі двигуна внутрішнього згорання та інвертора. Шляхом аналізу експериментальних даних доведено доцільність регулювання кутів відкриття і закриття двигуна внутрішнього згорання, який працює як джерело механічної енергії автономного джерела електричної енергії. Застосування даної системи дозволяє зменшити питомі витрати в 4 рази при генерації електричної енергії.

2. На основі запропонованої діаграми фазового газорозподілення ДВС (рис.3,а) для умов мінімальних витрат при генерації енергії проведено комп'ютерне моделювання з використанням блоку інтегрування, що дозволило встановити кінематичні характеристики руху переміщення клапана за конкретних умов.

#### **Список використаної літератури**

1. Інтелектуальні електроенергетичні системи: елементи та режими: За загальном. ред. Акад. НАН України А.В. Кириленко / Інститут електродинаміки НАН України. - К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2014.- 408 с.
2. Галіуллін Р. Р. До питання регулювання швидкості обертання колінчастого валу дизельної автономної електростанції малої потужності // Вісник БДАУ. - 2012.- С. 37-40.
3. Баширов Р.М. Основи теорії та розрахунку автомобільних двигунів. Уфа: БДАУ, 2008. 304 с.
4. Галіуллін Р. Р., Гайсін Є. М. Регулювання дизельних двигунів шляхом пропуску поставок палива // Механізація та електрифікація сільського господарства, 2005. No 11. С. 30-31.
5. Козлов А.Н., Худякова Г.І., Свіщов Д.А. Ефективність двигуна внутрішнього згоряння з використанням синтез -газу // Енергозбереження та ресурси. Блок живлення. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. - Єкатеринбург, 2016. - 2016. - С. 548-552.
6. Хватов О. С., Дарієнков А. Б., Самоявчев І. С. Паливна ефективність однієї електростанції автономного об'єкта на базі двигуна внутрішнього згоряння зі змінною швидкістю обертання // Експлуатація морського транспорту. - 2013.- No 1.- С. 71.
7. Алексеєнко В. А., Юров Б. Б., Остапенко В. В. Навантажувальна характеристика двигуна карбюратора // Збірник наукових праць Sworld. - 2014. - Т. 2. - No 2. - С. 29-31.
8. Ахромешин А. В. Сучасні системи управління газообміном двигунів внутрішнього згоряння (огляд) // Вісник Тульського державного університету. Технічна наука. - 2008. - No 3.- С. 151-158.
9. Захаров Л. А., Хрунков С. Н., Лімонов А. К. Методи вибору раціональних технічних характеристик механізму газорозподілу поршневого двигуна внутрішнього згоряння // Угоди НГТУ ім. Р. Е. Алексєєва. - 2010. - No 4. - С. 181-189.
10. Зайченко С., Шевчук С., Опришко В., Прядко С. та Галем А. (2020, травень). Підвищення енергоефективності автономного джерела електроенергії за допомогою контролю розподілу газів двигуна внутрішнього згоряння. У 2020 році 7-я Міжнародна конференція IEEE з інтелектуальних систем енергії (ESS) (стор. 262-265). IEEE.
11. Зайченко С., Шевчук С., Галем А. Підвищення енергоефективності автономного джерела електричної енергії шляхом регулювання газорозподілу двигуна внутрішнього згоряння // ЕНЕРГЕТИКА: економіка, техніка, екологія. - 2019. - No 3. - С. 74-81.
12. Захаров Л. А., Хрунков С. Н., Лімонов А. К. Методика вибору раціональних технічних характеристик механізму газорозподілу поршневого двигуна внутрішнього згоряння // НГТУ ім. Р. Е. Алексєєва. - 2010. - No 4. - С. 96-105.
13. Ахромешин А. В. Сучасні системи управління газообміном двигунів внутрішнього згоряння (огляд) // Вісник Тульського державного університету. Технічна наука. - 2008. - No 3. - С. 151-158.

**S. Zaichenko**, Doc., Professor, **ORCID** 0000-0002-8446-5408  
**S. Korol**, Candidate of Technical Sciences, **ORCID** 0000-0003-6521-6322  
**V. Opryshko**, Associate Professor, Ph.D., **ORCID** 0000-0003-4963-2490  
**D. Derevyanko**, Associate Professor, Ph.D., **ORCID** 0000-0003-4963-2490  
**N. Zhukova**, senior lecturer, **ORCID** 0000-0002-4215-6981  
**National Technical University of Ukraine**  
**"Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"**

## **MODELING OF THE PROCESS OF ELECTROMECHANICAL CONTROL OF GAS DISTRIBUTION OF AN ELECTRIC ENERGY GENERATOR WITH AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE**

*The use of generators at different load levels allows you to use part of the rated power of the engines, by reducing the speed of the internal combustion engine, thus reducing fuel consumption and increase the overall efficiency of the system as a whole. However, it should be noted that the optimal operation of the internal combustion engine at fixed gas distribution parameters is possible only at a certain engine speed. Reducing the engine speed leads to a deterioration of the filling of the fuel-air mixture and the release of exhaust gases from the engine, accompanied by the intake of exhaust gases into the intake manifold and the emission of part of the fuel*

*mixture into the exhaust pipe. The paper presents the results of the study of generator parameters and the general concept of creating an autonomous power supply control system based on an internal combustion engine in order to reduce the specific indicators of electricity generation. The expediency of regulating the power level of an internal combustion engine has been experimentally proved. To achieve this goal, it is proposed to adjust the opening and closing angles of the internal combustion engine with a solenoid valve. The use of this system allows to reduce the specific costs by more than 4 times when generating electricity with low generator load. Based on the phase distribution diagram of the internal combustion engine, the dependence of the change of the opening and closing angles of the inlet and outlet valves on the power of the autonomous energy source is proposed.*

**Keywords:** *autonomous energy source, efficiency, gas distribution system, solenoid valve.*

#### REFERENCES

1. Intelligent electric power systems: elements and modes: Under the general. ed. Acad. NAS of Ukraine A.V. Kirilenko / Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. - K. : Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, 2014. -- 408 p.
2. Galiullin R. R. On the issue of regulating the rotational speed of the crankshaft of a diesel autonomous power plant of low power // Vestnik BGAU. - 2012. -- S. 37-40.
3. Bashirov R.M. Fundamentals of the theory and calculation of automotive engines. Ufa: BGAU, 2008. 304 p.
4. Galiullin R.R., Gaysin E.M. Regulation of diesel engines by skipping fuel supplies // Mechanization and Electrification of Agriculture, 2005. No. 11. P. 30-31.
5. Kozlov A.N., Khudyakova G.I., Svishchev D.A. Efficiency of the internal combustion engine using synthesis gas // Energy and Resource Saving. Power supply. Unconventional and renewable energy sources. — Yekaterinburg, 2016. - 2016. - S. 548-552.
6. Khvatov O.S., Daryenkov A. B., Samoyavchev I. S. Fuel efficiency of a single power plant of an autonomous facility based on an internal combustion engine of variable rotational speed // Operation of sea transport. - 2013. - No. 1. -- S. 71.
7. Alekseenko V. A., Yurov B. B., Ostapenko V. V. Load characteristic of the carburetor engine // Collection of scientific papers Sworld. - 2014. - T. 2. - No. 2. - S. 29-31.
8. Akhromeshin A. V. Modern gas exchange control systems for internal combustion engines (review) // Bulletin of Tula State University. Technical science. - 2008. - No. 3. — S. 151-158.
9. Zakharov L. A., Khrunkov S. N., Limonov A. K. Methods for choosing the rational technical characteristics of the gas distribution mechanism of a reciprocating internal combustion engine // Transactions of NGTU im. RE Alekseeva. - 2010. - No. 4. - S. 181-189.
10. Zaichenko, S., Shevchuk, S., Opryshko, V., Pryadko, S., & Halem, A. (2020, May). Autonomous electric power source energy efficiency improvement by internal combustion engine gases distribution control. In 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS) (pp. 262-265). IEEE.
11. Zaichenko S., Shevchuk S., Halem A. Improving the energy efficiency of an autonomous source of electric energy by regulating the gas distribution of an internal combustion engine // POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology. - 2019. - No. 3. - S. 74-81.
12. Zakharov L. A., Khrunkov S. N., Limonov A. K. The methodology for choosing the rational technical characteristics of the gas distribution mechanism of a reciprocating internal combustion engine // Transactions of NGTU im. RE Alekseeva. - 2010. - No. 4. - S. 96-105.
13. Akhromeshin A. V. Modern gas exchange control systems for internal combustion engines (review) // Bulletin of Tula State University. Technical science. - 2008. - No. 3. - S. 151-158.

Надійшла 27.03.2021  
Received 27.03.2021

В.В. Чумак, канд.тех.наук, доц., ORCID 0000-0001-8401-7931  
О.Л. Тимошук, канд.тех.наук, доц., ORCID 0000-0003-1863-3095  
Є. А. Монахов, асистент, ORCID 0000-0001-8408-8051  
О.В. Вишневський, аспірант, ORCID 0000-0001-7814-9030  
А.С. Стулішенко, аспірант, ORCID 0000-0001-9982-9246

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗІ ВСИПНИМИ ОБМОТКАМИ ПРИ ТЕПЛОВОЛОГОМУ СТАРІННІ

*Експлуатація електричних машин з пошкодженнями в силовому електричному ланцюзі статора двигуна призводить до асиметрії заряду фазного струму двигуна, збільшення втрат нагріву в окремих фазах, виникнення змінних складових електромагнітного моменту і споживаної потужності. Обмотка статора електродвигуна складається з декількох статорних стрижнів і лобових частин. Завдяки складній структурі обмотки і сталевому сердечнику загасання і спотворення імпульсу, що передається через обмотку, є складними і залежними від частоти. Аналіз, представлений у цій главі, може бути застосований до інших обертових машин, таких як двигуни низької напруги. В даній статті представлено аналіз частотних характеристик низьковольтних електричних машин зі всипними обмотками з урахуванням процесів послідовної руйнації ізоляційної конструкції впливом тепло-вологих циклів. Показано, що частотні характеристики можуть бути узагальненим параметром стану ізоляції в умовах періодичного відстеження якості ізоляції при регламентних ревізіях. Доведено, що частотні характеристики, які зняті в режимах холостого ходу та короткого замикання мають діагностичні ознаки рівня руйнації ізоляції при зволоженні, які полягають в зміщенні екстремумів характеристик в область більш низьких частот, а також зменшення площі під кривою між мінімальними і максимальними екстремумами характеристики.*

**Ключові слова:** високочастотні процеси, високочастотний, вхідний опір, електричні машини зі всипними обмотками, ємність.

**Постановка проблеми.** Робота електричної машини зі зволоженою зістареною ізоляцією призводить до її швидкого руйнування і є небезпечною через більшу вірогідність аварійної відмови, тому проблема оцінки стану зволоження зістареної ізоляції є актуальною та потребує створення нових способів визначення ступеню можливості її подальшої експлуатації. Значний вплив на стан ізоляційної конструкції має зволоження ізоляції при змінах кліматичних умов. Для нової ізоляції ця проблема стоїть не так гостро, порівняно зі зволоженням зістареної ізоляції.

Розвиток дефекту ізоляції відбувається під впливом зволоження, термічних руйнувань, механічних пошкоджень, електричного поля робочої напруги і перенапруги, забруднень і т. п.

Попадання вологи зазвичай пов'язано зі зміною температурних умов. Процес утворення дефекту і руйнування ізоляції протікає спочатку досить повільно і лише на останніх стадіях має стрибкоподібний характер, закінчуючись коротким замиканням, вибухом і руйнуванням ізолятора. Іноді волога встигає випаруватися під дією тепла, що виділяється. Якщо при цьому не утворилося провідного каналу, процес розвитку дефекту може призупинитися, але якщо утворився провідний канал ізоляції буде завдано необерненої шкоди.

**Аналіз останніх досліджень.** Методи діагностики електричних машин широко досліджувались раніше [1-4]. Найбільш розповсюдженими є методи неруйнівного контролю технічного стану ізоляції. Запропоновані методи діагностики не дають змоги неруйнівного контролю ізоляції і часто вимагають занадто багато вимірювань або розбирання електричної машини. Метод аналізу запропонований в даній статті спирається на аналіз частотних характеристик електричних машин. При знятті частотних характеристик на клеми двигуна подається низька напруга 5-10 В, яка є безпечною для ізоляції.

**Формулювання цілей статті.** Аналіз частотних характеристик електричних машин в залежності від зміни стану ізоляції.

**Основна частина.** Попередні випробування, необхідні для визначення режимів пришвидшених випробувань, проводять з ціллю отримання залежності контрольованих параметрів з часом при заданому рівні кліматичних факторів[5].

Для забезпечення пришвидшеного впливу на ізоляцію були прийняті наступні умови тепловологого

© В.В. Чумак, О.Л. Тимошук, Є. А. Монахов, О.В. Вишневський, А.С. Стулішенко, 2021

впливу – 100% вологість при температурі 100<sup>0</sup> С (в середовищі насиченої пари протягом 8 годин с наступним охолодженням до 20<sup>0</sup> і вільною конденсацією вологи на поверхні відкритої машини протягом 16 годин).

Як показали досліди вибраний термін випробування приводить конструкцію в граничний стан. Подальше збільшення часу тепловологого впливу не позначається параметрах системи, т. я. вона приходить в граничний стан.

В подальшому машина переводиться в режим сушіння (інтенсивної теплової взаємодії і старіння). Для ізоляції класу F вибраний режим сушки при температурі 165<sup>0</sup> протягом 2 годин. Нагрів обмотки проводився постійним випрямленим струмом.

**Результати досліджень.** Частотні характеристики знімалися для різних схем підключення двигуна, перша – холостий хід – рис. 1(а), друга – коротке замикання – рис. 1(б).

Зняті частотні характеристики двигуна 4А80А4 після одного циклу зволоження, після восьми циклів і початкова характеристика рисуюнок 2 і рисунок 3.

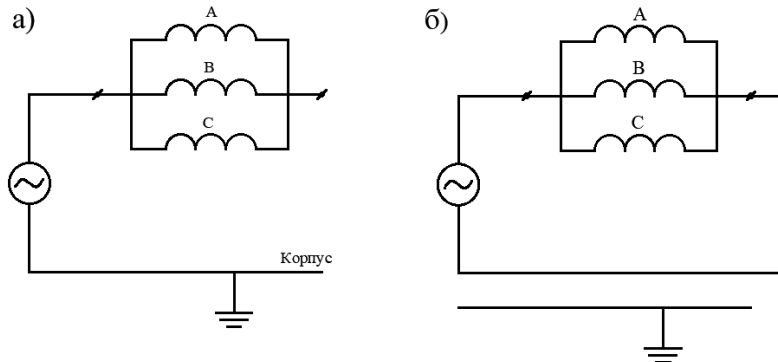


Рис. 1 а) – Схема підключення на ХХ б) Схема підключення на КЗ

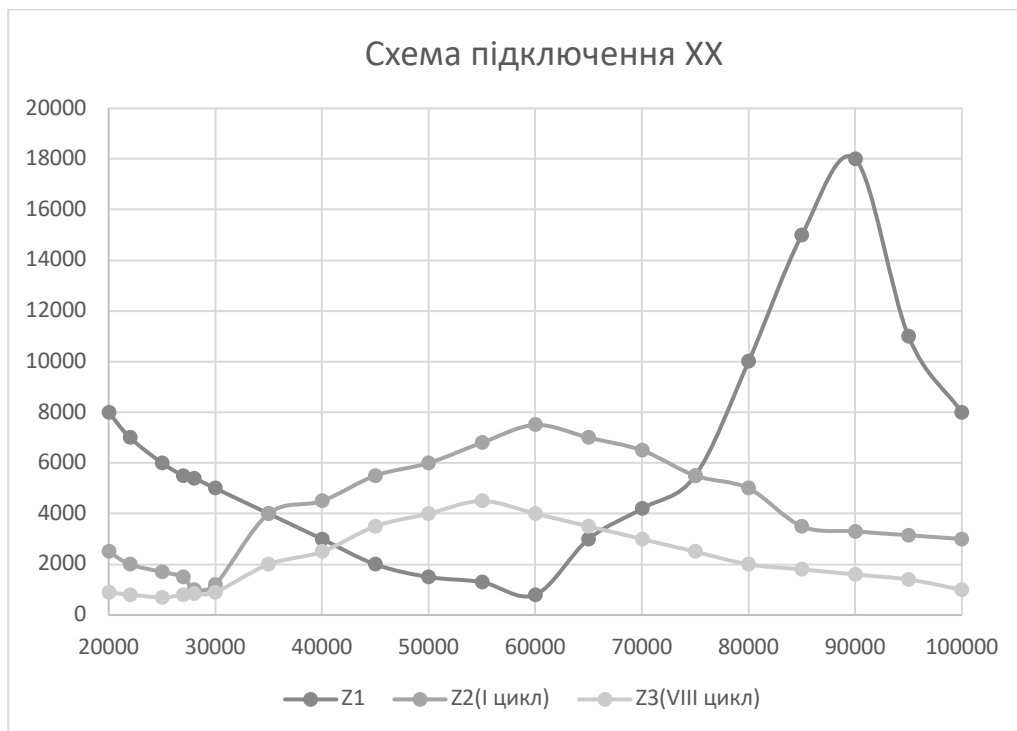


Рис. 2– Частотні характеристики двигуна зняті по схемі ХХ.

Як видно з наведеного графіку характеристика  $Z(f)$  для сухої нової ізоляції(крива 1) має високе значення опору при резонансному екстремумі, а також високу частоту резонансного піку. Це свідчить про те, що опір ізоляції обмотки відносно корпусу високий, що відповідає якійсь ізоляції. Висока частота резонансного піку свідчить про те що ємність ізоляції(в першу чергу поперечна) відносно мала, що відповідає відсутності вологості в ізоляційній конструкції.

Проаналізувавши графік знятий після першого циклу зволоження, зроблено наступні висновки – значення опору при резонансному екстремумі значно зменшилось, що свідчить про зменшення опору ізоляції, а значення частоти резонансного піку свідчить про збільшення ємності ізоляції.

Третій графік, знятий після 8 циклів зволоження, дає схожі результати, частота і опір резонансного піку зменшується, але вже не так суттєво.

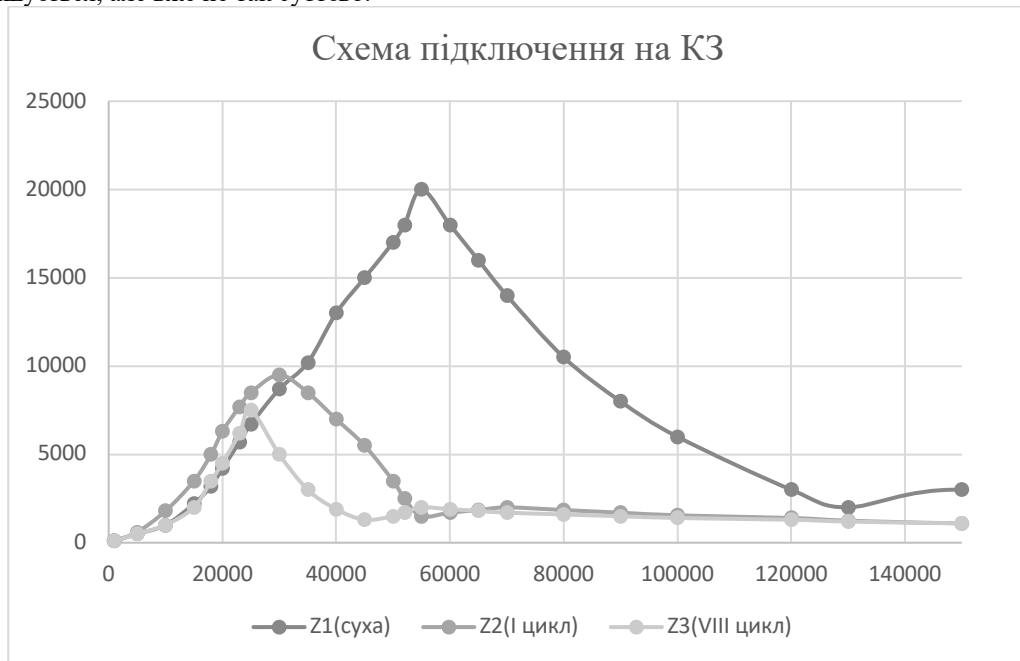


Рис. 3. Частотні характеристики двигуна зняті по схемі КЗ.

З графіку знятого по схемі КЗ  $Z(f)$  для сухої нової ізоляції видно, що частота та опір резонансного піку високі, що свідчить про високе значення опору ізоляції та відносно невелике значення ємності обмотки електричної машини.

Після режиму тепловологого старіння /III-V цикли/ резонанс відповідно спостерігався на частоті 25-27,5 кГц і відношення напруг було  $U_1 = 11В, U_5 = 34В, U_1 = 11,8В, U_5 = 36В$ , тобто добротність системи зменшилася в 1,5 рази. Порівняно слабку залежність добротності можна пояснити тільки різко вираженою залежністю втрат в системі від частоти. Тому для оцінки цих факторів було проведено чисельне моделювання з оцінкою збіжності по дослідним даним. Були задані такі варіанти постійних  $tg\delta = \frac{G}{\omega C} = 0,002; 0,08; 0,2; Q = 4; 10; 20$ ; для двигуна 4АХ7ІНВ з параметрами  $L = 0,1Гн, C = 1200 пФ$  та двигуна 4АХ80А4У3 з параметрами  $L = 0,18Гн, C = 920 пФ$  (Малюнок 26).

Зміна частоти задавалася в межах від 50 до 200000 Гц.

За основу розрахункової моделі була взята довга однорідна лінія і спрощена ланцюгова схема. При розрахунку використовувалися наступні співвідношення (Малюнок 27).

$$1 - Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} e^{-\frac{j\frac{1}{Q} + tg\delta}{2}} cth \left[ \frac{\omega}{2} \sqrt{LC} \left( \frac{1}{Q} + tg\delta \right) + j \frac{\omega}{2} \sqrt{LC} \sqrt{4 - \left( \frac{1}{Q} + tg\delta \right)^2} \right] = Ae^{-j\alpha} cth(x + jy), \quad (1)$$

де  $e^{-j\alpha} = \cos\alpha - j\sin\alpha$  та  $cth(x + jy) = \frac{shx - jsin2y}{ch2x - cos2y}$

$$I_m(Z_0) == \frac{-j \sqrt{\frac{L}{C}} \left[ \cos\left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right) \sin\omega\sqrt{LC} \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)^2} + sh\frac{\omega}{2}\sqrt{LC} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right) \sin\frac{\left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)}{2} \right]}{ch\omega\sqrt{LC} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right) - \cos\omega\sqrt{LC} \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)^2}} \quad (2)$$

$$R_e|Z_0| == \frac{\sqrt{\frac{L}{C}} \left[ \cos\left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right) sh\omega\sqrt{LC} \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)^2} - \sin\frac{1}{Q} + tg\delta \sin\omega\sqrt{LC} \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)^2} \right]}{ch\omega\sqrt{LC} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right) - \cos\omega\sqrt{LC} \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)^2}} \quad (3)$$

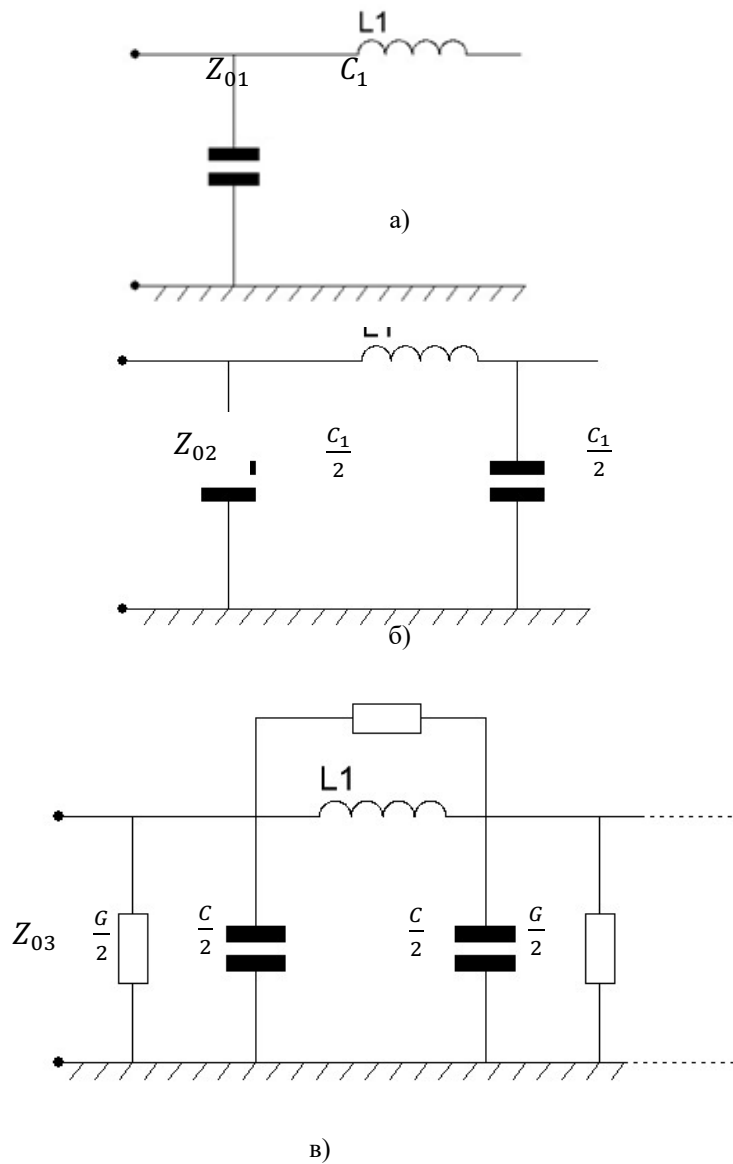


Рис 4 а) - розрахунки цепної лінії; б),в) – порівняння дослідних частотних залежностей з результатом розрахунків по спрощеній схемі:

$$Z_{03} \rightarrow G - const$$

$$Z_{03} \rightarrow G - var$$

$$\varphi_0 = \arctg \frac{-jIm|Z_0|}{Re|Z_0|} \quad (4)$$

$$2 - Z_k = \sqrt{\frac{L}{C}} e^{-j\frac{(\frac{1}{Q} + tg\delta)}{2}} th \left[ \frac{\omega}{2} \sqrt{LC} \left( \frac{1}{Q} + tg\delta \right) + j \frac{\omega}{2} \sqrt{LC} \sqrt{4 - \left( \frac{1}{Q} + tg\delta \right)^2} \right] == Ae^{-j\alpha} th(x + jy), \quad (5)$$

$$де(x + jy) = \frac{sh2x + j \sin 2y}{ch2x + \cos 2y}.$$

$$Im|Z_k| = \frac{j \sqrt{\frac{L}{C}} \left[ \cos \frac{(\frac{1}{Q} + tg\delta)}{2} \sin \omega \sqrt{LC} \sqrt{4 - \left( \frac{1}{Q} + tg\delta \right)^2} + sh \omega \sqrt{LC} \left( \frac{1}{Q} + tg\delta \right) \sin \frac{(\frac{1}{Q} + tg\delta)}{2} \right]}{ch \omega \sqrt{LC} \left( \frac{1}{Q} + tg\delta \right) - \cos \omega \sqrt{LC} \sqrt{4 - \left( \frac{1}{Q} + tg\delta \right)^2}} \quad (6)$$

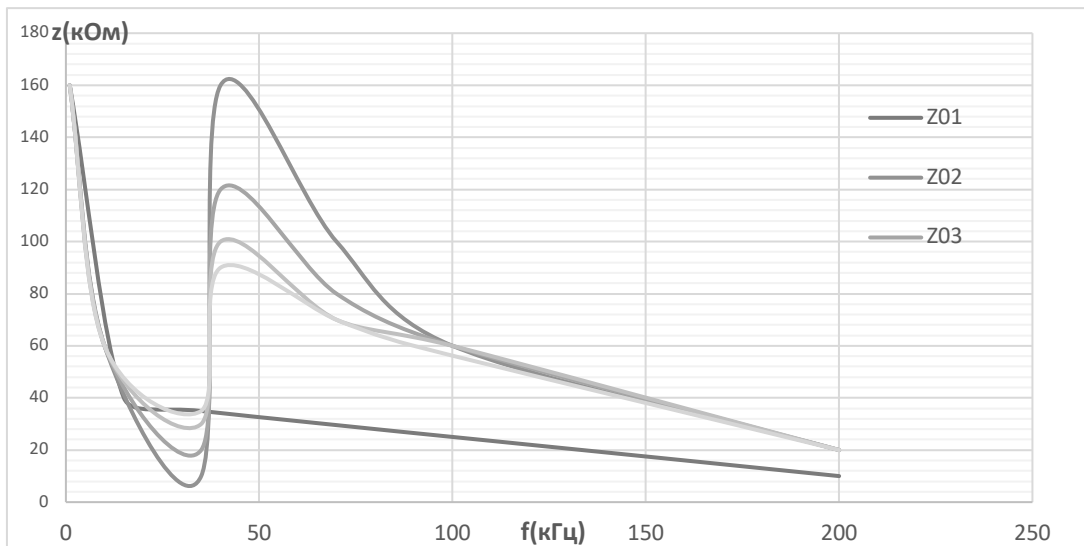


Рис. 5,б – двигун типу 4AX71H8

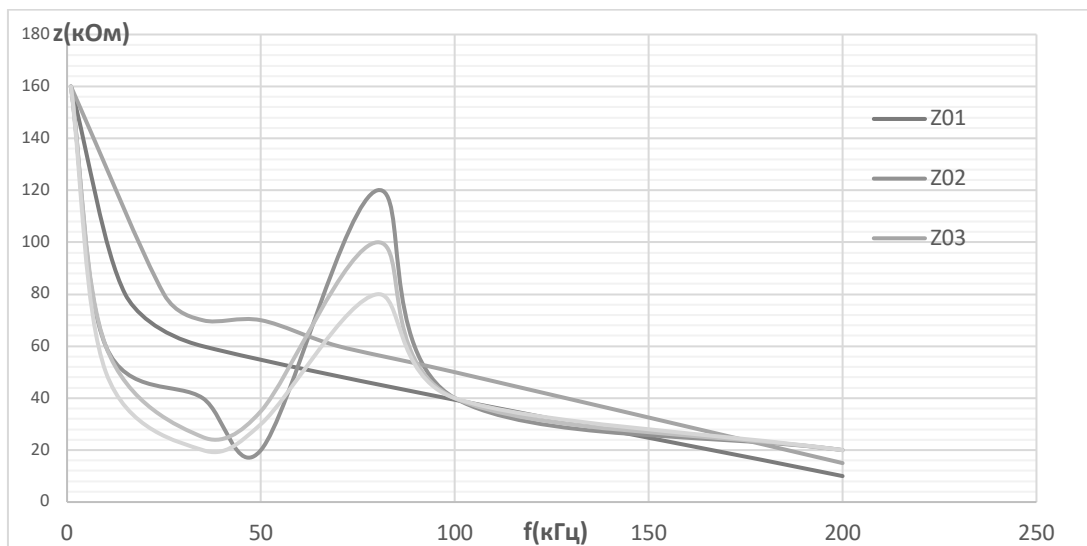


Рис.6,в – двигун типу 4AX80L443

$$R_e |Z_k| = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}} \left[ \cos\left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right) \sin\omega\sqrt{LC} + sh\omega\sqrt{LC} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right) + \sin\left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right) \sin\omega\sqrt{LC} \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)^2} \right]}{ch\omega\sqrt{LC} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right) - \cos\omega\sqrt{LC} \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)^2}} \quad (7)$$

$$\varphi_k = \arctg \frac{jI_m |Z_k|}{R_e |Z_k|}$$

$$3 - |Z_B| = \sqrt{|Z_0| |Z_k|} \text{ та } \varphi_B = \frac{\varphi_0 + \varphi_k}{2} \quad (8)$$

Для режимів холостого ходу і короткого замикання  $I_m$  та  $R_e$  надають уявну і дійсну складову опору. З наведених розрахунків видно, що варіація  $Q$  та  $tg\delta$  при наближеній рівності  $(tg\delta + \frac{1}{Q})$  дає наближені криві та відповідно знайти  $tg\delta$  з ціллю оцінки стану ізоляції не є можливим. Таким чином аналіз вхідних



опорів не надає можливості виділити  $tg\delta$  на підвищених частотах. Це підтверджує аналіз розрахункових моделей.

**Методика визначення додаткової ємності обумовленої зволоженням ізоляції при тепловологому старінні.**

Визначення додаткової ємності обумовленої зволоженням ізоляції при тепловологому старінні виконується за допомогою схеми заміщення показаній на рисунку 7, де  $R$  – опір обмотки,  $L$  – індуктивність обмотки,  $C_{\text{поз}}$  – поздовжня ємність обмотки,  $C_{\text{п}}$  – поперечна ємність обмотки.

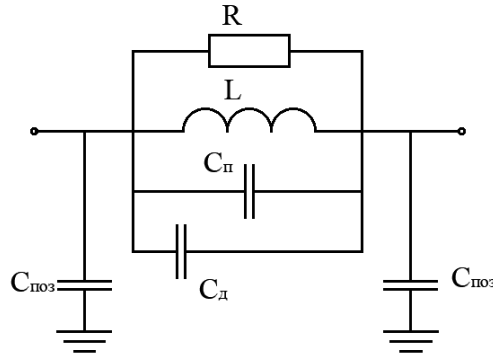


Рис. 7. Схема заміщення для визначення додаткової ємності

З досліду XX на частоті 1-10 кГц двигун представляє собою ємність  $2C_{\text{поз}}$ . По даним вимірів при  $f = 2,5 \cdot 10^4$  Гц  $Z_{XX} = 7000$  Ом. Звідси  $2C_{\text{поз}} = \frac{1}{\omega Z_{XX}} = 0,91$  нФ або  $C_{\text{поз}} = 0,455$  нФ.

З досліду КЗ в точці резонансу  $f_0 = 55$  кГц величина

$$Z_{K3/f_0} \approx R. \quad Z_{K3/f_0} = 20000 \text{ Ом звідси } R = 20000 \text{ Ом.}$$

За допомогою високоточного вимірювального обладнання вимірюємо  $L = 9$  мГн,  $C_{\text{п}} = 1.2$  нФ.

Для того, щоб визначити додаткову ємність утворену після першого та восьмого циклів старіння ізоляції використовуємо рівняння (3)

$$2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L(0,5C_{\text{поз}} + C_{\text{п}} + C_{\text{д}})}} \quad (9)$$

Після першого циклу зволоження резонансна частота  $f_0$  зменшилась з 60 кГц до 28 кГц, це є ознакою того, що ємність ізоляції збільшилась, використовуючи формулу (3) розраховано додаткову ємність після першого і восьмого циклу зволоження.

$$2 \cdot \pi \cdot 28 \cdot 10^3 = \frac{1}{\sqrt{9 \cdot 10^{-3} (0,5 \cdot 0,455 \cdot 10^{-9} + 1,2 \cdot 10^{-9} + C_{\text{д}})}} \quad (10)$$

Звідки  $C_{\text{д1}} = 2,2$  нФ

$$2 \cdot \pi \cdot 25,5 \cdot 10^3 = \frac{1}{\sqrt{9 \cdot 10^{-3} (0,5 \cdot 0,455 \cdot 10^{-9} + 1,2 \cdot 10^{-9} + C_{\text{д}})}} \quad (11)$$

Звідки  $C_{\text{д8}} = 2,9$  нФ

Дані розрахунки співпадають з попередніми висновками – після проходження циклу тепловологому старіння ємність ізоляції двигуна збільшується.

**Аналіз результатів.** Для збільшення інформативності частотних характеристики за основний показник взято площу під кривою між двома екстремумами графіку  $Z(f)$ .

Для графіку знятого по схемі XX отримані результати показані в таблиці 1.

Таблиця 1 Показники зволоження ізоляції

Стан	Нова	I цикл зволоження	VIII цикл зволоження
Площа S	235500000	157950000	77552500
$\Delta S, \%$	-	32,9	67,1

Для графіку отриманого по схемі КЗ отримані результати показані в таблиці 2.

Таблиця 2 Показники зволоження ізоляції

Стан	Нова	I цикл зволоження	VIII цикл зволоження
$\Delta S, \%$	0	77,2	89,1

Проаналізувавши дані з таблиць 1 і 2, можна зробити висновок, що розмір площі під кривою між екстремумами графіку є показником якості ізоляційної конструкції. Дані розраховані з характеристики знятої за схемою холостого ходу є чітким показником, оскільки показник  $\Delta S$  зменшується плавно – на 32,9% після першого циклу зволоження, на 67,1% після восьмого циклу, в той час як характеристика знята за схемою короткого замикання більш чутлива до стану ізоляції, показник  $\Delta S$  зменшився на 77,2% після першого циклу зволоження, на 89,1% після восьмого циклу.

Для того, щоб мати можливість оцінити стан ізоляції після одноразового зняття характеристик, запропоновано використовувати коефіцієнт якості  $k_{я}$ , який враховує значення частоти мінімального та максимального екстремумів характеристик холостого ходу та короткого замикання, а також значення вхідних опорів мінімального та максимального екстремумів обох характеристик.

$$k_{я} = \frac{q_{кз.1} \cdot Z_{кз.1} + q_{кз.2} \cdot Z_{кз.2}}{q_{хх.1} \cdot Z_{хх.1} + q_{хх.2} \cdot Z_{хх.2}} \quad (11)$$

Де  $q_{кз.1}$ ,  $q_{кз.2}$ ,  $q_{хх.1}$ ,  $q_{хх.2}$  – частота першого і другого резонансного піку на характеристиці знятій за схемою короткого замикання і холостого ходу.

$Z_{кз.1}$  і  $Z_{кз.2}$ ,  $Z_{хх.1}$ ,  $Z_{хх.2}$  – відповідно вхідні опори при резонансних частотах.

Значення коефіцієнта якості для різних циклів зволоження показані в таблиці 3.

Таблиця 3 Показники коефіцієнту якості для різного стану ізоляційної конструкції

Стан	Нова	I цикл зволоження	VIII цикл зволоження
$k_{я}$	0.81	0.76	0.7

### Висновки.

Показано, що частотні характеристики можуть бути узагальненим параметром стану ізоляції в умовах періодичного відстеження якості ізоляції при регламентних ревізіях.

На прикладі двигуна 4A80A4 показано, що для першого циклу тепловологого старіння отримані наступні результати – резонансна частота, яка відповідає верхньому екстремуму змістилась в область більш низьких частот, що відповідає збільшенню ємності обмотки. Максимальне значення опору  $Z(f)$  зменшилось в порівнянні з новою ізоляційною конструкцією, що відповідає зменшенню опору ізоляції відносно корпусу. Найбільш суттєві зміни відбулися після першого циклу зволоження ізоляції, а наступні цикли вже не так суттєво впливають на зміщення частоти екстремумів та зменшення вхідного опору обмоток двигуна.

Оцінка ступеню деструкції ізоляції слід проводити, контролюючи параметри частоти резонансного піку, пікового значення опору  $Z(f)$  та визначенню площі між верхнім та нижнім екстремумом графіку  $Z(f)$ .

### Список використаної літератури

1. Исследование возможностей непрерывного контроля изоляции действующих электроустановок без вывода их из эксплуатации // *Праці Луганського відділення міжнародної академії інформатизації. №1 (10) 2005 ст. 87-90*
2. В. Тарасюк – Контроль та випробування ізоляції обмоток тягових двигунів електропоїздів під час ремонту // *Праці наукової бібліотеки імені Вернадського 2012 р.*
3. В.А. Чернышев, Е.В. Зенова, В.А. Чернов и др – Обобщенный индекс поляризации как параметр контроля состояния изоляционных промежутков силовых трансформаторов /. // *Материалы IV международной конференции «Силовые трансформаторы и системы диагностики».* – 2009. – 653 с.
4. Jose Luis Oslinger, Luis Carlos Castro, "Correlation between capacitance and dissipation factor used for assessment of stator insulation", *Intern'l Journal of Electrical Engg.*, vol. -6, no. 3, 2012.

5. Бакурадзе Л. Н. и др. Определение режимов ускоренных испытаний на сохраняемость электроизоляционных конструкций электрических машин малой мощности. Электрические машины, вып. II, 1978.

**V. Chumak**, PhD Tech., associate professor, **ORCID** 0000-0001-8401-7931

**O. Timoshuk**, PhD Tech, associate professor, **ORCID** 0000-0003-1863-3095

**E. Monakhov**, assistant, **ORCID** 0000-0001-8408-8051

**A. Vishnevsky**, post-graduate student, **ORCID** 0000-0001-7814-9030

**A. Stulishenko**, post-graduate student, **ORCID** 0000-0001-9982-9246

## **FREQUENCY CHARACTERISTICS OF ELECTRICAL MACHINES WITH A MESH WINDING DURING HEAT-AND-MOISTURE AGING**

*Operation of an electric drive with damages in power electric circuit of the motor stator results in asymmetry of the motor phase current charge, increase of heating losses in certain phases, occurrence of variable components of electromagnetic torque and consumed power. An electric motor stator winding consists of a number of stator bars and overhang connections. Due to the complicated winding structure and the steel core, the attenuation and distortion of a pulse transmitted through the winding are complicated, and frequency-dependent. A low voltage impulse method and digital analysis techniques to determine the frequency characteristics of the winding are described. The frequency characteristics of electric motor stator windings are discussed in some detail. The analysis presented in this chapter could be applied to other rotating machines such as low voltage motors. An experiment of damping of electric motor winding was conducted. Changes in frequency characteristics after the cycle are shown. In this article an analysis of the frequency characteristics of low-voltage electric machines with mush-wound windings, taking into account the processes of successive destruction of the insulation structure by the influence of heat-wet cycles. It is shown that the frequency characteristics can be generalized by the parameter of the state of isolation in the conditions of periodic monitoring of the quality of insulation during regulatory audits. It is proved that the frequency characteristics taken in idle and short-circuit modes have diagnostic features of the level of insulation destruction during humidification, which consist of shifting the characteristics of extremes into the region of lower frequencies, as well as reducing the area under the curve between the minimum and maximum extrema of the characteristic.*

**Keywords:** high-frequency processes, high-frequency, input impedance, electric machines with mush-wound windings, capacitance.

### **REFERENCES**

1. Investigation of the possibility of continuous insulation control of existing electrical installations without their decommissioning // Proceedings of the Lugansk branch of the International Academy of Informatization. №1 (10) 2005 art. 87-90
2. V. Tarasyuk - Control and testing of insulation of windings of traction engines of electric trains during repair // Proceedings of the Vernadsky Scientific Library in 2012.
3. В.А. Чернышев, Е.В. Зенова, В.А. Chernov et al. - Generalized polarization index as a parameter for monitoring the state of insulating gaps of power transformers. // Proceedings of the IV International Conference "Power Transformers and Diagnostic Systems". - 2009. - 653 p.
4. Jose Luis Oslinger, Luis Carlos Castro, "Correlation between capacitance and dissipation factor used for assessment of stator insulation", Intern'l Journal of Electrical Engg., Vol. -6, no. 3, 2012.
5. Bakuradze LN, etc. Determination of the modes of the accelerated tests on safety of electroinsulating designs of electric cars of small power. Electric machines, vol. II, 1978.

Надійшла 29.03.2021

Received 29.03.2021

# ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

---

УДК 621.31

О.С. Яндульський, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-0362-7947  
О.І. Буханенко, аспірант, ORCID 0000-0003-0459-9308  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## МЕТОДИ ПОШУКУ АНОМАЛІЙ В ДАНИХ ВИМІРЮВАНЬ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

*В статті проведено аналіз проблем при зборі та обробці даних моніторингу режимних параметрів електричної мережі та розглянуто класифікацію аномалій, проблеми, особливості та методи їх пошуку в даних синхронізованих векторних вимірювань електроенергетичних систем.*

**Ключові слова:** синхронізовані векторні вимірювання, аномалія, режими роботи електроенергетичних систем.

### Вступ

На сучасному етапі розвитку електроенергетичних систем (ЕЕС) частка розподільних електричних мереж (РЕМ) із джерелами розосередженої генерації (ДРГ) з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) постійно зростає. Це обумовлює ряд таких проблем, як необхідність накопичення енергії, зниження інерційності і стійкості ЕЕС в цілому.

Задача оцінки стану та моніторингу режимних параметрів мережі передачі і розподілу електроенергії в даний час набувають особливого значення, оскільки це є однією з умов функціонування інтелектуальних мереж, в той же час об'єм і якість інформації про об'єкт, яка передається на рівень управління ЕЕС обмежені. Також «точкові рішення» - встановлення пристроїв, які аналізують лише певну область чи фрагмент мережі, дають неповне уявлення про загальний стан системи і унеможливають повну оцінку поточного стану системи. Найвні підходи до вирішення питання моніторингу опираються на тому, що в розподільних електричних мережах (РЕМ) в більшості випадків не передбачається повний аналіз параметрів режиму та стану обладнання, і, зазвичай, ґрунтується тільки на деяких базових вимірюваннях.

Тому виникає необхідність подальшого розвитку і розробки методів та засобів комплексного моніторингу електричних мереж та оцінки їх стану та інтелектуального управління. Дані моніторингу (частота, напруги, струми, стан комутаційного обладнання та ін.) режиму роботи ЕЕС є ключовим джерелом інформації для оцінки її поточного стану, функціонування систем керування та релейного захисту силового обладнання, тому висувуються нові вимоги до побудови інформаційно-технологічних систем управління ЕЕС [1, 2].

### Мета та завдання

Метою дослідження є аналіз стану та проблем розвитку систем збору і обробки даних режимних параметрів та вдосконалення методів виявлення аномалій в даних синхронізованих вимірювань режимних параметрів електричної мережі.

### Аномалії при аналізі даних синхронізованих векторних вимірювань

Широке впровадження пристроїв синхронізованих векторних вимірювань (ПСВВ), інтелектуальних лічильників, аналізаторів якості електричної енергії різко збільшують обсяги даних, які обробляються для моніторингу і управління ЕЕС. Спостерігаються випадки, коли інформація неструктурована, не синхронізована в часі, розосереджується та зберігається на різних серверах і базах даних з різною архітектурою і протоколами для комунікації, що ускладнює її обробку і аналіз. Отримані дані містять інформацію про стан енергосистеми і динаміку зміни її режимних параметрів, загальносистемні чи локальні аварії, вихід обладнання з ладу. Їх недостовірність може вплинути на ефек –

тивність роботи систем керування [3]. Швидке виявлення збоїв в роботі систем та аномалій даних – один із важливих напрямків для підтримки безвідмовної роботи та ефективного керування ЕЕС.

Проблема пошуку і виявлення аномалій в даних синхронізованих вимірювань – важлива проблема, яка досліджувалась в різних галузях. Деякі методи виявлення аномалій спеціально розроблені для конкретних задач, в той час як інші мають загальний характер. Виявлення аномалій відноситься до проблеми пошуку закономірностей в даних, які не відповідають параметрам ЕЕС при нормальному режимі роботи і схожі на більшість із заданого об'єму, причому приклади таких аномалій або відсутні взагалі, або їх мало і невідомо, коли саме вони виникли, і в якій частині вибірки даних вимірювань вони знаходяться.

На даному етапі досліджень відсутня загальноприйнята класифікація аномалій в даних ПСВВ, але в більшості випадків найчастіше зустрічаються наступні [4]:

- Точкові аномалії – статичні викиди у вибірці даних, найпростіший і найпоширеніший вид аномалій (рис.1, а). У випадку послідовних даних, задача їх пошуку вирішується шляхом встановлення меж відхилення, і більше чи менше значення вказаного діапазону вважається аномальним;
- Контекстні – умовні аномалії, оскільки ознаки аномальності проявляються в рамках визначеного контексту. Мають місце при аналізі для сезонних даних - застосовується як порівняння вибірок даних за певні однотипні періоди вимірювань, чи системних повідомлень [5, 6] (рис.1, б);
- Колективні аномалії – сукупність даних, які взаємопов'язані, але є аномальними по відношенню до всього набору даних. У випадку колективної аномалії, інтелектуальний аналіз даних дозволяє виявити її, визначаючи сукупність величин чи послідовність їх зміни, і дані являються аномальними лише тоді, коли послідовність зв'язаних між собою параметрів є аномальними до загальної вибірки даних. В іншому разі їх можна вважати достовірними (рис.1, в);

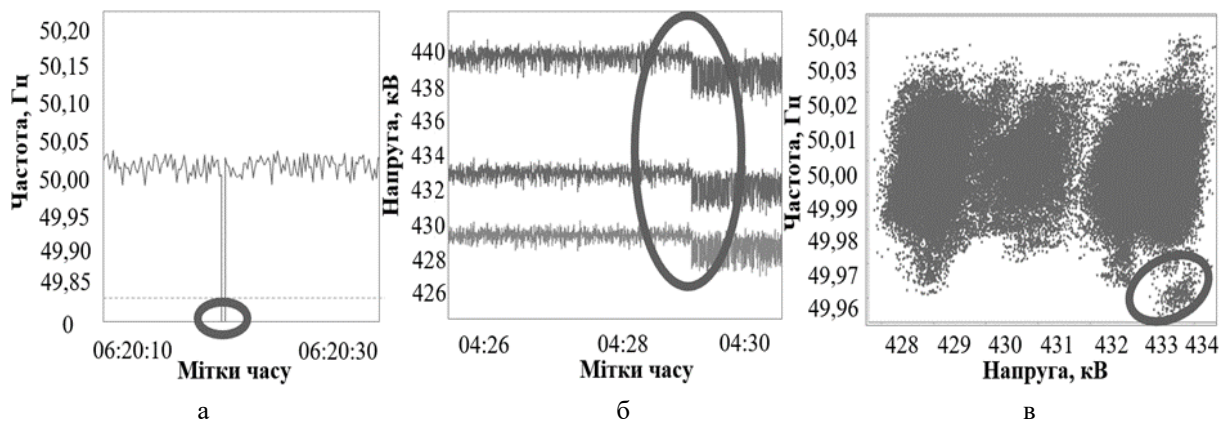


Рис. 1 – Приклади аномалій: а – точкова, б – контекста, в – колективна

Статистична оцінка даних дозволяє здійснювати прогнозування поведінки системи, опираючись на сукупність факторів, які призвели до виникнення аномалії. Тому однією із задач аналізу режимних параметрів є застосування і адаптація алгоритмів для виявлення аномалій в роботі ЕЕС (коливання частоти, потужності, струмів) і в інформаційній мережі.

Проведений аналіз показав, що в процесі виявлення можуть виникати певні проблеми, основними з яких є:

- Ті, що обумовлені результатом дій зловмисників – крадіжки електроенергії, хакерські атаки. Часто зловмисники пристосовуються таким чином, щоб аномалії здавалися нормальними в процесі їх аналізу.
- Також важливим є визначення нормальної області, що охоплює всі можливі варіанти нормальної поведінки, є ускладненим процесом, оскільки межі між нормальною і аномальною поведінкою досить часто не є точними, і спостереження поблизу граничних значень може бути нормальним і навпаки.
- Наявність шумів в даних, які схожі на аномалії.
- Оскільки поняття нормальної поведінки розвивається і змінюється, поточне поняття може бути недостатньо репрезентативним в майбутньому.

Виходячи з цього, виникає необхідність побудови надійної схеми перевірки правильності роботи алгоритму системи моніторингу, адже якщо «правильних відповідей» немає, то і зрозуміти, наскільки метод пошуку аномалій в даних правильно виконує своє завдання, складно. Для цього з'являється необхідність незалежної оцінки про можливі аномалії, які очікуються у вибірці даних, що дозволить

порівнювати отримані значення вимірювань, і тим самим здійснювати відповідне налаштування роботи алгоритмів пошуку аномалій.

#### **Методи дослідження і виявлення аномалій даних**

Особливістю методів аналізу даних є здатність оброблювати великі об'єми даних в реальному часі та можливість вирішувати задачі класифікації, кластеризації і прогнозування аномалій.

В інформаційній системі ЕЕС постійно присутня певна кількість повідомлень, таких як положення пристроїв регулювання під навантаженням (РПН) та перемикачів без збудження (ПБЗ) трансформаторів, положення вимикачів, роз'єднувачів, заземлювачів, короткозамикачів, пристроїв вимірювання та інші. Ці повідомлення обов'язково корелюють між собою, оскільки знаходяться у цілісній підсистемі. Тому, якщо застосувати методи машинного навчання [8] до даних режимів роботи, а також повідомлення, що відповідають правильному спрацюванню пристроїв релейного захисту та автоматики, можна отримати модель, яка буде містити взаємозв'язки різних елементів технологічного процесу. Це дозволить визначити зміни і порушення, що виникатимуть в інформаційних мережах (ІМ). Після процесу «навчання» ІМ зможе передбачати значення всіх сигналів в реальному часі, і тоді стане можливим порівняти їх з реальними. Якщо значення значно відрізняються, можна вважати, що в системі присутня аномалія. Аналогічно для аналізу накопичених даних, є доцільним використання повідомлень з реєстраторів аварійних подій для співставлення виявлених аномалій із реальними.

Проведений аналіз показав, що можна виділити наступні підходи до виявлення аномалій в наборах даних:

- Кластеризація даних – процес об'єднання схожих за поведінкою значень в однорідні групи на основі заданих характеристик, в результаті чого схожі об'єкти знаходяться в загальній групі, а різнорідні зосереджені в інших. Це дозволить виявити області, які значно відрізняються від більшості [9];
- Статичні тести – визначення різниці між двома розподілами значень і порівняння із заданими пороговими межами [10];
- Пошук аномалій на основі відхилень значень вибірки даних з використанням прогнозування часового ряду значень. Даний метод підходить для виявлення аномалій в даних з нормальним розподілом [11];
- На основі дистанцій – з використанням функції відстані між рядами значень. Область значень, що перевіряється в певному діапазоні порівнюють з еталонним набором [12];
- Оцінка густини значень – виявлення областей, які значно віддалені від допустимого порогу відхилень [13];
- Методи на основі класифікації – дають оцінку значень набору даних з допомогою різних алгоритмів класифікації [14];
- Пошук аномалій в часових рядах з використанням автокодувальників на основі машинного навчання. Даний підхід дозволяє відновлювати вихідні дані, що в свою чергу дає змогу аналізувати вихідний набір і прогнозований [15].

За останні декілька років було запропоновано методи аналізу даних ПСВВ, які в тій чи іншій мірі покривають потреби комплексного виявлення аномалій в роботі ЕЕС.

У [16] представлено програмний додаток для моніторингу на основі ПСВВ, який розроблено для виявлення субсинхронних коливань в ЕЕС з високою концентрацією вітрових електростанцій (ВЕС). Програмний додаток, представлений у роботі, виявляє частоту і ступінь важкості виявленого коливання. З метою підвищення точності інструменту та його потенціалу, використовувані субсинхронні режими коливань було класифіковані за діапазоном частот.

В [17] розроблені нові ефективні алгоритми для виявлення аномалій та подій, класифікації та локалізації з використанням даних ПСВВ та використання набору математичних та статистичних методів, що включають оцінку максимальної правдоподібності [18], зміну кластеру на основі алгоритму густини просторової кластеризації з присутністю шумів [19]. Результати моделювання доводять ефективність алгоритму для виявлення, класифікації та локалізації подій. Даний інструментарій показує, що це ефективне вдосконалення ПСВВ для моніторингу ЕЕС в реальному часі. Для подальшого розвитку підходу необхідно включати детектори виявлення аномалій на основі машинного навчання та аналізу для швидшого отримання результатів в режимі реального часу.

За допомогою вимірювання ПСВВ з високою частотою в [20] розроблено метод для виявлення подій в ЕЕС у визначеній деталізації. Проблема подання інформації вихідних даних була вирішена за допомогою процедури об'єднання та вибору. Залежно від наявності експертних знань, алгоритм аналізу головних компонентів [21] прийнятий для логічного прийняття рішень, і новий метод навчання – метод опорних векторів, розроблений, щоб також розрізняти типи подій, включаючи інформацію як від частково маркованих, так і від немаркованих даних.

У [22] розроблено новий метод, який може динамічно отримувати інформацію адресатів інформаційних повідомлень, та використовувати її для виявлення аномалій. Експериментально було доведено ефективність методу, а також виконано порівняння різних підходів. Основними перевагами запропонованого методу виявлення контекстних аномалій є те, що вони є детермінованими та чутливими до розташування (контексту). Також алгоритм може видалити всі помилкові спрацьовування та не вимагають навчання.

У [23] описано ієрархічну "архітектуру виявлення аномалій", яка об'єднує синхронні дані ПСВВ для досягнення високої точності у виявленні наслідків аварійних режимів. Сформульовано набір правил для обробки даних РМУ на місцевому та центральному рівні нашої ієрархічної архітектури.

В результаті досліджень [24] запропоновано концепцію системи моніторингу несинусоїдальних режимів ЕЕС на основі вимірів параметрів мережі, яка дозволяє зменшити необхідність застосування дорогих пристроїв контролю несинусоїдальних режимів. Також розроблено принципи побудови інтелектуальної системи контролю несинусоїдальних режимів і методи її налаштування для ЕЕС із змінними нелінійними навантаженнями.

Важливим також є виявлення аномалій, які можуть виникнути внаслідок хакерських атак з використанням хибних даних. Безпека в системах керування і моніторингу відіграє важливу роль для підтримки стабільної і надійної роботи ЕЕС.

Таким чином, ідентифікація потоків фальсифікованих даних перед кожним циклом оцінки стану ЕЕС є пріоритетною задачею. Сфальсифіковані потоки даних можуть викликати хибні перенавантаження чи відключення споживачів. Тому в роботі [25] запропоновано метод аналізу даних ПСВВ з використанням фільтру даних моніторингу на основі нейронної мережі. Даний програмний фільтр може працювати як додатковий рівень безпеки для фільтрації хибних даних перед виконанням оцінки стану ЕЕС.

### **Висновки**

В роботі проаналізовано аномалії в даних синхронізованих векторних вимірювань, а також розглянуто існуючі методи для їх пошуку та виявлення.

Застосування інтелектуальних методів аналізу даних і виявлення аномальних режимів роботи може значно підвищити надійність функціонування ЕЕС, зводячи ризики прийняття хибних рішень системами керування до мінімуму, забезпечить можливість точного прогнозування режимів роботи. Кожен з розглянутих методів дозволяє вирішити конкретну задачу і має перспективи для подальших досліджень в майбутньому.

Запропоновано комплексне використання методів аналізу даних ПСВВ, що дозволить отримати повну інформацію про стан ЕЕС, та в свою чергу надасть можливість виявляти і досліджувати нові властивості аномалій.

### **Список використаної літератури**

1. Технічні вимоги до побудови інформаційно-технологічних систем диспетчерського управління ОЕС України. Електронне джерело. Режим доступу: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/05/proekt-Tehnichnyh-vymog.pdf>
2. Укренерго розпочало впровадження системи WAMS для вдосконалення диспетчерського управління енергосистемою. Електронне джерело. Режим доступу: <https://ua.energy/zagalnynovyny/ukrenergo-rozpochalo-vprovadzhennya-systemy-wams-dlya-vdoskonalennya-dyspetcherskogo-upravlinnya-energosystemoyu/>
3. Machine Learning for Synchrophasor Analysis. Final Project Report September 2020 // Huiying Ren Zhangshuan Hou Heng Wang Pavel Etingov
4. Varun Chandola, Arindam Banerjee, and Vipin Kumar. 2009. Anomaly detection: A survey. ACM Comput. Surv. 41, 3, Article 15 (July 2009), 58 pages.
5. Evan Miller. 2007. Aberrant Behavior Detection in Time Series for Monitoring Business-Critical Metrics
6. Gupta M., Sharma A.B., Chen H., Jiang G. 2013 Context-Aware Time Series Anomaly Detection for Complex Systems. Proceedings of the SDM Workshop.
7. Якість електричної енергії. Електронне джерело. Режим доступу: <https://www.nerc.gov.ua/?id=19529>
8. Malhotra, P. et al. "Long Short Term Memory Networks for Anomaly Detection in Time Series." ESANN (2015).

9. Data clustering algorithms. Електронне джерело. Режим доступу: <https://sites.google.com/site/dataclusteringalgorithms/>
10. Toledano M. et al. Real-time anomaly detection system for time series at scale //KDD 2017 Workshop on Anomaly Detection in Finance. – 2018. – С. 56-65.
11. Detecting Anomalies with Functions and Statistical Functions. Електронне джерело. Режим доступу: [https://docs.wavefront.com/query\\_language\\_statistical\\_functions\\_anomalies.html](https://docs.wavefront.com/query_language_statistical_functions_anomalies.html)
12. Dynamic Time Warping with Time Series. Електронне джерело. Режим доступу: [https://medium.com/@shachiakyaagba\\_41915/dynamic-time-warping-with-time-series-1f5c05fb8950](https://medium.com/@shachiakyaagba_41915/dynamic-time-warping-with-time-series-1f5c05fb8950)
13. Оценивание плотности распределения. Електронне джерело. Режим доступу: [http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Оценивание\\_плотности\\_распределения](http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Оценивание_плотности_распределения)
14. Paul Mather, Brandt Tso CRC Press - Classification Methods for Remotely Sensed Data // 2016 p. – 376p.
15. Deep learning. Stacked Autoencoders. Методы обучения нейронных сетей с большим количеством скрытых слоёв. Електронне джерело. Режим доступу: <http://mechanoid.su/neural-net-mlp-deep.html>
16. L. Vanfretti, M. Baudette, J. L. Domínguez-García, A. White, M. S. Almas and J. O. Gjerdeóy, "A PMU-based fast real-time sub-synchronous oscillation detection application," 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Rome, 2015, pp. 1892-1897, doi: 10.1109/EEEIC.2015.7165461.
17. S. Pandey, A. K. Srivastava and B. G. Amidan, "A Real Time Event Detection, Classification and Localization Using Synchrophasor Data," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 35, no. 6, pp. 4421-4431, Nov. 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2020.2986019.
18. Никулин М. С. Отношения правдоподобия критерий // Математическая энциклопедия / Виноградов И. М. (гл. ред.). — М.: Советская энциклопедия, 1984. — Т. 4. — С. 151. — 1216 с
19. DBSCAN - Електронне джерело. Режим доступу: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.DBSCAN.html>
20. Y. Zhou, R. Arghandeh, I. Konstantakopoulos, S. Abdullah, A. von Meier and C. J. Spanos, "Abnormal event detection with high resolution micro-PMU data," 2016 Power Systems Computation Conference (PSCC), Genoa, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/PSCC.2016.7540980.
21. A kernel Principal Component Analysis (kPCA) digest with a new backward mapping (pre-image reconstruction) strategy. - Електронне джерело. Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2001.01958>
22. H. H. Feng, O. M. Kolesnikov, P. Fogla, W. Lee and Weibo Gong, "Anomaly detection using call stack information," 2003 Symposium on Security and Privacy, 2003., Berkeley, CA, USA, 2003, pp. 62-75, doi: 10.1109/SECPRI.2003.1199328.
23. M. Jamei et al., "Anomaly Detection Using Optimally Placed mPMU Sensors in Distribution Grids," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 4, pp. 3611-3623, July 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2764882.
24. Ю. Е. Варецкий, д. т. н., проф.; Т. И. Наконечный; Н. Д. Федонюк; В. А. Комар, к. т. н. - Архитектура интеллектуальной системы мониторинга несинусоидальных режимов электрической сети // Наукові праці ВНТУ, 2010, № 1
25. Sagnik Basumallik, Rui Ma, Sara Eftekharnejad - Packet-data anomaly detection in PMU-based state estimator using convolutional neural network, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 107, 2019, Pages 690-702.

**O. Yandulskiy**, Dr. Eng. Sc., Prof., **ORCID** 0000-0002-0362-7947

**O. Bukhanenko**, Ph.D. student, **ORCID** 0000-0003-0459-9308

**National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**

## **METHODS OF SEARCHING FOR ANOMALIES IN THE DATA PROVIDED BY MODE PARAMETERS MEASUREMENTS OF THE ELECTRIC NETWORK**

*The materials of the article are an overview of the problems of development of electric power systems in the context of data collection and processing of mode parameters and analytical review of methods of search and detection of anomalies in data of synchronized vector measurements of mode parameters of electric network. The*



*classification of anomalies, problems that arise during their search, classification of methods of search and detection of anomalies, as well as modern methods of finding anomalies in the data of synchronized vector measurements of power systems are considered.*

**Keywords:** *synchronized vector measurements, anomaly, modes of operation of electric power systems.*

#### REFERENCES

1. Technical requirements for the construction of information technology systems of dispatch management of the UES of Ukraine. Electronic source. Access mode: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/05/proekt-Tekhnichnyh-vymog.pdf>
2. Ukrenergo has started the implementation of the WAMS system to improve the dispatch management of the power system. Electronic source. Access mode: <https://ua.energy/zagalni-novyny/ukrenergo-rozpochalo-vprovadzheniya-systemy-wams-dlya-vdoskonalennya-dyspetcherskogo-upravlinnya-energosystemoyu/>
3. Machine Learning for Synchrophasor Analysis. Final Project Report September 2020 // Huiying Ren Zhangshuan Hou Heng Wang Pavel Etingov
4. Varun Chandola, Arindam Banerjee, and Vipin Kumar. 2009. Anomaly detection: A survey. *ACM Comput. Surv.* 41, 3, Article 15 (July 2009), 58 pages.
5. Evan Miller. 2007. Aberrant Behavior Detection in Time Series for Monitoring Business-Critical Metrics
6. Gupta M., Sharma A.B., Chen H., Jiang G. 2013 Context-Aware Time Series Anomaly Detection for Complex Systems. *Proceedings of the SDM Workshop.*
7. The quality of electricity. Electronic source. Access mode: <https://www.nerc.gov.ua/?id=19529>
8. Malhotra, P. et al. "Long Short Term Memory Networks for Anomaly Detection in Time Series." *ESANN* (2015).
9. Data clustering algorithms. Electronic source. Access mode: <https://sites.google.com/site/dataclusteringalgorithms/>
10. Toledano M. et al. Real-time anomaly detection system for time series at scale // *KDD 2017 Workshop on Anomaly Detection in Finance.* – 2018. – C. 56-65.
11. Detecting Anomalies with Functions and Statistical Functions. Electronic source. Access mode: [https://docs.wavefront.com/query\\_language\\_statistical\\_functions\\_anomalies.html](https://docs.wavefront.com/query_language_statistical_functions_anomalies.html)
12. Dynamic Time Warping with Time Series. Electronic source. Access mode: [https://medium.com/@shachiakyaagba\\_41915/dynamic-time-warping-with-time-series-1f5c05fb8950](https://medium.com/@shachiakyaagba_41915/dynamic-time-warping-with-time-series-1f5c05fb8950)
13. Estimation of the distribution density. Electronic source. Access mode: [http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Оценивание\\_плотности\\_распределения](http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Оценивание_плотности_распределения)
14. Paul Mather, Brandt Tso CRC Press - *Classification Methods for Remotely Sensed Data* // 2016 p. – 376p.
15. Deep learning. Stacked Autoencoders. Methods for training neural networks with a large number of hidden layers. Electronic source. Access mode: <http://mechanoid.su/neural-net-mlp-deep.html>
16. L. Vanfretti, M. Baudette, J. L. Domínguez-García, A. White, M. S. Almas and J. O. Gjerdeóy, "A PMU-based fast real-time sub-synchronous oscillation detection application," 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Rome, 2015, pp. 1892-1897, doi: 10.1109/EEEIC.2015.7165461.
17. S. Pandey, A. K. Srivastava and B. G. Amidan, "A Real Time Event Detection, Classification and Localization Using Synchrophasor Data," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 6, pp. 4421-4431, Nov. 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2020.2986019.
18. Nikulin M. Likelihood ratios criterion // *Mathematical encyclopedia / I. Vinogradov - Moscow: Soviet encyclopedia, 1984. T. 4., 1216 p.*
19. DBSCAN - Electronic source. Access mode: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.DBSCAN.html>
20. Y. Zhou, R. Arghandeh, I. Konstantakopoulos, S. Abdullah, A. von Meier and C. J. Spanos, "Abnormal event detection with high resolution micro-PMU data," 2016 Power Systems Computation Conference (PSCC), Genoa, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/PSCC.2016.7540980.
21. A kernel Principal Component Analysis (kPCA) digest with a new backward mapping (pre-image reconstruction) strategy. Electronic source. Access mode: <https://arxiv.org/abs/2001.01958>

22. H. H. Feng, O. M. Kolesnikov, P. Fogla, W. Lee and Weibo Gong, "Anomaly detection using call stack information," 2003 Symposium on Security and Privacy, 2003., Berkeley, CA, USA, 2003, pp. 62-75, doi: 10.1109/SECPRI.2003.1199328.

23. M. Jamei et al., "Anomaly Detection Using Optimally Placed mPMU Sensors in Distribution Grids," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 4, pp. 3611-3623, July 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2017.2764882.

24. Y. Varetsky, Doctor of Technical Sciences, Prof., T. Nakonechny, N. Fedonyuk, V. Komar, Candidate of Technical Sciences - Architecture of an intelligent monitoring system for non-sinusoidal modes of an electrical network // Naukovi pratsi VNTU, 2010, No. 1

25. Sagnik Basumallik, Rui Ma, Sara Eftekharijad - Packet-data anomaly detection in PMU-based state estimator using convolutional neural network, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 107, 2019, Pages 690-702

Надійшла 07.03.2021  
Received 07.03.2021

А.А. Карпеченко, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-7543-4159

М.М. Бобров, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-9098-6912

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Миколаїв)

## ФОРМУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ З КОМПЛЕКСОМ ПІДВИЩЕНИХ ФІЗИКО- МЕХАНІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

*Досліджено можливість підвищення комплексу фізико-механічних і експлуатаційних властивостей плазмових покриттів з порошків марок ПГ-19М-01 і ПРХ18Н9 за рахунок електроімпульсного впливу на гетерофазний високотемпературний струмінь при напиленні і подальшій поверхневій пластичній деформації нанесених покриттів дробоструменевою обробкою. Показано, що дробоструменева обробка забезпечує формування зміцненого шару товщиною до 180...200 мкм, при цьому максимальний рівень мікротвердості спостерігається на глибині близько 60 мкм. Мікротвердість покриття з порошку ПГ-19М-01 в точці максимального зміцнення підвищується на 35%; сталевих покриттів з порошку ПР-Х18Н9 – на 48% в порівнянні зі станом після напилення. Проведено експериментальні дослідження впливу зазначеної обробки на міцність зчеплення і зносостійкість отриманих покриттів. Показано, що після проведення дробоструменевої обробки міцність зчеплення покриттів знижується на 10...15%, а зносостійкість підвищується на 32...38%.*

**Ключові слова:** плазмові покриття, поверхнева пластична деформація, твердість, зносостійкість, міцність зчеплення.

### Вступ.

Основна причина вичерпання ресурсу енергетичних агрегатів більшості ТЕЦ пов'язана з ерозією і контактним зносом різних поверхонь турбіни через високі навантаження, великі швидкості обертання і вплив швидкісних парогазових потоків із значним вмістом крапельної фази вологи на її останніх ступенях. В останні два десятиліття при проведенні планових ремонтних робіт відзначається стійка тенденція до збільшення інтенсивності зносу деталей парових турбін, особливо вхідних кромek робочих лопаток, що багато в чому обумовлено періодичною зміною режимів експлуатації ТЕЦ через необхідність використання більш економічних з них. Підвищення зносостійкості нових і відновлення зношених поверхонь деталей енергетичних машин в цілому забезпечує економію високоякісного металу, енергетичних і трудових ресурсів, а також приводить до раціонального використання природних ресурсів і забезпечує охорону навколишнього середовища. Одним із способів вирішення цієї проблеми є газотермічне напилення, що включає найбільш універсальний плазмовий метод, який широко використовується в даний час для відновлення і зміцнення деталей машин і механізмів. Однак, отримані традиційним методом плазмового напилення, такі покриття не завжди забезпечують достатній рівень фізико-механічних і експлуатаційних властивостей, зокрема необхідні значення твердості, міцності зчеплення з основою та зносостійкості.

У сучасних тенденціях розвитку технології плазмового напилення можна виділити ряд перспективних напрямків. Найбільш кардинальним є підвищення комплексу функціональних властивостей покриттів за рахунок їх наноструктурування. Отримують такі покриття напиленням агломерованих порошків з нанорозмірними частинками [1]. При цьому підготовлені порошки мікронних розмірів подають у високотемпературний плазмовий струмінь традиційним способом за рахунок використання транспортувального газу. Також для подачі ультрадисперсних порошків використовують суспензії [2], а сам процес їх нанесення отримав назву Suspension Plasma Spraying (SPS). Останнім часом запропоновано плазмову технологію нанесення покриттів з використанням прекурсорів, що містять дрібнодисперсні порошки керамік – Solution Precursor Plasma Spraying (SPPS). Процес складається з послідовного швидкого випаровування розчинника при вприскуванні прекурсора в плазмовий факел на зріз сопла плазмотрону, піролізу в плазмовому високотемпературному струмені і кристалізацією на підкладці [3]. Зазначені способи характеризуються складністю додаткового обладнання, необхідністю трудомісткої підготовки матеріалів, що напилюються. Досить перспективними вважаються способи формування нанокристалічного стану в поверхневому шарі за рахунок поверхневої пластичної деформації ультразвуковою ударною або електромеханічною обробкою [4, 5]. Окремий напрямок складають способи які спрямовані на створення

композиційних плазмових покриттів за рахунок застосування металевих матеріалів і наповнювачів (скло, полімер, кераміка, карбід) [6] або напилення плакованих порошків [7]. Багатообіцяючими вважаються способи, в яких використовується імпульсний вплив на процес напилення. Попередні дослідження [8] показали, що саме електроімпульсний вплив на гетерофазний високотемпературний потік при напиленні дозволяє значно підвищити міцність зчеплення з основою, щільність і твердість покриттів за рахунок зменшення середнього розміру частинок, що напилюються і збільшення їх швидкості. При цьому, додаткове обладнання є досить недорогим у виробництві і простим у застосуванні.

Актуальним є дослідження можливості комбінації декількох способів, що дозволяє значно підвищити фізико-механічні та експлуатаційні властивості функціональних плазмових покриттів і забезпечити їх необхідний рівень.

### **Основна частина.**

**Ціль та завдання дослідження.** Дослідження можливості підвищення комплексу фізико-механічних і експлуатаційних властивостей функціональних плазмових покриттів, що використовуються в енергомашинобудуванні, за рахунок застосування електроімпульсного впливу на гетерофазний високотемпературний струмінь у процесі їх формування та подальшої поверхневої пластичної деформації.

**Методика досліджень.** Підготовку поверхні зразків, безпосередньо перед напиленням, здійснювали за допомогою установки струменево-абразивної обробки марки 026-7 "Ремдеталь". Як абразив використовували електрокорунд марки 7Б, шліфзерно номер 125.

Струменево-абразивну обробку поверхні, призначену під напилення, проводили на наступному технологічному режимі:

– Тиск стисненого повітря, МПа	0,4 – 0,6
– Відстань від зрізу сопла до оброблювальної поверхні, мм	100 – 150
– Діаметр сопла, мм	12
– Кут падіння струменя на оброблювальну поверхню, град	60 – 90
– Лінійна швидкість переміщення пістолета, мм/хв	50 – 400

Обробка проводилася в декілька проходів.

Контроль якості обробленої поверхні проводився візуально. Оброблена поверхня сталевих пластин і зразків, призначених для дослідження мікроструктури та визначення міцності зчеплення покриттів з основою відповідно, після струменево-абразивної обробки мала сірувато-матовий відтінок. Величина шорсткості обробленої поверхні склала  $R_z = 38 - 75$  мкм.

Плазмові покриття отримували за допомогою установки «Київ-7», яка укомплектована плазмотроном ПУН-1 на наступному технологічному режимі: напруга на дузі 180 В, сила струму 150 А, дистанція напилювання 180 мм, витрати плазмотвірного газу 6,5 м<sup>3</sup>/год; тиск транспортувального газу 0,01 МПа. В якості плазмотвірного і транспортувального газу використовували стиснене повітря, а напилюваного матеріалу – порошок бронзи марки ПГ-19М-01 (ТУ 322-19-001-95) та порошок нержавіючої сталі марки ПР-Х18Н9 (ГОСТ 14086-69). Порошок перед напиленням прожарювали в сушильній шафі ШСВ 3,5.3.5.6/3,5 при температурі 150 °С протягом 3 годин. Ситову класифікацію застосовуваного порошку проводили на лабораторній установці моделі 029, використовуючи сітку номерів 004 і 008 за ГОСТ-ом 6613-86. В результаті просіювання виділено порошок фракцією 40...80 мкм. Для електроімпульсного впливу на гетерофазний високотемпературний плазмовий струмінь застосовували джерело високовольтних електричних імпульсів, яке підключали до розпилювача за прямою схемою. Напруга електричних імпульсів становила 5 кВ при частоті 5 кГц. Зазначені оптимальні режими плазмового напилення із застосуванням електроімпульсного впливу обґрунтовані в роботі [8].

Напилення плазмових покриттів здійснювали на пластини з вуглецевої якісної сталі марки 45 розміром 50x20x5 мм. Зазначена сталь призначена для виготовлення втулок, шестерень, колінчастих і розподільних валів, шпindelів, бандажів, циліндрів, штоків і т.п. Товщину покриттів визначали вимірами зразків до і після напилення штангенциркулем. Перед нанесенням покриттів поверхню, що підлягає напиленню, знежирювали технічним етанолом і піддавали струменево-абразивній обробці на вище зазначених технологічних режимах. Товщина нанесених покриттів не перевищувала 0,5...1,0 мм.

Дослідження мікроструктури отриманих плазмових покриттів здійснювали за допомогою оптичного металографічного мікроскопу ММУ-3. Знімки мікроструктур отримували цифровою камерою Delta Optical HDCE-20С, укомплектованою програмним забезпеченням Score Image 9.0. Отримані знімки аналізували в програмному металографічному комплексі МEGRAN. Вимірювання твердості за Віккерсом (HV<sub>5</sub>) проводили з використанням твердоміра типу ТП, мікротвердості (H<sub>ц50</sub>) – мікротвердомір ПМТ-3 при навантаженні на индентор 50 г (ДСТУ ISO 6507-4: 2008).

В якості методу поверхневої пластичної деформації (ППД) в роботі використовували дробоструминну обробку, вибір якої пояснюється її простотою реалізації, технологічністю та ефективністю даного способу. Для цього використовували також установку марки 026-7 «Ремдеталь». Як

робоче тіло використовували литу дріб з чавуну (ДЧЛ) номер 08 (ГОСТ 11964-81). Міцність зчеплення покриттів з основою визначали методом «втягування конусного штифта» на розривній машині УММ-5 на зразках-свідках. Їх також виготовляли з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45. Для отримання результатів міцності зчеплення покриттів з основою напилення на одному і тому ж режимі виконували в один прохід на 5 зразків одночасно.

Зносостійкість визначали на машині тертя СМЦ-2 за схемою ролик-колодка при обмеженій подачі мастила зі швидкістю 30 крапель за хвилину. Як мастило використовували моторну оливу марки М10Г2К (ГОСТ 8581-75). Окружна швидкість обертання ролика становила 0,8 м/с, тиск 4 МПа. Заміри втрат маси проводили після приробки (90% сполученої поверхні) на вагах ТВЕ-0.21 через кожні 10 км шляху. Всього було знято 10 вимірів. Колодку і ролик також виготовляли зі сталі 45. Плазмове покриття після знежирення і струменево-абразивної обробки наносили на ролик. Колодку піддавали термічному поліпшенню: гартування здійснювали з температури 840 °С і витримці протягом 50 хв, охолодження в воді. Після гартування твердість колодки складала HRC 54...55. Потім проводили відпуск при температурі 550 °С з витримкою протягом 1 год і охолодженням на повітрі. Твердість після відпуску складала HRC 30...32.

**Результати досліджень.** Для отримання плазмових покриттів з підвищеними фізико-механічними та експлуатаційними властивостями їх формування здійснювали із застосуванням електроімпульсного впливу на гетерофазний високотемпературний струмінь. Для подальшого підвищення їх властивостей, отримані зразки з плазмовими покриттями піддавали дробоструйній обробці.

Тривалість дробоструйної обробки розраховували за формулою [10]:

$$t = \frac{7.6ld\sqrt{H}}{k_i v m_{dp} \sin^2 \alpha} \quad (1)$$

де  $l$  – відстань від сопла до оброблювальної поверхні, мм;  $d$  – діаметр дробу, мм;  $H$  – твердість оброблювального матеріалу;  $k_i$  – коефіцієнт, який враховує кількість необхідних ударів для забезпечення зміцнення ( $k_i = 0,8$ );  $v$  – швидкість часток дробу, м/с;  $m_{dp}$  – витрати дробу, кг/хв;  $\alpha$  – кут між потоком дробу та оброблювальною поверхнею, град.

Тривалість дробоструменевої обробки зразків з плазмовими покриттями становила 1 хв. Необхідність визначення часу пов'язана з тим, що більш тривалий наклеп знижує твердість поверхні за рахунок появи великої кількості дефектів, які сприяють передчасному руйнуванню покриття. Глибину наклепаного шару встановлювали шляхом визначення значень мікротвердості плазмового покриття на поперечних шліфах (рис.1). Результати визначення значень мікротвердості наведені на рис. 2.

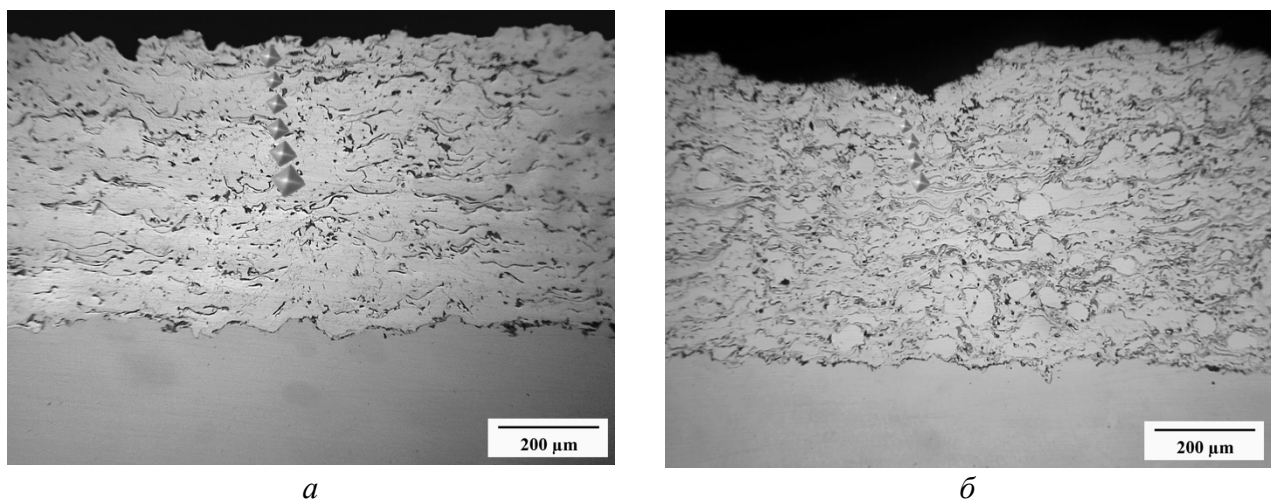


Рисунок 1 – Розмір відбитків індентору в залежності від глибини наклепаного шару плазмового покриття: отриманого з порошків марок ПГ-19М-01 (а) та ПР-Х18Н9 (б)

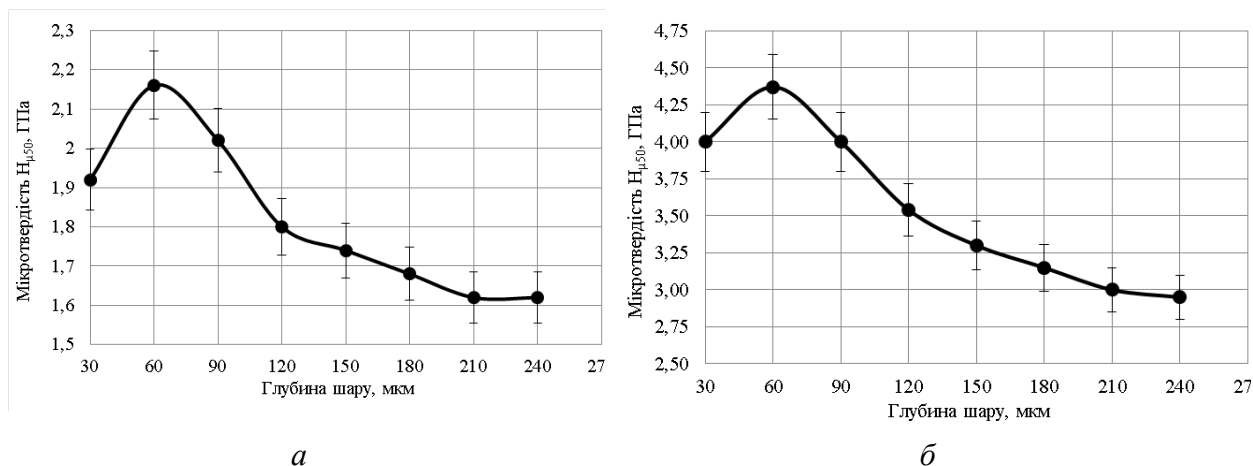


Рисунок 2 – Залежність значень мікротвердості від глибини наклепаного шару плазмових покриттів, отриманих з порошків марок: ПГ-19М-01 (а) та ПР-Х18Н9 (б)

Згідно з наведеними даними, у всіх випадках максимальні значення мікротвердості визначено не поблизу поверхневого шару плазмового покриття (рис.1), а на глибині приблизно 60 мкм від місця дробоструменевої обробки. Пояснюється це тим, що в місці удару дробу виникає локальний нагрів поверхневого шару, який і приводить до зниження наклепу тонких приповерхневих шарів, а зона максимального зміцнення зміщується до підповерхневого шару. Мікротвердість покриття отриманого з порошку ПГ-19М-01 в точці максимального зміцнення підвищується з 1,6 ГПа до 2,16 ГПа (+ 35%); нержавіючих сталевих покриттів з порошку марки ПР-Х18Н9 з 2,95 ГПа до 4,37 ГПа (+ 48%). Більший ефект підвищення твердості покриттів з нержавіючої сталі пояснюється їх здатністю до деформаційного зміцнення за рахунок формування  $\alpha'$ -фази мартенситного типу [10]. Глибина наклепаного шару складає 180...200 мкм, після чого мікротвердість приймає значення, які відповідають необробленому матеріалу покриття.

В літературі [11], присвяченій питанням дослідження когезійної і адгезійної міцності газотермічних покриттів, основна увага приділена останньої. Це, очевидно, пов'язано з тим, що при експлуатації газотермічних покриттів має місце їх відшарування від матеріалу основи і тому сформувався переконання, що адгезійна міцність є лімітуючим параметром. У даній роботі для визначення міцності зчеплення з металевою основою використовували штифтовий метод, оскільки він дозволяє оперативно проводити випробування безпосередньо після нанесення покриття на зразки. Результати визначення міцності зчеплення плазмових покриттів зі сталеву основою представлені на рис. 3.

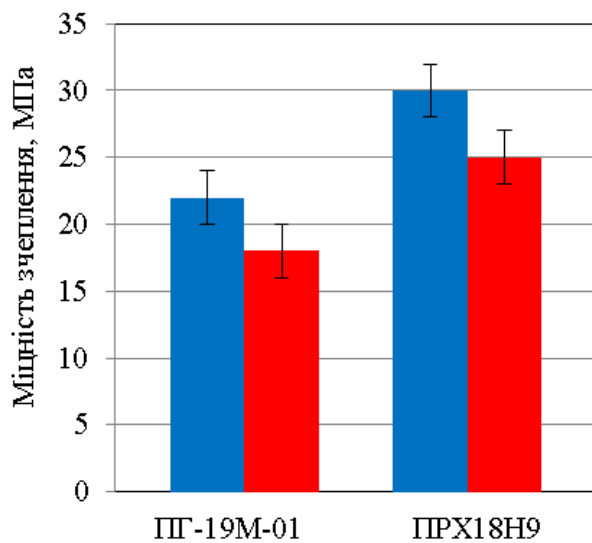


Рисунок 3 – Результати визначення міцності зчеплення плазмових покриттів зі сталеву основою:  
 ■ – після напилення; ■ – після напилення і ППД

Згідно з отриманими даними, після проведення дробоструменевої обробки міцність зчеплення покриттів зі сталеву основою знижується на 10...15% у порівнянні зі станом після напилення, ймовірно, за рахунок виникнення додаткових внутрішніх напружень в поверхневих шарах плазмового покриття.

На рис. 4 наведені результати випробувань на зносостійкість досліджуваних плазмових покриттів.

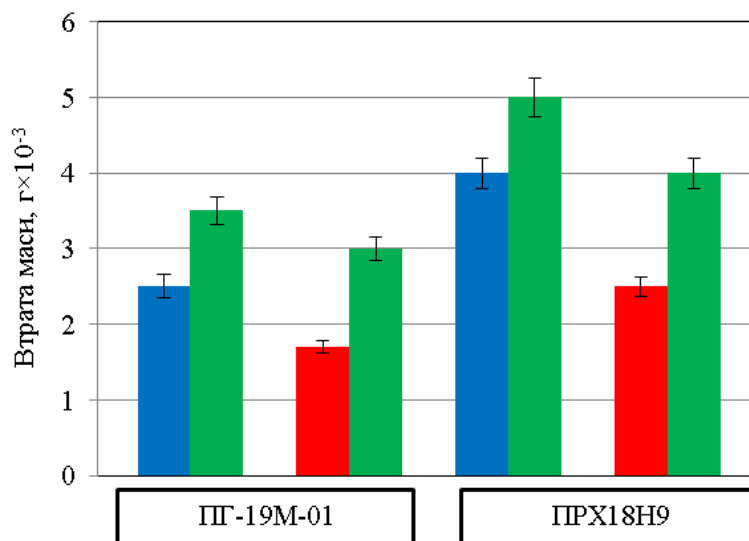


Рисунок 4 – Результати визначення зносостійкості плазмових покриттів:

■ - після напилення; ■ – після напилення і ППД; ■ – зносостійкість контртіла (колодки)

Згідно з наведеними даними, дробоструминна обробка забезпечує підвищення зносостійкості на 32% для покриттів, отриманих з порошку марки ПГ-19М-01; на 38% для покриттів, сформованих з порошку нержавіючої сталі марки ПР-Х18Н9. Ефект збільшення зносостійкості покриттів корелюється з ефектом підвищення їх твердості. Знос контртіла обернено пропорційний зносу покриття: чим більша твердість і зносостійкість покриття, тим більше зношується контртіло, але остання характеристика зростає менш інтенсивно, ніж твердість покриття.

**Висновки.** Досліджено можливість підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей плазмових покриттів отриманих з порошків марок ПГ-19М-01 і ПРХ18Н9 за рахунок електроімпульсного впливу на гетерофазний високотемпературний струмінь при напиленні і подальшої їх ППД дробоструменевої обробки. Показано, що дробоструменева обробка забезпечує формування зміцненого шару завтовшки до 180...200 мкм, при цьому максимальний рівень мікротвердості спостерігається на глибині близько 60 мкм. Встановлено, що мікротвердість плазмового покриття отриманого з порошку марки ПГ-19М-01 в точці максимального зміцнення підвищується з 1,6 ГПа до 2,16 ГПа; сталевих покриттів з порошку нержавіючої сталі марки ПР-Х18Н9 з 2,95 ГПа до 4,37 ГПа. При цьому спостерігається зниження міцності зчеплення зі сталеву основою на 10...15%, що пояснюється виникненням додаткових внутрішніх напружень в поверхневих шарах плазмових покриттів, але при цьому спостерігається підвищення їх зносостійкості на 32...38% після ППД в порівнянні з покриттями, нанесеними з використанням електроімпульсного впливу на високотемпературний гетерофазний струмінь. Запропоновані плазмові покриття рекомендовано застосовувати в енергетичному машинобудуванні в якості зносостійких антикорозійних матеріалів у зв'язку зі збільшенням щільності та зміцненням їх поверхневого шару.

#### Список використаної літератури

1. Gao Y. A novel plasma-sprayed nanostructured coating with agglomerated-unsintered feedstock / Y. Gao, Y. Zhao, D. Yang, J. Gao // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2016. – Vol. 25, pp. 291-300. doi: 10.1007/s11666-015-0340-1.
2. Qiu C. Manufacturing process of nanostructured alumina coatings by suspension plasma spraying / C. Qiu, Y. Chen // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2009. – Vol. 18, pp. 272-283. doi: 10.1007/s11666-009-9295-4.
3. Lohia A. Deposition of nanocomposite coatings employing a hybrid APS + SPPS technique / A. Lohia, G. Sivakumar, M. Ramakrishna // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2014. – Vol. 23, pp. 1054-1064. doi: 10.1007/s11666-014-0071-8.

4. Васильєв М.О. Синтез деформаційних наноккомпозитів на поверхні алюмінієвого сплаву Д16 за допомогою ультразвукового ударного оброблення / М.О. Васильєв, Б. М. Мордюк, С. І. Сидоренко // Металофізика та новітні технології. – 2016. - №4 - С.545-563. doi: 10.15407/mfint.38.04.0545.

5. Ivannikov A.Y. The effect of electromechanical treatment on structure and properties of plasma-sprayed Fe-30Cr coating / Journal of Thermal Spray Technology. – 2019. – Vol. 28, pp. 883-892. doi: 10.1007/s11666-019-00868-y.

6. Mal'tseva S. V. Structure and properties of modified plasma-sprayed composite coatings on a titanium base / S. V. Mal'tseva, I. P. Mel'nikova, A. V. Lyasnikova, A. M. Zaharevich // Mechanics of Composite Materials. – 2016. – Vol. 52, pp. 531-534. doi:10.1007/s11029-016-9603-2.

7. Borisov Y.S. High-velocity air plasma spraying of (Ti, Cr)C–32 wt.% Ni clad powder / Y.S. Borisov, A.L. Borisova, M.V. Kolomytsev // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2017. – Vol. 56, pp. 305-315. doi: 10.1007/s11106-017-9898-0.

8. Dubovyi O.M. Perspectives of improving physical and mechanical properties of thermal coatings by electropulse exposure / O.M. Dubovyi, O.V. Chechel, M.M. Bobrov, Yu. Ye. Nedelko // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2017. – Vol. 1, pp. 82-87.

9. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

10. Бородулин Г.М. Нержавеющая сталь / Г.М. Бородулин, Е.И. Мошкевич. – М.: Металлургия, 1973. – 319 с.

11. Mellali M. Influence of substrate roughness and temperature on the adhesion/cohesion of alumina coatings / M. Mellali, P. Fauchais, A. Grimaud // Surface and Coatings Technology. – 1996. – Vol. 1, pp. 275-286. doi: 10.1016/0257-8972(95)02540-5.

**A. Karpechenko**, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, **ORCID** 0000-0002-7543-4159

**M. Bobrov**, Cand. Sc. (Eng.), **ORCID** 0000-0002-9098-6912

**Admiral Makarov National university of Shipbuilding**

## **FORMATION OF FUNCTIONAL PLASMA SPRAYED COATINGS WITH COMPLEX OF IMPROVED PHYSICAL, MECHANICAL AND OPERATIONAL PROPERTIES**

*The possibility of increasing the complex of physical, mechanical and operational properties of plasma sprayed coatings from powders of the PG-19M-01 and PRH18N9 grades due to the electric pulse effect on the heterophase high-temperature flow during spraying and next surface plastic deformation of the deposited coatings by shot blasting has been investigated. It is shown that shot blasting provides the formation of a hardening layer with a thickness of up to 180...200 μm, while the maximum level of microhardness is observed at a depth of about 60 μm. The microhardness of the coating from PG-19M-01 powder at the point of maximum hardening increases by 35%; steel coatings from PR-HI8N9 powder – by 48% compared to the state after spraying. Experimental studies of the effect of this treatment on the bond strength and wear resistance of the obtained coatings have been carried out. It is shown that after shot-blasting the bond strength of the coatings decreases by 10...15%, and the wear resistance increases by 32...38%.*

**Keywords:** plasma sprayed coatings, surface plastic deformation, hardness, wear resistance, bond strength.

### **REFERENCES**

1. Y. Gao, Y. Zhao, D. Yang, J. Gao, “A novel plasma-sprayed nanostructured coating with agglomerated-unsintered feedstock”, Journal of Thermal Spray Technology, vol. 25, pp. 291-300, 2016. doi: 10.1007/s11666-015-0340-1.

2. C. Qiu, Y. Chen, “Manufacturing process of nanostructured alumina coatings by suspension plasma spraying”, Journal of Thermal Spray Technology, vol. 18, pp. 272-283, 2009. doi: 10.1007/s11666-009-9295-4.

3.A. Lohia, G. Sivakumar, M. Ramakrishna, “Deposition of nanocomposite coatings employing a hybrid APS + SPPS technique”, Journal of Thermal Spray Technology, vol. 23, pp. 1054-1064, 2014. doi: 10.1007/s11666-014-0071-8.

4. M.O. Vasyliiev, B. M. Mordiyuk, S. I. Sydorenko, “Syntez deformatsiinykh nanokompozitiv na poverkhni aliuminiiovoho splavu D16 za dopomohoiu ultrazvukovoho udarnoho obrobлення”, Metalofizyka ta novitni tekhnolohii, vol. 4, pp. 545-563. 2016. doi: 10.15407/mfint.38.04.0545.

5. A.Y. Ivannikov, V.I. Kalita, D.I. Komlev, “The effect of electromechanical treatment on structure and properties of plasma-sprayed Fe-30Cr coating”, Journal of Thermal Spray Technology, vol. 28, pp. 883-892, 2019. doi: 10.1007/s11666-019-00868-y.



6. S. V. Mal'tseva, I. P. Mel'nikova, A. V. Lyasnikova, A. M. Zaharevich, "Structure and properties of modified plasma-sprayed composite coatings on a titanium base", *Mechanics of Composite Materials*, vol. 52, pp. 531-534, 2016. doi:10.1007/s11029-016-9603-2.

7. Y.S. Borisov, A.L. Borisova, M.V. Kolomytsev, "High-velocity air plasma spraying of (Ti, Cr)C-32 wt.% Ni clad powder", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 56, pp. 305-315, 2017. doi: 10.1007/s11106-017-9898-0.

8. O.M. Dubovyi, O.V. Chechel, M.M. Bobrov, Yu. Ye. Nedelko, "Perspectives of improving physical and mechanical properties of thermal coatings by electropulse exposure", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol. 1, pp. 82-87, 2017.

9. L. G. Odintsov, *Uprochnenie i Otdelka Detaley Poverkhnostnym Plasticheskim Deformirovaniem: Spravochnik* [Hardening and Conditioning of Parts by Surface Plastic Deformation: Handbook], Mashinostroenie, Moscow, Russia, 1987, p. 328.

10. G. M. Borodulin, E. I. Moshkevich, *Nerzhaveyushchaya Stal* [Stainless Steel], Metallurgiya, Moscow, Russia, 1973, p. 319.

11. M. Mellali, P. Fauchais, A. Grimaud, "Influence of substrate roughness and temperature on the adhesion/cohesion of alumina coatings", *Surface and Coatings Technology*, vol. 81, pp. 275-286, 1996. doi: 10.1016/0257-8972(95)02540-5.

Надійшла 01.04.2021

Received 01.04.2021

Д.О. Федоров, асп., асист., ORCID 0000-0003-3751-6986  
 В.О Туз, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-4691-4890  
 С.В. Клевцов, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-1405-5048  
 Національний технічний університет України  
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ КРИЗИ ТЕЧІЇ ДЛЯ ТЕПЛОНОСІЯ НАДКРИТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Зацікавленість до проблематики різних теплофізичних і гідродинамічних явищ в атомній галузі, визначено реальним застосуванням в області аналізу аварійних процесів, пов'язаних з втратою теплоносія при порушеннях герметичності контуру охолодження в ядерних енергетичних установках. У статті проведено аналітичний огляд існуючих підходів математичного представлення явища критичного витікання середовища та актуальних прогнозних моделей. Надано опис фізичної суті такого феномену. Виконано аналіз існуючих моделей процесу для однофазного і двофазного потоку з урахуванням їх теплофізичних властивостей та залучених припущень. Задача полягала у аналізі, оцінці і актуалізації даних використання моделей, що необхідно для отримання замикаючої характеристики процесу. Розглянуті фізичні аспекти та особливості зазначеного явища для теплоносія надкритичних параметрів. Сформульовані вимоги до універсальної моделі кризи течії з подальшим її використанням в системних теплогідравлічних кодах для оцінки проблем ядерної безпеки перспективних ядерних реакторів IV-го покоління.

**Ключові слова:** криза течії, критична витрата, надкритичні параметри, запірні характеристики, затискання потоку

### Прийняті скорочення:

HEM	- homogeneous equilibrium model	НКП	- надкритичні параметри
LOCA	- loss of coolant accident	ЯР	- ядерний реактор
КТ	- криза течії		

### Прийняті позначення:

$G$	критична витрата (кг/с)	$x$	паровміст (від. од.)
$h$	- питома ентальпія (Дж/кг)	$\alpha$	- об'ємна частка фази (від. од.)
$p$	- тиск (Па)	$k$	- коефіцієнт проковзування (від. од.)
$s$	- питома ентропія (Дж/кг·К)	$L$	- довжина (м)
$v$	- питомий об'єм (м <sup>3</sup> /кг)	$D$	- внутрішній діаметр (м)

### Прийняті нижні індекси:

$i$	початкове значення	$fg$	процес кипіння
$g$	парова фаза	$c$	критичне значення
$f$	- рідка фаза		

### Вступ

На початку 2000х років, міжнародне агентство з атомної енергії, організувало спеціальну координаційну програму по визначенню актуальних проблем теплогідравлічних феноменів для ядерних реакторів на воді надкритичних параметрів [0,0]. Однією з актуальних задач є вивчення впливу затискаючих характеристик на витрату в вихідному перерізі умовного розриву при швидкій втраті тиску. Це має важливе практичне значення, оскільки підтримка тиску в контурі циркуляції під час аварії пов'язана з течєю першого контуру. Реалістичний прогноз втрати теплоносія при аваріях є принциповим при проведенні аналітичних робіт з обґрунтування безпеки ядерних реакторів, а також для вибору компонентів систем безпеки [0].

Рушійною силою в потоці середовища є градієнт тиску. Зменшення тиску на вихідній ділянці при незмінному на вхідному, приводить до збільшення швидкості витікання. Створене додаткове збурення передається по середовищу зі швидкістю поширення слабких хвиль всередину об'єму і приводить до перерозподілу тиску в бік збільшення його перепаду. В результаті чого, швидкість середовища в кожному

© Д.О. Федоров, В.О Туз, С.В. Клевцов, 2021

переризи трубопроводу збільшується. Однак, якщо швидкість у вхідному переризи досягла швидкості поширення самих слабких хвиль, то зменшення тиску внаслідок того, що воно поширюється з тією ж швидкістю, з якою витікає середовище, не буде більше передаватися в об'єм і викликати збільшення швидкості.

Тобто, існує кінцева величина швидкості поширення малих збурень, яка обумовлює неможливість безперервного переходу потоком через обмежуючу швидкість хвилі механічного коливання середовища, без додаткових геметричних і фізичних заходів. Іншими словами, подальше зменшення тиску у вихідному переризи більше не призводить до збільшення швидкості витікання, відбувається замикання величини витрати течії. Такий режим особливої умови витікання називають кризою течії, а характерну місцеву швидкість - критичною швидкістю течії [0]. Важливо також зазначити, що в умовах контурної течії, КТ настає через те, що немає додаткових факторів, що дозволяють отримати надзвуковий режим витоків середовища.

#### **Мета та завдання дослідження**

Метою даної роботи є ознайомлення з існуючими підходами математичного представлення явища критичного витікання середовища та актуальних прогнозних моделей. Виходячи з цього, сформулювати вимоги до універсальної моделі кризи течії. Для реалізації поставленої мети необхідно:

- провести літературний огляд основних існуючих підходів;
- виконати актуалізацію класифікації прогнозних моделей;
- за результатами оглядового дослідження зробити висновки;

#### **Матеріал та результати досліджень**

Класична гідрогазодинаміка використовує певний набір фізичних величин і понять, якими описується стан або процес. В даному випадку, коли потрібна оцінка масової витрати, необхідно враховувати і мати на увазі наступні початкові умови:

- вихідний термодинамічний стан середовища в об'ємі: повна ентальпія  $H_i$ , тиск  $P_i$  та маса  $m_i$ ;
- геометричні характеристики гідравлічної системи: довжина  $L$  та діаметр  $D$ .

В загальному випадку, для прогнозування КТ необхідно враховувати наступні аспекти:

- фазову термодинамічну нерівноважність;
- початкове прискорення середовища;
- історію зміни тиску в об'ємі;
- міжфазний обмін масою, енергією і імпульсом;
- ефекти, зумовлені багатомірністю задачі.

В літературі [0] представлена інформація про критичні моделі течії для однофазних і двофазних потоків. Деякі з них запропоновані без теоретичних викладок і представлені у вигляді напівемпіричних співвідношень, що зв'язують критичну витрату і термодинамічні параметри стану середовища. Для узгодження з відповідними експериментальними даними вводяться безрозмірні поправочні коефіцієнти.

Інші моделі, навпаки, отримують шляхом вирішення набору двох і більше балансових рівнянь, що описують фундаментальні закони збереження маси, імпульсу і енергії для кожної фази окремо або для представленої гомогенної суміші. Звичайно, ці підходи були розроблені в першу чергу для докритичного стану, тому питання їх прямого застосування для опису явища КТ при НКП не формулюється. Однак, вони взяті за основу в роботах по адаптації моделей, призначених для надкритичних умов.

З математичної точки зору, навіть найскладнішу теоретичну постановку, засновану на системі з семи диференціальних рівнянь збереження(маси), цілком допустимо вирішувати з коректними спрощувальними умовами. Більш того, багато теорій стають застосовними для інженерних оцінок, якщо вони дають прийнятне співпадіння з релевантним експериментом і / або заздалегідь заданими граничними умовами. Але, якщо спрощуючи припущення не витримуються, то результати можуть приймати велике відхилення, або зовсім ставати непридатними.

З даного короткого огляду можна зробити висновок про те, що існуючі моделі критичного витікання можуть істотно відрізнитися, в залежності від формулювання підходу і прийнятих припущень при постановці задачі. Проте, існуючі підходи для рішення задачі можна розділити на дві базові групи з внутрішніми умовами поділу фаз. Їх прийнято називати термодинамічно (температура) і механічно (тиск) рівноважні і нерівноважні, розуміючи під цим:

- тиск і температура рідкої і парової фаз рівні;
- параметри пов'язані кривою насичення  $h$ ,  $s$ -діаграми води і водяної пари.

Двокомпонентні моделі, в свою чергу поділяють в залежності від прийнятих припущень:

- гомогенні моделі: фазові швидкості рівні;
- гетерогенні моделі: фазові швидкості різні;
- "заморожені" моделі, де передбачається відсутність міжфазового масообміну.

Також, допускається зміна об'ємних фазових частин уздовж осі потоку. Ця умова ідеалістична з точки зору фундаментальних понять термодинамічної теорії, оскільки явища конденсації і випаровування залежать від міжфазових градієнтів температури і тиску. Іншими словами, постульований фазовий перехід відбувається миттєво.

Першу модель [0], яка представляє класичний термодинамічний підхід, прийнято називати гомогенною рівноважною моделлю (homogeneous equilibrium model). Вона спочатку розглядалася для середовищ в посудинах під тиском при аналізі витікання через трубу, діаметр якої малий у порівнянні з лінійним розміром посудини. Це найбільш простий підхід для формулювання рівноважної постановки задачі, при якому виділяють наступні припущення:

- однорідність середовища (представляється однокомпонентною рідиною з усередненими по масовому вмісту теплофізичними властивостями);
- процес витікання середовища усталений і ізоентропійний.

Слід зазначити, що дана модель була розроблена для визначення критичної витрати двофазної суміші, припускаючи, що між фазами відсутнє проковзування. Сама ж величина критичної витрати визначається наступним чином:

$$G = \frac{2 \left[ h_i(p_i) - h_g(p) - \frac{s_i(p_i) - s_f(p)}{s_{fg}(p)} h_{fg}(p) \right]^{\frac{1}{2}}}{v_f + \frac{s_i(p_i) - s_f(p)}{s_{fg}(p)} v_{fg}(p)} \quad (1)$$

З інформації відкритих літературних джерел [0], ця модель дає кращі результати при високому тиску гальмування (стагнації) потоку і паровмісту. Крім того, при великих довжинах каналу витікання, спостерігається підвищення точності прогнозу моделі, що добре співвідноситься з припущенням про термодинамічну рівновагу.

Друга модель [0] є теж гомогенна і рівноважна, але в основі побудована на гідродинамічному підході. Ця теорія включає опис поведінки двофазної суміші за допомогою шести незалежних рівнянь (три рівняння балансу, написані окремо для пари і рідини), при деяких припущеннях, які спрощують отримання аналітичного виразу. Для вирішення необхідне знання хоча б однієї термодинамічної змінної у вихідному перерізі.

У припущенні про невизначеність величини градієнта тиску в критичній області, ізоентропійному розширенні суміші і з увагою до рівнянь стану, величину критичної витрати визначають як:

$$G = \left[ - \frac{1}{\left[ \frac{dv_f}{dp} - \frac{v_{fg}}{s_{fg}} \frac{ds_f}{dp} + x \left( \frac{dv_{fg}}{dp} - \frac{v_{fg}}{s_{fg}} \frac{ds_{fg}}{dp} \right) \right]} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

З останнього виразу можна зробити висновок, що кожній термодинамічній умові у вихідному перерізі, відповідає конкретна витрата, в результаті чого в певному діапазоні зміни тисків в системі, витрата не залежить від параметрів стану витікаючого об'єму.

Наступні моделі – гетерогенні, де в порівнянні з попередніми, вводиться поняття об'ємної частки фази, яка визначається як:

$$\alpha = \frac{1}{1 + k \left( \frac{1-x}{x} \right) \frac{v_f}{v_g}} \quad (3)$$

Серед моделей гетерогенної постановки загальними припущеннями є термодинамічна рівновага і адіабатичне витікання, в той же час оцінку величини коефіцієнта проковзування  $k$  кожна модель трактує на свій лад. Що фактично відрізняє різні нерівноважні моделі між собою (Рис 1).

Третя модель [0], з проковзуванням фаз, використовує в основі рівняння збереження енергії. Вона отримала широке впровадження в розрахункових кодах, застосовується в техніці і була прийнята як найбільш точний підхід при визначенні масової витрати для протяжних каналів (відношення довжини до діаметру значно більше одиниці,  $\frac{L}{D} \gg 1$ ).

Тобто при заданих початкових умовах, витрата залежить від величин тиску і коефіцієнта проковзування. Автором [0] відзначається і той факт, що в силу дозвукових швидкостей фаз, на величину критичної витрати буде мати вплив також і зовнішній тиск за вихідним перерізом.

Четверта модель [0], враховує проковзування фаз, на основі рівняння збереження імпульсу. В основу цього підходу закладено базис моделі описаної раніше, але з наступною відмінністю в постановці задачі:

- не враховується тертя;
- неоднорідність суміші враховується коефіцієнтом ковзання  $k$  і задається кількісно.

Критична витрата визначається як:

$$G = \left[ \frac{2 \left[ h_i - h_f - \frac{h_{fg}}{s_{fg}} (s_i - s_f) \right]}{\left[ \frac{k(s_g - s_i)}{s_{fg}} v_f + \frac{s_i - s_f}{s_{fg}} v_g \right]^2 \left[ \frac{s_i - s_f}{s_{fg}} + \frac{s_g - s_i}{k^2 s_{fg}} \right]} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

При цьому, основна відмінність полягає в рішенні через рівняння збереження імпульсу замість енергії та визначенні інших математичних умов для визначення критичних значень параметрів. Вираз для визначення критичного витрати має вигляд:

$$G = \left( \frac{-k_c}{\left\{ (1-x+k_c x)x \frac{dv_g}{dp} + [v_g(1+2xk_c-2x) + v_f(2xk_c-2k_c-2xk_c^2+k_c^2)] \frac{dx}{dp} \right\}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Автором також пропонується розглядати величину приведенного тиску як функцію параметра відношення довжини до діаметру.

П'ята модель [0], вважається найбільш універсальною та використовує характеристичний метод для рішення системи диференціальних рівнянь збереження. Дана модель реалізована зі значними розширеннями в розрахунковому теплогідравлічному коді RELAP 5 [0].

Вираз для визначення масової витрати подається в неявному вигляді і, крім того, можна відзначити наступне:

- дозволяє обійти труднощі, пов'язані з оцінкою величини проковзування, які зустрічаються в інших моделях;
- враховує різницю в радіальній швидкості потоку, тому в певних межах може розглядатися як двомірний;
- не враховує передачу кількості руху між усталеними потоками фаз;
- при завданні дуже малої величини зміни тиску, процес безперервного розширення, можливо моделювати аналітично.

Допущенням представленої моделі є термодинамічна рівновага системи, проте автори [0] сформулювали додаток, який дозволяє використовувати її і в разі постулювання постійних значень об'ємних часток фаз в складі суміші під час течії потоку, тобто допущення про так зване «замерзання» потоку.

Наступною відокремленою групою стоять нерівноважні моделі, які дозволяють зняти допущення про рівність температур, тисків і швидкостей фаз. У них закладалися можливості урахування комплексних теплових і силових ефектів, такі як: нуклеація, метастабільність середовища, миттєве закипання, зростання парової фази. Разом з тим, такі моделі виявилися дуже чутливі для кожного конкретного явища, а тому їх складно застосовувати для прогнозування загального випадку процесу критичного витоку середовища.

Крім того, їх застосування дозволило виявити важливі чинники, які були використані для корекції результатів простих моделей. Згодом вони були класифіковані за прийнятими припущеннями щодо швидкостей кожної з фаз і величиною фазового складу впродовж усього тракту витікання- «зосереджені» і «розподілені» моделі.

Однією з перших масштабних робіт, пов'язаної з дослідженням феномена КТ при НКП, була робота [0], де перед авторами в ході проведення численної серії експериментів було поставлено два завдання.

Перше завдання полягало в отриманні даних необхідних для оцінки застосовності існуючих, вищеописаних моделей. Друга мета полягала в отриманні даних по теплопередачі для підтвердження деяких існуючих кореляцій конвективного теплообміну. Важливо відзначити, що для води при надкритичних умовах, були протестовані тільки НЕМ і отримано аналітичне рішення для критичного витрати, через рівняння Бернуллі.

Слід зазначити, що всі 283 серії експерименту проводилися шляхом підтримки робочого тиску в перерізі витоку при атмосферних умовах. Приймалося, що під час експериментів ця умова не змінювалась. Наявність такого великого перепаду тиску пов'язано з вказаними умовами.

Автори вперше запропонували кореляцію для оцінки псевдокритичної температури води за допомогою тиску гальмування потоку. В цілому при порівнянні моделей в докритичних умовах автори

виявили, що НЕМ модель прогнозує запірні характеристики потоку з достатньою точністю, в той час як інші моделі демонструють дещо кращі результати.

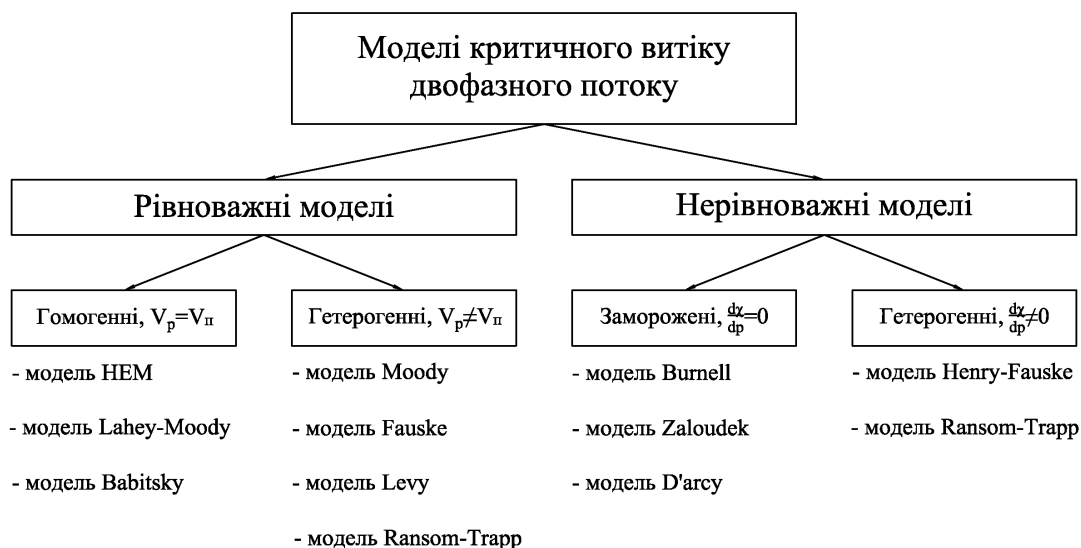


Рис. 1 Загальна класифікація моделей КТ

У фундаментальній праці [0,0] при використанні гомогенної рівноважної моделі була побудована діаграма режиму витікання при раптовій розгерметизації петлі з теплоносієм при НКП. Вдалося показати і визначити, що інтенсивність критичного витоку багато в чому, буде визначатися умовним співвідношенням геометричних розмірів системи і середовища з різним фізичним станом:

- критичне середовище (до точки 22,1 МПа по тракту падіння тиску з течії);
- перегріта пара (22,1 МПа і температура вище  $T_s$ );
- перегріта рідина з подальшим вибуховим скипанням (22,1 МПа, а температура нижче 647,3 К);
- двофазна суміш (тиск нижче 22,1 МПа, і температура  $T_s$ );

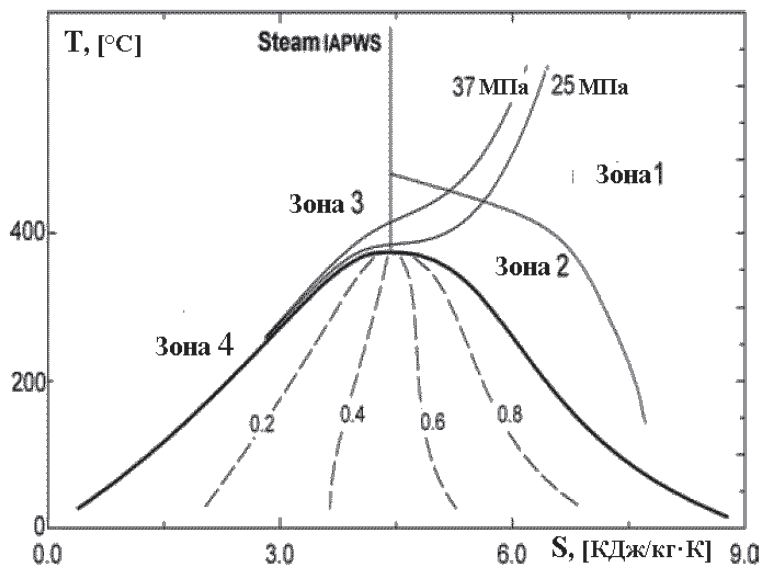


Рис. 2 Карта фізичних станів теплоносія при зниженні тиску у T-S діаграмі

Подальше застосування аналітичного підходу для вивчення явища КТ при НКП дозволило виявити невідповідність значень критичної витрати до 40% в порівнянні з отриманими експериментальними результатами. До того ж було визначено, що реальний час розгерметизації набагато більше, ніж може бути оцінений НЕМ, де процес розширення постулюється як ізоентропійний. Це можна пояснити тим, що домінуючі ефекти тертя, не враховуються моделлю.

У роботі [0], подібною до [0], автор використовував той самий підхід для подання експериментальних даних по масовій витраті. Було виявлено, що після певної величини температури ефект затискання потоку не відбувся. Важливо відзначити, що після виконання порівняння експериментальних даних з прогнозом за допомогою рівняння Бернуллі, НЕМ і моделлю коду RELAP 5, автори дійшли висновку, що у всіх випадках прогнозування процесу при НКП стикається з істотною похибкою.

#### **Висновок**

Таким чином, явище кризи течії при НКП характеризується послідовною зміною двох і більше термодинамічних станів середовища по тракту руху теплоносія. Цим пояснюється особливість кризи течії при НКП, оскільки процес переходу від НКП до будь-якого іншого стану є багатофакторним процесом і для якого цілісної моделі на теперішній час не існує. Крім того задача є принципово нелінійною з великою кількістю невизначеностей.

Вочевидь, при контурних течіях теплоносія ЯР при НКП виникає ситуація, коли термодинамічні параметри середовища невідомі, а спосіб опису процесу витікання вимагає з'ясування поточного стану середовища. Не менш значущою складністю є між фазні співвідношення в даному процесі в разі наявності фазових переходів по тракту.

Огляд літератури безумовно вказує на те, що феномен КТ середовища при НКП все ще потребує вивчення. Зокрема не існує універсального методу оцінки характеристик кризи течії при НКП в залежності від початкових параметрів середовища, а також впливу геометрії тракту на процес витікання.

Все це, підтверджує актуальність проблематики і доводить необхідність створення гнучкої моделі опису явища КТ при НКП. Слід зазначити що, запропонований розрахунковий метод може бути універсальним як з точки зору організації нестационарного режиму, так і спряженого аналізу на міцність. Особлива увага повинна бути приділена початковій стадії динаміки процесу при розгерметизації контуру. До того ж необхідно забезпечити ефективність розрахункової процедури незалежно від характерної довжини тракту течії і прийнятого кроку інтегрування розрахункової процедури. Обмежена доступність експериментальних даних з опису явища КТ при НКП, визначає необхідність використання в основі методу, для валідаційної процедури, переважно коректні фізичні співвідношення.

**D. Fedorov**, PhD student, TF, **ORCID** 0000-0003-3751-6986

**V. Tuz**, Dr. Eng. Sc., Prof., **ORCID** 0000-0002-4691-4890

**S. Klevtsov**, Cand. Sc., Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-1405-5048

**National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**

## **CRITICAL FLOW PREDICTION MODELS FOR THE COOLANT AT SUPERCRITICAL PARAMETERS**

*An interest of the problems of various thermophysical and hydrodynamic phenomena in the nuclear industry, determined by the real application in the field of analysis of the accident scenarios related to the loss of coolant accident. For the generic super critical water reactor the meaning of the problem at the initial stage of the critical flow process, is the existing of the uncertainty in the accepting boundary conditions to predict the flow characteristics. The article provides an analytical review of existing approaches for describing the critical flow phenomenon of the medium and to focus on the current predictive models. A description of the physical nature of such a phenomenon is provided. The scope of consideration includes information from the literature for single and two-phase flow, taking into account their physical basis and the assumptions made. The task of the work was to analyze the information found and to evaluate and update the data on the application of the models to obtain the critical characteristic. It was supposed to highlight the physical aspects and peculiarities of this phenomenon, as applied to the coolant at supercritical parameters. To formulate important requirements to the representative critical flow model for the possibility of its use in the system codes for evaluation of the nuclear safety problems of promising fourth generation nuclear reactors.*

**Keywords:** *critical flow, critical flow rate, supercritical parameters, choking characteristics, flow choking.*

#### **REFERENCES**

Generation IV International Forum: A decade of progress through international cooperation, JE Kelly - Progress in Nuclear Energy, Elsevier 2014

Heat Transfer Behaviour and Thermohydraulics Code Testing for Supercritical Water Cooled Reactors (SCWRs), TECDOC-1746, IAEA, 2014.

Y.Y. Bae, L.K.H. Leung, J.A. Lycklama À Nijeholt, M. Andreani, T. Schulenberg, J. Starflinger, Y. Ishiwatari, Y. Oka, H. Mori, and K. Ezato, "Status of ongoing research on SCWR thermal-hydraulics and safety", GIF Symposium, Paris, France, 2009

Fundamentals of Multiphase flow. Prof. M. L. Corradini. DEP, University of Wisconsin, USA, 1997

Critical flow models. State of art report on critical flow modeling. F. D'auria, P. Vigni, University of Pisa, Italy, 1980

Moody, Frederick J. Maximum discharge rate of liquid-vapor mixtures from vessels. USA, 1975

G. B. Wallis, "Critical two-phase flow," International Journal of Multiphase Flow, vol. 6, p. 97-112, 1980

Lahey K.T. Jr., Moody F.J., "The Thermal-hydraulics of a boiling water nuclear reactor", ANS Monograph, p. 467, USA, 1977

F. J. Moody, Maximum Flow Rate of a Single Component, Two-Phase Mixture, J. Heat Transfer., 87(1): 134-141, ASME, USA, 1965

Henry R. E, Fauske H.K. "The two phase critical flow of one component mixtures in nozzles, orifices and short tubes", J. Heat Transfer, 93, p179, ANL, USA, 1971

Ransom V.H., Trapp J.A., "The Relap 5 choked flow model and application to a large scale flow test", EG&G Idaho Inc., ASME, Saratoga, USA, 1980

Lee D H, Swinerton D. Evaluation of critical flow for supercritical steam-water. EPRI-NP-3086, Final report, USA, 1983

Mignot G, Anderson M, Corradini M. Initial Study of Supercritical Fluid Blowdown, Fusion Science and Technology, 47:3, 574-578, USA, 2007

Critical Flow Experiment And Analysis For Supercritical Fluid, Guillaume Mignot, Mark Anderson And Michael Corradini, Nuclear Engineering and Engineering Physics Department, University of Wisconsin, 1500 engineering Drive, Madison, WI, 53706 USA, 2007

Experimental study of critical flow of water at supercritical pressure, Y Chen, C Yang, S Zhang, M Zhao, K Du - Frontiers of Energy, 2009

The SCDAP/RELAP5-3D© Code Development Team. SCDAP/RELAP5-3D© code manual. INEEL/EXT-02/00589, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, May 2002 ( <http://www.inel.gov/relap5>).

Надійшла 11.04.2021

Received 11.04.2021



# ЛІБЕРАЛІЗОВАНІ РИНКИ ЕНЕРГІЇ LIBERALIZED ENERGY MARKETS

УДК 621.311:681.3

І.В. Блінов, д-р. техн. наук, ORCID 0000-0001-8010-5301

Є.В. Парус, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-9087-3902

Інститут електродинаміки НАН України,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

В.О. Мірошник, мол. наук. співроб., ORCID 0000-0001-9036-7268

П.В. Шиманюк, асп., ORCID 0000-0002-7585-7493

В.В. Сичова, асп., ORCID 0000-0001-7385-1680

Інститут електродинаміки НАН України

## МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ДОЦІЛЬНОСТІ ПЕРЕХОДУ ПРОМИСЛОВИХ СПОЖИВАЧІВ ДО ПОГОДИННОГО ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА РОЗДРІБНОМУ РИНКУ

*Розглянуто основні відмінності у ціно- та тарифоутворенні для промислових споживачів електричної енергії з різними формами обліку електричної енергії. Розглянуто відносний добовий профіль електроспоживання з метою дослідження впливу особливостей добового графіка навантаження на середньозважену за добу ринкову вартість електричної енергії. Обґрунтовано важливість оцінки вартості профілів добового навантаження під час порівняння вартості електричної енергії для споживача у групі з інтегральним обліком електричної енергії та в умовах індивідуального погодинного її обліку. Теоретично обґрунтовано ефект заниження обсягів і вартості небалансів у групі з інтегральним обліком електричної енергії у порівнянні з погодинними нарахуваннями обсягів і вартості небалансів. Означено основні складові для порівняльної оцінки доцільності виходу споживача із групи з інтегральним обліком електричної енергії та переходу на погодинний її облік за індивідуальним добовим графіком навантаження. Основні підходи до такої оцінки продемонстровано на прикладі розрахунків для промислового підприємства в окремих регіонах України. Бібл. 14, рис. 3.*

**Ключові слова:** ринок електричної енергії, споживання електричної енергії, короткострокове прогнозування, комерційний облік, електричні мережі, профіль навантаження

**Вступ.** Впровадження у липні 2019 року нової моделі ринку електроенергії [1] супроводжувалося як появою нових ринкових сегментів [2], так і появою нових учасників ринку. При цьому відбулися суттєві зміни у правилах відносин між учасниками ринку та принципах ціноутворення для всіх учасників ринку [3, 4, 5], передусім – для кінцевого споживача [6], що працює на роздрібному ринку електричної енергії [7, 8]. Нова модель ринку електричної енергії надала споживачу право зміни постачальника електроенергії та можливість безпосередньої закупівлі електроенергії у ринкових сегментах [1, 2]. Відповідно для споживачів електроенергії набули актуальності питання вибору оптимальної моделі закупівлі електроенергії. Вирішення такої задачі безпосереднім порівнянням різних варіантів закупівлі електроенергії ускладнене внаслідок функціонування в оптовій частині ринку електроенергії кількох сегментів з різними принципами участі і різними правилами ціноутворення, а у роздрібній частині – постачальників із різними підходами до тарифоутворення для споживачів. Таким чином, для споживача електроенергії у загальному випадку існують сотні варіантів закупівлі електроенергії, для безпосереднього порівняння яких необхідно здійснити значний обсяг розрахунків.

У таких умовах споживачу електроенергії більш доцільно використовувати окремі закономірності у правилах і моделях ціноутворення для оцінки доцільності впровадження окремих змін до існуючої моделі постачання електроенергії, наприклад: порівняння комерційних пропозицій постачальників електроенергії, доцільність переходу з категорії «Б» (без погодинного обліку електричної енергії) до категорії «А» (з погодинним обліком електричної енергії) [9], доцільність самостійної участі в організованих сегментах та інші питання зміни складових схеми участі на ринку електроенергії України.

**Мета та завдання.** Публікація присвячена висвітленню особливостей рішення задачі оцінки доці -

льності переходу споживача зі моделі споживання без погодинного обліку електроенергії до моделі із погодинним обліком електроенергії та опису практичної методики розв'язання поставленої задачі, розробленої за результатами дослідження нормативно-правової бази, теоретичних досліджень моделей ціноутворення та досвіду практичних розрахунків для споживачів електроенергії.

**Матеріал і результати досліджень.** Різні підходи до ціно- та тарифоутворення постачальників електроенергії використовують однакові складові вартості 1 кВт·год для кінцевого споживача (рисунок 1).



Рисунок 1 – Основні складові вартості електроенергії для кінцевого споживача

Замовлені споживачем обсяги електроенергії постачальник купує на оптовому ринку. В загальному випадку ринок двосторонніх договорів використовується для закупівлі базових обсягів електроенергії на довгостроковий термін (на місяць чи більше). Вартість закупленої у цьому сегменті електроенергії визначається договором між покупцем та продавцем з деяким врахуванням прогнозу цін у інших ринкових сегментах.

Ринок «на добу наперед» (РДН) [3] надає торгову площадку для закупівлі погодинних обсягів електроенергії на добу постачання. Ціна купівлі/продажу електроенергії у цьому ринковому сегменті визначається балансом між попитом та пропозицією електроенергії на кожну годину доби постачання [10]. Відповідно ціна закупівлі електроенергії формується окремо для кожної години постачання. Насьогодні процеси ціноутворення в сегменті РДН справляють важливий вплив на вартість електроенергії в Україні [11] і тому сегмент РДН необхідно враховувати при рішенні всіх задач вибору оптимальної моделі закупівлі електроенергії для споживача. Ціна, що складається на РДН, є основою для розрахунків цін та тарифів для споживачів електричної енергії.

Внутрішньодобовий ринок [3] реалізує механізм безперервних торгів для продажу надлишків чи закупівлі додаткових обсягів електроенергії на окрему годину постачання за уточненим прогнозом. З огляду на невеликі обсяги торгів у цьому ринковому сегменті (менше 1-5% від загальних обсягів торгів на оптовому ринку), вплив процесів ціноутворення у сегменті внутрішньодобового ринку допустимо не враховувати для переважної більшості розрахунків вартості електроенергії для кінцевого споживача.

Балансуючий ринок (БР) реалізує функції зведення балансу між виробництвом та споживанням електроенергії [12]. Вартість наданих Оператору системи передачі послуг з балансування електроенергії відшкодовують учасники ринку (сторони відповідальні за небаланс), які допустили небаланси між обсягами закупленої/проданої у ринкових сегментах та фактично спожитої/виробленої електроенергії. Обсяги допущених відхилень для учасників ринку електроенергії визначається за даними АСКОВЕ [9] на кожну розрахункову годину, а ціна відшкодування – виходячи із вартості наданих у цю годину послуг балансування [2]. Хоча нарахування відшкодування вартості допущених небалансів реалізується вже за фактом виробництва/споживання електроенергії на розрахункову годину доби, в практичних розрахунках зручно умовно відносити функцію фінансового врегулювання небалансів до сегменту БР, де формується ціна небалансів.

Вартість доставки електричної енергії фактично спожитих обсягів електроенергії по магістральних електричних мережах та по системах розподілу розраховується за встановленими НКРЕКП тарифами на передачу (Оператору системи передачі) і на розподіл (Оператору системи розподілу) електроенергії. Ці складові вартості електроенергії фіксуються Регулятором на тривалий термін (до півроку) і при порівнянні різних моделей закупівлі споживачем електроенергії за критерієм вартості 1 кВт·год можуть не враховуватися.

Безвідносно принципів ціноутворення різних постачальників для споживачів в Україні функціонують дві основні схеми обліку електроенергії [9]:

- споживачі з погодинним обліком електроенергії (споживачі категорії «А»);
- споживачі з обліком електроенергії за розрахунковий місяць (споживачі категорії «Б»).

У сегменті роздрібного ринку електроенергії України постачальники пропонують пропозиції з постачання електроенергії за різними умовами тарифоутворення. Проте, як показав огляд комерційних пропозицій постачальників, в умовах однакового графіка платежів за спожиту електроенергію, формули тарифоутворення для споживачів категорій «А» та «Б» є схожими з точки зору маржі постачальника. Тому, при рішенні задачі оцінки доцільності переходу споживача на погодинний облік електроенергії за критерієм вартості 1 кВт·год складові маржі постачальника допустимо не враховувати.

Таким чином, визначальними факторами для розв'язання задачі оцінки доцільності переходу споживача на погодинний облік електроенергії є вартість погодинних обсягів електроенергії та погодинна вартість небалансів електроенергії з урахуванням особливостей обліку електроенергії та розрахунків цих складових для споживачів з погодинним та без погодинного обліку електроенергії.

#### **Альтернативні схеми комерційного обліку електроенергії в Україні.**

Споживачі з погодинним обліком електроенергії самостійно визначають прогнозовані погодинні графіки навантаження протягом доби. Постачальник електроенергії купує замовлені погодинні обсяги електроенергії (у сегменті двосторонніх договорів та/або на РДН). Щогодинні відхилення фактичних обсягів споживання електроенергії від замовлених фіксуються як допущені споживачем погодинні небаланси. Нарахування платежів за допущені небаланси здійснюється за наведеною в Правилах ринку [2] формулою, якою враховується: сформовані на відповідну годину доби ціни у сегментах РДН і БР, обсяг допущеного споживачем небалансу та відношення напрямків небалансів (дефіцит чи профіцит замовлених обсягів) у споживача і у торговій зоні ринку електроенергії України, до якої віднесено цього споживача. Як видно, за схеми погодинного обліку електроенергії споживач самостійно прогнозує власне погодинне електроспоживання та несе повну фінансову відповідальність за помилки у прогнозуванні. Зазвичай споживачі з погодинним обліком електроенергії самостійно несуть фінансові витрати на встановлення та обслуговування системи погодинного обліку електроенергії. У цьому випадку вартість встановлення та витрати на обслуговування такої системи слід привести до одиниці спожитої електроенергії за нормативний строк експлуатації системи. Розраховане значення використовується як надбавка до вартості 1 кВт·год електроенергії для варіанта з погодинним її обліком.

Для споживачів без засобів погодинного обліку неможливо зафіксувати фактичні погодинні обсяги споживання електроенергії. Тому постачальник електроенергії використовує надані Оператором системи розподілу погодинні значення навантаження для групи таких споживачів в межах однієї площадки вимірювання АСКОЕ та розраховує фактичну вартість електроенергії для таких споживачів пропорційно фактично спожитим ними (по даним лічильників) за розрахунковий місяць обсягам електроенергії. Статистика погодинного навантаження для групи споживачів без засобів погодинного обліку електроенергії також використовується постачальником для прогнозу та закупівлі погодинних обсягів електроенергії з урахуванням замовлених цими споживачами на новий розрахунковий місяць обсягів електроенергії. Відповідно при нарахуваннях фактичної вартості електроенергії для кожного такого споживача постачальник розподіляє сумарну за місяць вартість погодинних обсягів електроенергії та сумарну за місяць вартість погодинних небалансів між споживачами в межах площадки вимірювання АСКОЕ пропорційно фактично спожитим цими споживачами протягом розрахункового місяця обсягам електроенергії. Деяка індивідуалізація вартості небалансів між замовленими та фактично спожитими протягом розрахункового місяця обсягами електроенергії застосовується постачальниками у формі штрафних нарахувань за значні (більше 5% чи 10%) відхилення у цих складових. Як буде показано далі, такі нарахування не узгоджуються із обсягами погодинних небалансів. Тому при рішенні задачі оцінки доцільності переходу споживача на погодинний облік електроенергії обсяги штрафних нарахувань варто враховувати виключно за наявності у споживача регулярних штрафних платежів у формі розрахованої за статистичними даними додаткової надбавки до вартості 1 кВт·год протягом розрахункового періоду не менше місяця. Таким чином, рішення задачі оцінки доцільності переходу споживача на погодинний облік електроенергії реалізується порівнянням вартості погодинних обсягів електроенергії у сегменті РДН та вартості небалансів в обох порівнюваних варіантах на розрахунковий період з урахуванням приведених до 1 кВт·год фактично спожитої електроенергії витрат на засоби погодинного обліку електроенергії.

**Порівняння вартості добового профіля навантаження.** Сегмент РДН в Україні наразі відіграє визначальну роль у формуванні ринкової вартості електроенергії як складової вартості електроенергії для кінцевого споживача. Тому механізми ціноутворення та основні тренди у цьому ринковому сегменті потребують детального аналізу передусім в частині їх впливу на вартість електроенергії для споживачів з погодинним обліком електроенергії та споживачів без погодинного обліку електроенергії.

В основі функцій РДН покладено апарат двостороннього аукціону [10] з граничною моделлю ціноутворення, призначений для узгодження попиту та пропозиції електроенергії на окрему годину постачання. Відповідно для кожної години доби постачання формується окрема ціна купівлі електроенергії. Як правило, ціна електроенергії у сегменті РДН найнижча у нічні години доби і найвища у години піку навантаження. В результаті на вартість 1 кВт·год електроенергії для споживача суттєво впливають відношення погодинних обсягів електроенергії у нічні та денні години доби.

Для прикладу середньозважена ціна покриття навантаження ОЕС України за погодинними цінами РДН на добу постачання 4 грудня 2020 року склала 1557 €/МВт·год. На цю ж добу постачання середньозважена ціна покриття навантаження споживачів категорії «Б» для групи споживачів без погодинного обліку електричної енергії у Житомирській області склала 1611 €/МВт·год.

Для виділення причин такої різниці середньозважених цін введемо поняття відносного добового профілю електроспоживання, як добового графіка погодинних відносних відхилень в обсягах споживання електроенергії по відношенню до «базисного» (мінімального протягом доби) обсягу електроспоживання:

$$\delta V_t = \frac{V_t}{\min(V_t \subset D)} \quad \forall t = \{1..24\} \in D$$

Порівняння відносних профілів споживання електроенергії для ОЕС України та профілю споживачів категорії «Б» у Житомирській області відображено на рисунку 2.

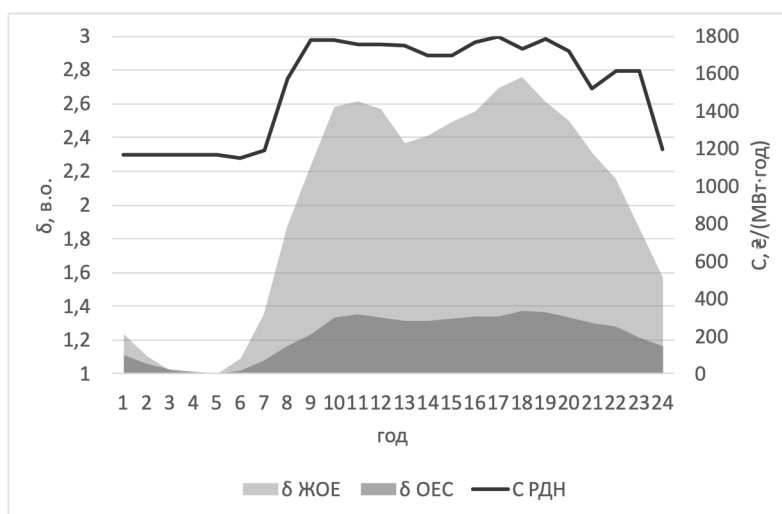


Рисунок 2 – Порівняння відносних профілів електроспоживання ОЕС України ( $\delta$  ОЕС) та споживачів категорії «Б» у Житомирській області ( $\delta$  ЖОЕ) на фоні погодинних граничних цін РДН ( $C$  РДН) для доби постачання 04.12.2020.

Як видно з рисунку 2, профіль споживачів категорії «Б» у Житомирській області має суттєво більше відхилення від базису переважно в денні години доби, коли вартість електроенергії найвища. Тому в цілому за добу для цієї групи споживачів формується більш висока середньозважена ціна купівлі електроенергії. Для порівняння, за відсутності відхилень від базисного значення обсягів закупівлі електроенергії (тобто, закупівлі однакових обсягів електроенергії в усі години доби) середньозважена ціна електроенергії на добу постачання 04.12.2020р. склала б 1531 €/МВт·год.

Значення середньозваженої вартості 1 МВт·год електроенергії відіграє основну роль у процесі оцінки доцільності виходу із групи споживачів без погодинного обліку електроенергії та закупівлі електроенергії за власним графіком електроспоживання. Ціни на РДН публікуються для відкритого доступу на офіційному сайті Оператора ринку. Статистика погодинних графіків споживання для групи споживачів без погодинного обліку електроенергії надається Оператором системи розподілу за запитом споживача. Статистичну інформацію щодо навантаження споживачів без погодинного обліку електроенергії окремо по кожному оператору системи розподілу публікує на офіційному сайті Оператора системи передачі. Тому на етапі попередньої оцінки не складно порівняти значення середньозваженої ціни на електроенергію за профілем споживачів категорії «Б» та за власним погодинним графіком електроспоживання. Для остаточного прийняття рішення необхідно використовувати статистику цін та обсягів електроспоживання за розрахунковий період не менше одного місяця.

**Особливості врахування обсягів небалансів.** Як зазначалося вище, споживач із погодинним обліком електроенергії самостійно прогнозує погодинний графік навантаження і несе повну фінансову відповідальність за допущені погодинні небаланси між прогнозним та фактичним значеннями погодинного

навантаження. Група споживачів без погодинного обліку електроенергії несе солідарну відповідальність за допущені постачальником неточності прогнозу агрегованого графіка навантаження. При цьому принцип розрахунку для таких споживачів обсягів небалансів (різниця між замовленими та фактично спожитими за місяць обсягами електроенергії) не корелюється із нарахованим Адміністратором розрахунків сумарним значенням погодинних небалансів. Крім того, невідповідність між відхиленнями фактично спожитих за місяць обсягів електроенергії від замовлених для кожного споживача та погодинними відхиленнями фактично спожитих групою споживачів обсягів електроенергії від прогнозованих та викуплених постачальником обсягів призводить до завищення вартості небалансів зокрема, та ринкової складової вартості електроенергії для цих споживачів загалом.

Розглянемо детальніше суть цих невідповідностей. Так в моделі закупівлі електроенергії у постачальника у групі без погодинного обліку електроенергії споживач здійснює прогноз обсягів  $V_{\Sigma(m)}^{(s)}$  електроспоживання на розрахунковий місяць  $m$  в цілому. Постачальник протягом розрахункового місяця  $m$  здійснює закупівлю погодинних  $h$  обсягів електроенергії за деяким агрегованим прогнозом для групи споживачів без погодинного обліку електроенергії в межах загальної площадки вимірювання оператора системи розподілу, в якому прогнозований обсяг  $V_{(h)}^{(s)}$  навантаження кожного окремого споживача електроенергії на кожен окрему годину  $h$  приблизно корелюється із замовленим цим споживачем обсягом на місяць в цілому:

$$\sum_{h \in m} V_{(h)}^{(s)} \cong V_{\Sigma(m)}^{(s)}.$$

Незважаючи на потребу формування погодинних прогнозів для купівлі електроенергії у сегменті РДН [13], для групи споживачів без погодинного обліку електроенергії вартість спожитої за місяць  $m$  електроенергії розраховується виходячи із замовленого на місяць обсягу електроенергії  $V_{\Sigma(m)}^{(s)}$  та приводиться до сумарного фактично спожитого за місяць обсягу електроенергії  $V_{\Sigma(m)}^{(f)}$ . Відносна похибка прогнозу електроспоживання у цьому випадку розраховується як:

$$\delta_{(m)}^{(B)} = \frac{|V_{\Sigma(m)}^{(s)} - V_{\Sigma(m)}^{(f)}|}{V_{\Sigma(m)}^{(f)}} \cdot 100\%$$

Виразимо сумарні обсяги за місяць відповідними сумами їх погодинних значень:

$$\delta_{(m)}^{(B)} = \frac{|\sum_h V_{(h)}^{(s)} - \sum_h V_{(h)}^{(f)}|}{\sum_h V_{(h)}^{(f)}} \cdot 100\%$$

Очевидно, що формула розрахунку похибки сумарного прогнозу  $\delta_{(m)}^{(B)}$  за розрахунковий місяць  $m$  для групи споживачів без погодинного обліку електроенергії характеризується ефектом компенсації умовних погодинних похибок прогнозу  $\delta_{(h)}^{(B)}$ . Дійсно, умовні погодинні відхилення фактичного споживання електроенергії  $V_{(h)}^{(f)}$  від прогнозного  $V_{(h)}^{(s)}$  «вгору»  $(V_{(h)}^{(s)} - V_{(h)}^{(f)}) > 0$  та «вниз»  $(V_{(h)}^{(s)} - V_{(h)}^{(f)}) < 0$  значень взаємно компенсуються, зменшуючи при цьому значення чисельника в розрахунках  $\delta_{(m)}^{(B)}$ . Тому в моделі закупівлі електроенергії для споживачів категорії «Б» завжди:

$$\delta_{(m)}^{(B)} < \sum_{h \in m} \delta_{(h)}^{(B)} \quad \forall m$$

Погодинна закупівля постачальником електроенергії та погодинний розрахунок небалансів вимагають розраховувати вартість електроенергії за місяць як суму погодинних значень. Тому для постачальника електроенергії в цих умовах формула розрахунку середньої погодинної за місяць  $m$  похибки прогнозування  $\delta_{(m)}^{(A)}$  набуває вигляду:

$$\delta_{(m)}^{(A)} = \frac{1}{\text{count}(h \in m)} \sum_{h \in m} \frac{|V_{(h)}^{(s)} - V_{(h)}^{(f)}|}{V_{(h)}^{(f)}} = \frac{1}{\text{count}(h \in m)} \sum_{h \in m} \delta_{(h)}^{(A)}$$

де:  $\text{count}(h \in m)$  – кількість один  $h$  у розрахунковому місяці  $m$ .

Очевидно, формула розрахунку  $\delta_{(m)}^{(A)}$  має накопичувальний характер: ненульові погодинні відхилення фактичного споживання електроенергії від її прогнозного значення за окрему годину  $h$  сумуються за модулем незалежно від характеру похибки («вниз» чи «вгору»). За умови єдиного підходу до прогнозування обсягів споживання електроенергії маємо:

$$\text{якщо } \delta_{(h)}^{(B)} \equiv \delta_{(h)}^{(A)}, \text{ то } \delta_{(m)}^{(B)} < \delta_{(m)}^{(A)} \quad \forall m.$$

Таким чином, за однакового підходу до прогнозування, в моделях закупівлі електроенергії з погодинним її обліком (розрахунки постачальника в організованих ринкових сегментах) сумарне значення похибки прогнозу за розрахунковий місяць завжди буде більшим, ніж відповідне значення відхилень між замовленими та фактично спожитими обсягами електроенергії у споживачів без погодинного обліку електроенергії (розрахунки між постачальником та споживачами). Збільшене значення похибки прогнозу за розрахунковий місяць означає більшу різницю між значеннями закупленої в сегменті РДН та фактично спожитої електроенергії, що безумовно збільшуватиме значення ринкової складової вартості електроенергії.

### Порівняльні складові моделі розрахунку доцільності переходу на погодинний облік електроенергії.

Оцінка доцільності переходу споживача від постачання електроенергії для групи без погодинного обліку електроенергії до постачання за індивідуальним графіком із погодинним обліком електроенергії здійснюється порівнянням складових вартості 1 кВт·год без визначених вище складових, які при порівнянні компенсуються чи не справляють суттєвого впливу на результат порівняння. Визначимо моделі розрахунків таких складових.

Для споживача із погодинним обліком електроенергії порівняльна вартість 1 кВт·год електроенергії за розрахунковий місяць  $m$  розраховується як:

$$C_{(m)}^{P(A)} = C_{(m)}^{(PДН)} + T_{уч} + \frac{T_{тор}}{1000} + C_{(m)}^{(BP)} + C_{(m)}^{(СПО)} [\text{€}/(\text{кВт} \cdot \text{год})],$$

де:  $C_{(m)}^{(PДН)}$  – середньозважена вартість 1 кВт·год закуплених у сегменті РДН протягом місяця  $m$  погодинних обсягів електроенергії, €/(кВт·год);  $T_{уч}$  – тариф Оператора ринку за участь в торгових сесіях на РДН і ВДР, €/(міс.);  $T_{тор}$  – тариф Оператора ринку за купівлю/продаж електроенергії в торгових сесіях на РДН і ВДР, €/(МВт·год);  $C_{(m)}^{(BP)}$  – приведена до 1 кВт·год фактично спожитої за розрахунковий місяць  $m$  електроенергії вартість нарахованих Адміністратором розрахунків погодинних небалансів протягом цього місяця;  $C_{(m)}^{(СПО)}$  – витрати на встановлення та обслуговування системи погодинного обліку електроенергії, приведені до 1 кВт·год спожитої електроенергії протягом нормативного строку експлуатації такої системи.

Середньозважена вартість закупленої протягом розрахункового місяця  $m$  у сегменті РДН електроенергії розраховується як:

$$C_{(m)}^{(PДН)} = \frac{\sum_{h \in m} (V_{(h)}^{(np)} \cdot C_{(h)}^{(PДН)})}{1000 \cdot \sum_{h \in m} V_{(h)}^{(\phi)}} [\text{€}/(\text{кВт} \cdot \text{год})],$$

де:  $V_{(h)}^{(np)}$  – прогнозовані на годину постачання  $h$  обсяги споживання електроенергії, кВт·год;  $C_{(h)}^{(PДН)}$  – гранична ціна в сегменті РДН для години постачання  $h$ , €/(МВт·год);  $V_{(h)}^{(\phi)}$  – обсяг фактично спожитої у розрахункову годину  $h$  електроенергії, кВт·год.

Очевидно при рішенні задачі оцінки доцільності переходу на погодинний облік електроенергії необхідно додатково виконати імітацію рішення задачі прогнозу погодинного навантаження [13-15]. За відсутності вже встановлених засобів прогнозування допустимо використати метод «наївного» прогнозу. З огляду на потребу подання на торги РДН добового графіка погодинного попиту, за цим методом прогнозоване значення споживання електроенергії на розрахункову годину  $h$  прирівнюється значенню фактичного споживання за 72 години до зазначеної години постачання  $h$  (тобто  $h - 72$ ) в умовах закупівлі електроенергії у постачальника, чи за 48 годин до зазначеної години постачання  $h$  (тобто  $h - 48$ ) в умовах самостійної закупівлі електроенергії на РДН.

Платежі за погодинні небаланси електроенергії за розрахунковий місяць передбачають [2] формулу ціноутворення, яка залежить від напрямку небалансу (дефіцит чи профіцит закупленого на розрахункову годину  $h$  обсягу електроенергії). Виходячи із припущення про рівномірний розподіл ймовірності напрямку погодинного небалансу, в оціночних розрахунках враховуємо середнє арифметичне вартостей небалансів для обох випадків:

$$C_{(m)}^{(BP)} = \frac{\sum_{h \in m} \left( |V_{(h)}^{(np)} - V_{(h)}^{(\phi)}| \cdot \left( \min(C_{(h)}^{(PДН)}, IMSP_{(h)}) \cdot 0,95 + \max(C_{(h)}^{(PДН)}, IMSP_{(h)}) \cdot 1,05 \right) \right)}{2000 \cdot \sum_{h \in m} V_{(h)}^{(\phi)}},$$

де:  $IMSP_{(h)}$  – ціна врегулювання небалансів на розрахункову годину  $h$ , €/(МВт·год).

Постачальники електроенергії не розкривають алгоритми розподілу між споживачами групи без погодинного обліку електроенергії складових вартості електроенергії. Тому неможливо за оприлюдненими постачальником статистичними даними виділити окремо складові вартості закупівлі електроенергії та нарахованої вартості небалансів. Якщо перехід на погодинний облік електроенергії відбувається без зміни

постачальника, то за статистикою нарахувань постачальником фактичної вартості електроенергії за розрахунковий місяць можливо виділити «ринкову складову тарифу» шляхом вилучення із значення фактичного тарифу складових доставки електроенергії та маржі постачальника. Аналіз моделей тарифоутворення різних постачальників електроенергії виходить за межі тематики даної публікації. Для означення розрахункових моделей наведемо формулу розрахунку порівняльної вартості електроенергії для споживача без погодинного обліку електроенергії, яка враховує особливості тарифоутворення у переважній більшості постачальників в Україні:

$$C_{(m)}^{P(B)} = \frac{(T_{(m)}^{(\Phi)} - (T_{\text{ОСП}} + T_{\text{ОСР}}^{(\text{СТ})}) \cdot (K_{\text{ПОСТ}}^{\text{PP}(1)} + 1) - T_{\text{ПОСТ}}^{\text{PP}})}{K_{\text{ПОСТ}}^{\text{PP}(2)}}$$

де:  $T_{(m)}^{(\Phi)}$  – фактичний тариф на електроенергію за розрахунковий місяць  $m$ ,  $\text{€}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ ;  $T_{\text{ОСП}}$  – тариф Оператора системи передачі,  $\text{€}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ ;  $T_{\text{ОСР}}^{(\text{СТ})}$  – тариф оператора систем розподілу, якщо споживач самостійно здійснює розрахунки за розподіл електроенергії, то  $T_{\text{ОСР}}^{(\text{СТ})} = 0$ ,  $\text{€}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ ;  $K_{\text{ПОСТ}}^{\text{PP}(1)}$  – множник маржі постачальника, який охоплює вартість доставки електроенергії, безрозмірна величина;  $T_{\text{ПОСТ}}^{\text{PP}}$  – адитивна складова маржі постачальника,  $\text{€}/(\text{кВт}\cdot\text{год})$ ;  $K_{\text{ПОСТ}}^{\text{PP}(2)}$  – множник маржі постачальника, який не охоплює вартість доставки електроенергії, безрозмірна величина.

Умова прийняття рішення про доцільність переходу на погодинний облік електроенергії наступна:

$$\begin{cases} C_{(m)}^{P(A)} < C_{(m)}^{P(B)} : \text{доцільно перейти на погодинний облік електроенергії;} \\ C_{(m)}^{P(A)} > C_{(m)}^{P(B)} : \text{не доцільно переходити на погодинний облік електроенергії;} \end{cases}$$

### Приклад порівняльного аналізу.

Розглянемо приклад оцінки економічного ефекту від переведення наукової промислового споживача (м. Київ) з інтегральним обліком електричної енергії за розрахунковий місяць (категорія «Б») на погодинний облік спожитої електричної енергії (категорія «А»). Розрахунки виконуються використанням відкритої статистичної інформації про ціни і тарифи на ринку електричної енергії України за 5 квітня 2021 року. Графіки прогнозованих та фактичних погодинних обсягів електроспоживання підприємства наведені на рисунку 3.

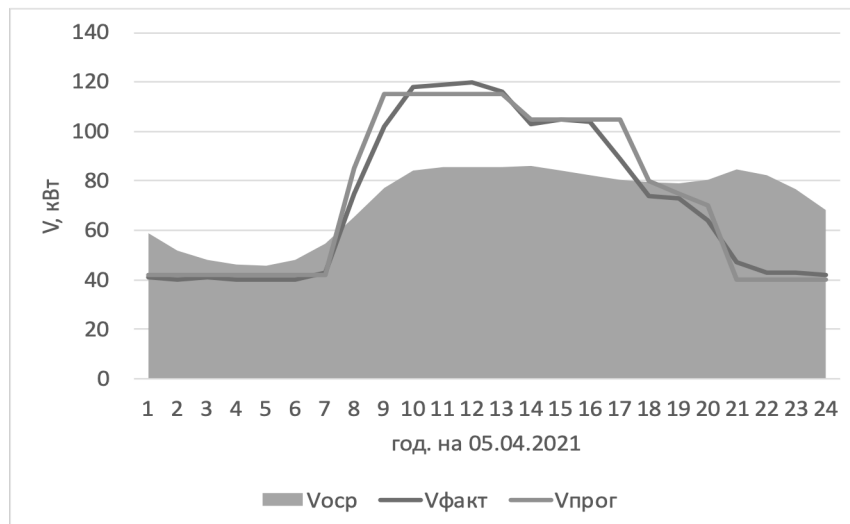


Рисунок 3 – Порівняння графіків добового прогнозованого ( $V_{\text{прог}}$ ) і фактичного ( $V_{\text{факт}}$ ) електроспоживання наукової установи у м. Києві з добовим розподілом електроспоживання споживачів категорії «Б» мережі ПрАТ "ДТЕК Київські Електромережі" на 05.04.2021.

Сумарний за добу фактичний обсяг електроспоживання електричної енергії підприємством 5 квітня 2021 року склав  $V_{(д)}^{(\Phi)} = 1722$  кВт·год. Даний добовий обсяг спожитої електричної енергії використаний при побудові погодинного профіля навантаження споживачів з інтегральним обліком електричної енергії (категорія «Б») на розрахункову добу в мережі ПрАТ "ДТЕК Київські Електромережі" за оприлюдненою на офіційному сайті ДП НЕК «Укренерго» статистичною інформацією. Розрахований профіль групи споживачів категорії «Б» відображений на рисунку 3 суцільною штриховкою. Рівність добових обсягів індивідуального графіка електроспоживання підприємства та інтегрального профіля споживачів категорії

«Б» дозволила отримати відношення, еквівалентні наведеним на рисунку 2 відносним профілям електроспоживання.

Як видно на рисунку 3, індивідуальний відносний профіль електроспоживання підприємства має суттєво більше відхилення від базису в години денного максимуму, що призводитиме до отримання більш високої вартості електричної енергії для обліку за індивідуальним графіком. Завищення вартості електроенергії для індивідуального графіка електроспоживання компенсується меншим відхиленням від базису у вечірні години доби, тому для оцінки вартості порівнюваних профілів електроспоживання необхідно виконати чисельні розрахунки.

За оприлюдненою на офіційному сайті ДП «Оператор ринку» статистикою погодинних граничних цін на РДН розраховуємо вартість електричної енергії для порівнюваних профілів електроспоживання. Для індивідуального профіля фактичного електроспоживання добова вартість електричної енергії склала  $Cost_{(РДН)}^{(інд)} = 2211$  ₴. Для профіля групи споживачів категорії «Б» добова вартість електричної енергії склала  $Cost_{(РДН)}^{(гр)} = 2297$  ₴. Як видно, індивідуальний відносний профіль електроспоживання на 3,9% дешевший за профіль групи споживачів категорії «Б».

Фактичний тариф постачальника електроенергії за квітень 2011 року без ПДВ склав  $T_{(m)}^{(ф)} = 1,8614$  ₴/(кВт·год). До цього тарифу включено ринкову вартість електричної енергії (вартість закупівлі електричної енергії на РДН і сума нарахованих небалансів), тариф оператора системи передачі  $T_{осп} = 0,29393$  ₴/(кВт·год) та маржу постачальника  $T_{пост}^{PP} = 0,11$  ₴/(кВт·год).

В даному прикладі змодельовано фактичний тариф на розрахункову добу для варіанта погодинного обліку електроенергії (споживач категорії «А») за формулою:

$$C_{(A)}^{P(A)} = \frac{\sum_{h=1}^{24} \left( \left( C_{(h)}^{(РДН)} + T_{тор} \right) \cdot V_{(h)}^{(np)} - \Delta V_{(h)}^{(+)} \cdot C_{(h)}^{(BP+)} + \Delta V_{(h)}^{(-)} \cdot C_{(h)}^{(BP-)} \right)}{\sum_{h=1}^{24} V_{(h)}^{(ф)}} + T_{осп} + T_{пост}^{PP}$$

де:  $C_{(h)}^{(РДН)}$  – погодинні граничні ціни на РДН;  $\Delta V_{(h)}^{(+)}$ ,  $C_{(h)}^{(BP+)}$  – відповідно обсяг і фактична ціна позитивного погодинного небалансу;  $\Delta V_{(h)}^{(-)}$ ,  $C_{(h)}^{(BP-)}$  – відповідно обсяг і фактична ціна негативного погодинного небалансу.

За результатами розрахунків отримуємо:  $C_{(A)}^{P(A)} = 1,75$  ₴/(кВт·год), що на 6,3% менше за тариф за інтегральним обліком електричної енергії у групі споживачів категорії «Б».

Слід зауважити, що у наведеному прикладі виконано розрахунки лише для однієї доби постачання. Для прийняття рішення про перехід підприємства на погодинний облік електроенергії слід здійснити порівняння з урахуванням сезонних факторів (тобто виконати розрахунки середньозважених за рік тарифів) та вартості засобів погодинного обліку електричної енергії.

**Висновки.** За результатами аналізу схеми тарифоутворення для кінцевого споживача електроенергії виділені складові, які справляють помітний вплив на результати рішення задачі оцінки доцільності переходу споживача на погодинний облік електроенергії. До таких складових віднесені вартість закупівлі електроенергії у сегменті РДН та вартість нарахованих небалансів. Показано, що інші складові тарифоутворення скорочуються при порівняльних розрахунках, або їх вплив не справляє помітного впливу на результат рішення задачі. Відзначено важливість врахування при порівнянні вартості встановлення та обслуговування засобів погодинного обліку електроенергії. Розроблено математичні моделі для порівняльних розрахунків, використання яких дозволяє прийняти економічно обґрунтоване рішення про доцільність виходу споживача із групи без погодинного обліку електроенергії до моделі закупівлі електричної енергії з погодинним її обліком, що підтверджено виконання практичних розрахунків.

#### Список використаної літератури

1. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 №2019-VIII.
2. Постанова НКРЕКП «Про затвердження Правил ринку» №307 від 14.03.2018 .
3. Постанова НКРЕКП «Про затвердження правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку» №308 від 14.03.2018
4. Zamulko A.; Veremiichuk Y; Mahnitko A. Assessment of potential electricity demand aggregation at Ukrainian electricity market //IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). 2020. DOI: 10.1109/ESS50319.2020.9160194
5. Іванов Г.А., Блінов І.В., Парус Є.В. Комплексна розрахункова модель ринку на добу наперед та балансуєного ринку електроенергії України // *Промелектро*. 2016. № 4-5. С. 8–12.
6. Ivanov H., Blinov I., Parus Y. Simulation Model of New Electricity Market in Ukraine. In: Proc. IEEE 6th Int. Conf. Energy Smart Systems. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764184>



7. Постанова НКРЕКП «Про затвердження правил роздрібного ринку електричної енергії» №312 від 14.03.2018.
8. Іванов Г.А. Особливості моделювання лібералізованого роздрібного ринку електричної енергії України // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2017. № 3. С. 7-13.
9. Постанова НКРЕКП «Про затвердження Кодексу комерційного обліку електричної енергії» № 311 від 14.03.2018.
10. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В. Визначення результатів аукціону з купівлі-продажу електричної енергії// Проблеми загальної енергетики. 2010. № 3. С. 5–12.
11. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Іванов Г.А. Імітаційна модель ринку електричної енергії «на добу наперед» з неявним урахуванням мережевих обмежень енергетичних систем. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 60–67.
12. Блінов І.В. Проблеми функціонування та розвитку ринку електричної енергії України. (за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 3 лютого 2021 р.). Вісник НАН України. 2021. № 3. С. 20-28
13. Блінов І.В., Мірошник В.О., Шиманюк П.В. Короткостроковий інтервальний прогноз сумарного відпуску електроенергії виробниками з відновлювальних джерел енергії. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 54: С. 5–12.
14. Черненко П., Сичова В. 2021. Удосконалення алгоритму визначення впливу температури повітря на сумарне електричне навантаження енергосистеми для підвищення точності короткострокового прогнозування/Технічна електродинаміка. 2021. №2, С. 77-83.
15. Hong T. Crystal Ball Lessons in Predictive Analytics. *EnergyBiz*, vol.12, issue 2, 2015, p.35-37

**I. Blinov**, Dr. Eng. Sc., **ORCID** 0000-0001-8010-5301  
**E. Parus**, Cand. Sc. (Eng.), **ORCID** 0000-0001-9087-3902  
**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**  
**V. Miroschnyk**, JRF, **ORCID** 0000-0001-9036-7268  
**P. Shymaniuk**, Ph.D student, **ORCID** 0000-0002-7585-7493  
**V. Sychova**, Ph.D student, **ORCID** 0000-0001-7385-1680  
**Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine**

## **MODEL OF EVALUATION THE FEASIBILITY OF INDUSTRIAL CUSTOMERS TO HOURLY ACCOUNTING OF RETAIL ELECTRICITY MARKET**

*The main differences in pricing and tariffing for industrial consumers of electricity with different forms of electricity metering are considered. Based on the analysis of tariff formation for the final consumer of electricity, components are identified that have a significant impact on the results of solving the problem of assessing the feasibility of the consumer's transition to hourly electricity metering. Such components include the cost of purchasing electricity in the market segment "day ahead" and the cost of accrued imbalances. The relative daily profile of electricity consumption is considered in order to study the influence of the features of the daily load schedule on the weighted average daily market price of electricity. The importance of estimating the cost of daily load profiles when comparing the cost of electricity for the consumer in the group with integrated electricity metering and in terms of individual hourly metering is substantiated. The effect of underestimation of volumes and value of imbalances in the group with integrated electricity metering in comparison with hourly accruals of volumes and value of imbalances is theoretically substantiated. The main components for comparative assessment of the expediency of the consumer's exit from the group with integrated metering of electricity and the transition to its hourly metering according to the individual daily load schedule are identified. Mathematical models for comparative calculations are developed. The use of these models allows to make an economically justified decision on the expediency of the consumer leaving the group without hourly metering of electricity to the model of purchasing electricity with hourly metering. The main approaches to such an assessment are demonstrated on the example of calculations for an industrial enterprise in some regions of Ukraine. Bibl. 15, fig. 3.*

**Keywords:** electricity market, electricity consumption, short-term forecasting, commercial accounting, electrical networks, load profile

### **REFERENCES**

1. On Electricity Market: The Law of Ukraine. No. 2019-VIII of 13.04.2017.
2. NEURC's Resolution "On Approval of Market Rules" No. 307 dd 14. 03.2018

3. NEURC's Resolution "On Approval of Day Ahead Market and intraday market" No. 308 dd 14. 03.2018
4. Zamulko A.; Veremiichuk Y; Mahnitko A. Assessment of potential electricity demand aggregation at Ukrainian electricity market //IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). 2020. DOI: [10.1109/ESS50319.2020.9160194](https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160194)
5. Ivanov H.A. Blinov I.V., Parus Ye.V. Integrated calculation model of the day-ahead market and balancing electricity market of Ukraine // Promelectro. 2016. No. 4-5. P.8-12.)
6. Ivanov H., Blinov I., Parus Y. Simulation Model of New Electricity Market in Ukraine. In: Proc. IEEE 6th Int. Conf. Energy Smart Systems. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764184>
7. NEURC's Resolution "On Approval of Retail Market Rules" No. 312 dd 14. 03.2018
8. Ivanov H.A. Determination of requirements for modeling of the liberalized retail electricity market of Ukraine// Energy: Economics, Technology, Ecology. 2017. No 3. P.32-33.
9. NEURC's Resolution "On Approval of the Commercial Electricity Metering Code" No. 311 dd 14.03.2018
10. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В. Визначення результатів аукціону з купівлі-продажу електричної енергії// Проблеми загальної енергетики. 2010. № 3. С. 5–12.
11. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus Ye.V., Ivanov H.A. Simulation model of day ahead market with implicit consideration of power systems network constraints. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. (5): 60–67. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.060>
12. Blinov I.V. Problems of functioning and development of a new electricity market model in Ukraine (According to the scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, February 3, 2021)// *Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr.* 2021. No 3. Pp. 20-28.(Ukr) DOI: [doi.org/10.15407/visn2021.03.020](https://doi.org/10.15407/visn2021.03.020)
13. Blinov I., Miroshnyk V., Shymaniuk P. Short-term interval forecast of total electricity generation by renewable energy sources producers. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2019. No.54 P. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.005>
14. P.O. Chernenko, V.V. Sychova. 2021. Improving the algorithm for determining the effect of air temperature on the overall electrical load of the power system to improve the accuracy of short-term forecasting//*Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. №2, pp. 77-83.
15. Hong T. Crystal Ball Lessons in Predictive Analytics. *EnergyBiz*, vol.12, issue 2, 2015, p.35-37

Надійшла 17.04.2021  
Received 17.04.2021

А.І. Замулко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-8018-6332  
О.С. Іщенко, аспірантка, ORCID 0000-0003-3315-4842  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського"

## ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТАРИФІВ НА ПЕРЕРИВАННЯ В УМОВАХ РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ УКРАЇНИ

*Використання графіків відключення обмеження споживачів від електроенергії для зменшення навантаження ОЕС України є застарілою моделлю і не може відповідати нормам та вимогам нової моделі ринку електричної енергії України. Вивчення бажань та потреб споживачів є досить перспективним напрямом у підвищенні ефективності функціонування механізму балансування на ринку електроенергії та є важливим фактором при розрахунку тарифів на переривання. У даній роботі для мінімізації витрат через переривання електроенергії у споживача розглянуто створення гібридного економетричного підходу, який об'єднує переваги і дозволяє мінімізувати недоліки двох моделей: популярної моделі опитування споживачів та економетричної моделі. Економетрична модель, яка використовує додану вартість, створену групою споживачів за рік, є практичним способом оцінки витрат на заплановані відключення. Метод опитування споживачів є найпопулярнішим інструментом для оцінки надійності в умовах ринку електричної енергії. У роботі пропонується використовувати загальнодоступні дані споживачів зібраних за допомогою простого опитування споживачів щодо їх дії у разі небажаних перебоїв з подачі електричної енергії з урахуванням специфіки їх роботи. Варто зазначити, що дане дослідження фокусується на сценарії переривання, який призведе до найбільших витрат при відключенні, воно охоплює лише зимові відключення після обіду та виключає вплив різниці часу доби та сезону.*

**Ключові слова:** обмеження споживачів електричної енергії, вартість переривання для споживача, тарифи на переривання, економетрична модель, опитування споживачів, гібридна модель.

**Вступ.** Закон України «Про ринок електричної енергії» поставив питання перегляду ряду нормативних документів з організації обмеження споживачів на роздрібному ринку електричної енергії. Для керування безпекою постачання електричної енергії і мінімізації відключень електроенергії у споживачів на роздрібному ринку існує необхідність узгодження принципів і інструментів для організації такої роботи на ринку.

Відсутність ефективного впровадження механізму балансування на ринку електричної енергії України створює всі умови для ймовірних відключень електроенергії у споживачів, що в свою чергу може принести значні економічні збитки всім учасникам ринку.

Низький рівень інтеграції ОЕС України з енергосистемами інших країн створює умови, в яких залучення можливостей споживачів щодо керування своїм електроспоживанням зможе істотно вплинути на вирішення питання забезпечення надійності електропостачання споживачів і стабільної роботи енергосистеми в цілому.

Необхідність забезпечення балансу між побажаннями споживачів електричної енергії та можливостями суб'єктів електроенергетики є досить перспективним напрямом у підвищенні ефективності функціонування та удосконалення механізму балансування на ринку електроенергії та є важливим фактором при розрахунку тарифів на переривання.

**Мета роботи:** підвищення ефективності функціонування механізму балансування на ринку електричної енергії України шляхом залучення можливостей тарифних систем.

### **Матеріал і результати досліджень**

**Аналіз ситуації з ймовірними відключеннями споживачів електричної енергії.** Відсутність палива на станціях, незбалансованість планування енергоспоживання і проведення ремонтів негативно впливають на надійність і безперебійність електропостачання [1]. До визначальних ризиків, усунення або мінімізація яких має бути реалізована на ринку електричної енергії можна віднести:

- збільшення імпоротної залежності від постачання вугілля та газу на виробництво електричної енергії - являє собою політичний, екологічний і соціальний ризик з високою ймовірністю настання і несе в собі значні наслідки.

-розвиток генеруючих потужностей (будівництво нових та /або реконструкція діючих) з необхідними за критеріями операційної безпеки характеристиками – являє собою технологічний ризик з високою ймовірністю настання і несе в собі критичні наслідки.

-недофінансування в розвиток електричних мереж через недостатній обсяг інвестицій.

-зниження рівня технічного та оперативного обслуговування електричних мереж.

Удосконалення методів та моделей для розрахунку обмежень цін може призвести до посилення конкуренції та інновацій на балансуєчому ринку.

#### **Графіки обмеження споживачів електричної енергії.**

У попередній моделі ринку електричної енергії для зменшення дефіциту потужності було обрано графіки обмеження та аварійного відключення споживачів. Ці неринкові механізми обмеження споживачів електричної енергії є застарілим варіантом і не мають місця впровадженій новій моделі ринку електроенергії України [8]. Згідно Закону [9] для забезпечення безпеки постачання електричної енергії учасники ринку повинні планувати і вживати заходів відповідно до Правил про безпеку постачання електричної енергії.

Принципово вимогою Закону [9] є необхідність забезпечення балансу між побажаннями споживачів та можливостями суб'єктів електроенергетики, зокрема в частині, забезпечення надійного постачання електричної енергії. Тому важливим є :

- 1) розробка системи показників для оцінки надійності електропостачання;
- 2) встановлення відповідальності суб'єктів електроенергетики та споживачів за зниження рівня надійності постачання електричної енергії;
- 3) встановлення відповідності плати за електричну енергію з нормованим рівнем надійності з її фактичним рівнем.

Все це є досить перспективним напрямом у підвищенні ефективності функціонування та удосконалення механізму балансування на ринку електроенергії та є важливим фактором при розрахунку тарифів на переривання.

**Використання фінської моделі в умовах ринку електричної енергії України.** У цій роботі використані результати опитування споживачів для оцінки витрат на переривання споживача (ВПС) від електроенергії, проведене у Фінляндії [10]. Поєднання результатів цього опитування з аналітичними методами, представляє більш об'єктивну, просту у здійсненні та оцінці та більш надійну гібридну методологію. Використання даного методу в українських реаліях дозволить знайти підхід до споживача шляхом виявлення специфіки і потреб кожного. Рухаючись від часткового до загального – від виявлення потреб окремого споживача в окремій галузі можна зробити припущення, що у більшості випадків поведінка схожих за параметрами споживачів у даній галузі може бути схожа, отже і гібридна модель може стати універсальною для галузі в цілому.

Існує дві ситуації, коли проводиться оцінка витрат на переривання споживача. Перша ситуація - методологія збору необхідних вхідних даних та відповідних інструментів для оцінок та пропозицій щодо економічної доцільності ВПС. Коли обрано відповідний інструмент для збору даних, виникає наступний момент. Як необроблені дані можна і потрібно інтерпретувати, щоб отримати якомога прозоріші результати, це є другою фазою повного та надійного аналізу ВПС.

#### **Підходи до аналізу витрат на переривання споживача.**

Будучи популярною сферою інтересів, існує багато запропонованих методологій оцінки ВПС. У звіті робочої групи CIGRE за 2001 р. вони згруповані як непрямі аналітичні методи, опитування споживачів [11].

#### **Непрямі аналітичні методи**

Ключова ідея цього підходу полягає у використанні загальнодоступних та об'єктивних даних для вивчення ВПС представлених у табл.1 [12–14].

Таблиця 1 – Дані для вивчення ВПС

Валовий внутрішній продукт (ВВП)	Річне споживання енергії	Досягнута пікова потужність	Оборот або створена додана вартість у країні, регіоні чи групі споживачів
----------------------------------	--------------------------	-----------------------------	---

Цей метод може бути вигідним з точки зору простоти і вимагає набагато менше використаних періодів для дослідження, дешевший та найголовніше, що даний метод призводить до об'єктивних оцінок у порівнянні з іншими. Наприклад, визначення функції збитків для споживачів (ФЗС) шляхом ділення ВВП на річне споживання енергії в країні дає приблизне уявлення про грошові втрати, зазанані цією країною протягом певного періоду часу. Тим не менше, запропоновані витрати споживача за допомогою цього методу дають середні результати, оскільки всі сегменти споживачів з чіткими характеристиками

споживання електроенергії аналізуються разом. Через це аналітичні методи не завжди доцільно використовувати для обробки даних.

### Опитування споживачів

Найбільш поширений інструмент для оцінки витрат на відключення [15–23]. В опитуваннях споживачів основною задачею є якомога найкраще оцінити свої збитки. Цей підхід є досить специфічним для споживача, але вважається об'єктивнішим за інші. Розробляючи гіпотетичні сценарії відключень за допомогою ретельно підготовленої анкети, споживачу пропонується оцінити економічні збитки, що були зазначені протягом заздалегідь визначеного сценарію. Існує три основних способи збору даних. Перший - це метод готовності прийняти (ГП). ГП споживач має визначити суму компенсації, яку він/вона готовий прийняти, щоб зазнати гіпотетичного відключення. Інший - метод готовності платити (ГПл). Тут, щоб уникнути певного відключення, споживач визначає суму грошей, яку він/вона готовий заплатити. Теоретично об'єктивна оцінка результатів ГП та ГПл очікується однаковою. Економічна цінність певного переривання в певному середовищі повинна бути унікальною за своєю природою, оскільки, наприклад, вартість одного конкретного зіпсованого матеріалу однакова, і вона повинна бути незалежною від того, хто оцінює витрати. Тим не менше, опитування споживачів [24] показують, що між показниками ГП та ГПл існує значний розрив. Це цілком очікувана ситуація, коли враховується поведінкова упередженість споживача. Можна очікувати, що хтось схильний перебільшувати свої втрати, і він/вона готовий вимагати вищої компенсації у випадку тієї ж ситуації, тоді як інший у такій же ситуації готовий платити набагато менше, щоб уникнути цього. Цей феномен робить довіру до цих методів досить низькою. Однак, встановлюючи нижчі та вищі межі очікуваних витрат на відключення, це цінний інструмент для досліджень ГП та ГПл [24]. Третім і останнім способом збирання даних для опитування споживачів є підхід прямої вартості (ПВ). За допомогою підходу ПВ споживача безпосередньо просять надати відповіді з приводу економічної цінності окремих сценаріїв відключення. Безпосередня оцінка економічних збитків зменшує упередження, які можуть виникнути. Тому цей прийом вважається більш надійним у порівнянні з першими двома. Однак існує наступні проблеми - проблема нульових відповідей та стратегічних реакцій є критичним моментом для дослідження.

Ретельно розроблена анкета опитування споживачів є першою умовою надійного дослідження ВПС. Існує багато факторів, що визначають економічні збитки, пов'язані з перебоями. Сюди входять тривалість і частота відключення електроенергії, сезон, в якому спостерігається переривання (влітку чи взимку), час виникнення (під час або поза робочим часом) та характер відключення (попередньо повідомляється про несподіване відключення або це заплановане відключення). В опитуванні споживачів респондентам пропонувалося передбачити свої збитки у випадку різних сценаріїв відключення, які відрізняються від факторів, наведених вище. Загалом було опитано більше двохсот споживачів комерційного сектору, що дало близько 55% відповідей.

Анкета для сектору послуг (представлена у табл.2) включає низку запитань для кожного споживача.

Таблиця 2 - Анкета з запитаннями для споживача сектору послуг

1.	Щорічне споживання енергії (кВт*год)			
2.	Оборот на рік (€)			
3.	Додана вартість у розрахунку на рік (€)			
4.	Доходи та витрати на рік (€)			
	4.1 прибуток	4.2 зарплата	4.3 матеріал	4.4 витрати
	4.5 амортизаційні відрах. та ін. витр.			
5.	Оцінка витрат на 1, 4 та 8 год несподіваних відключень протягом (€) робочої години			
	1 година	4 години	8 годин	
6.	Оцінка витрат на 1, 4 та 8 год несподіваних відключень на вулиці у робочі години (€)			
	1 година	4 години	8 годин	
7.	Оцінка витрат на 1 та 8 год запланованих відключень під час робочих годин (€)			
	1 година	8 годин		
8.	Оцінка витрат на 1 та 8 год запланованих відключень поза робочих годин (€)			
	1 година	8 годин		
9.	Оцінка витрат на 1, 4 та 8 год несподіваних відключень у літній період (€)			
	1 година	4 години	8 годин	
10.	Оцінка витрат на 1, 4 та 8 год несподіваних відключень у зимовий період (€)			
	1 година	4 години	8 годин	
11.	Оцінка витрат на 1 та 8 год запланованих відключень влітку (€)			
	1 година	8 годин		
12.	Оцінка витрат на 1 та 8 год запланованих відключень взимку (€)			
	1 година	8 годин		

У літературі більшість досліджень використовують секторні функції пошкодження споживачів (СФПС), класифікуючи споживачів за галузями промисловості, сфери послуг (або комерції), житла, сільського господарства тощо [25-29]. СФПС створюється шляхом усереднення даних про витрати на відключення, зібраних за допомогою опитувань споживачів, а потім нормалізації величини або середньорічним споживанням енергії, або середнім піковим запитом на енергію тієї ж групи споживачів. При створенні унікальних СФПС кінцевою метою є отримання конкретних результатів оцінки замовника. Однак серед тих самих секторів існують сегменти споживачів, які мають абсолютно різні характеристики використання електроенергії з досить чіткими наслідками можливих сценаріїв відключення. Ось чому застосування інструменту СФПС може дати досить об'єктивні розрахунки. Щоб отримати більш конкретні оцінки споживачів, у цьому опитуванні споживачі сектору послуг у Фінляндії були розділені на підгалузі загальної торгівлі, універмагу, іншої роздрібною торгівлі, готелів, ресторанів, спорту, охорони здоров'я та інших. Дотримуючись цієї логіки, протягом процесу аналізу були визначені та використані функції пошкодження споживачів підсектора (СФПС). У цьому дослідженні нормалізуючими факторами впливу на щорічне споживання енергії споживачами були обрані наступні СФПС:

$$\text{ВПС}_o = \frac{\text{РО}}{\text{РС}}, \quad [\text{€/кВт} \cdot \text{год}] \quad (1)$$

де, РО – річний оборот споживача за t год, РС – річне споживання електроенергії споживачем.

$$\text{ВПС}_{\text{дв}} = \frac{\text{РДВ}}{\text{РС}}, \quad [\text{€/кВт} \cdot \text{год}] \quad (2)$$

де, РДВ – річна додана вартість замовника за t год, РС - річне споживання електроенергії споживачем.

$$\text{ВПС}_{\text{зв}} = \frac{\text{ПВЗВ}}{\text{РС}}, \quad [\text{€/кВт} \cdot \text{год}] \quad (3)$$

де, ПВЗВ – повідомлена вартість замовнику для запланованого відключення протягом t год, РС - річне споживання електроенергії споживачем.

$$\text{ВПС}_{\text{нв}} = \frac{\text{ПВНВ}}{\text{РС}}, \quad [\text{€/кВт} \cdot \text{год}] \quad (4)$$

де, ПВНВ – повідомлена вартість замовнику за несподіване відключення протягом t год, РС - річне споживання електроенергії споживачем.

Непрямий аналітичний підхід застосовує ФЗС, збираючи всі підгалузі споживачів в одну групу. У цій роботі було проаналізовано конкретного споживача, і отримані в результаті СФПС ( $\text{ВПС}_t$  та ) називаються функціями економічної моделі пошкодження.

У процесі нормалізації витрат на відключення річний робочий час для споживачів сфери послуг був обраний 3000 годин [30]. Для кожного підгалузі споживачів було проведено аналіз оцінки ВПС.

У цій роботі обробляється та аналізується лише один сценарій, що показує результати при відключенні електричної енергії. Географічне положення Фінляндії характеризується холодним кліматом і м'яким літом. Це призводить до меншого використання кондиціонерів у літній період у порівнянні з іншими країнами, де піки споживання електроенергії спостерігаються влітку. Отже, кращим сценарієм відключення є повідомлення про заплановані відключення взимку в робочий час, що відповідає перервам влітку вдень для більшості інших країн.

Перейдемо до другого етапу. Як коротко зазначалося раніше, існують певні занепокоєння та невизначеності щодо методу опитування споживачів. Найбільш тривіальним є підготовленість респондентів. Енергоємні споживачі частіше всього наймають кваліфікований персонал, який знає про залежність бізнесу від електроенергії та про можливі економічні наслідки потенційних перебоїв з подачі електричної енергії. Хоча точне прогнозування збитків неможливе, ці фахівці можуть інформувати про наслідки відключення електроенергії з більшою достовірністю. Однак, більшість споживачів є споживачами середнього та низького рівня за рівнем споживання електричної енергії. Чи достатньо кваліфіковані дані споживача, щоб повністю усвідомити економічні наслідки перебоїв в електромережі? Звичайно це сумнівно. Крім того, деякі респонденти визначають збитки як нульові лише для того, щоб якомога швидше заповнити анкету, хоча відомо, що в разі запропонованих гіпотетичних сценаріїв відключення має бути принаймні якась економічна втрата. Знову ж опитування показують, що деякі респонденти приводять невинувато високі грошові показники, щоб виразити свої збитки. Ці відповіді називаються та групуються як нульові відповіді та екстремальні відповідно. Іншим важливим моментом опитування є проблема стратегічного реагування. Під час опитування деякі респонденти можуть давати

навмисно неправильні відповіді, щоб вплинути та змінити результати опитування. Ці відповіді називаються стратегічними відповідями, і вони становлять значну загрозу загальній надійності досліджень. І нарешті, ще одним недоліком опитування споживачів є тенденція до перебільшення витрат. Це викликає підозру, що значна сума звітних витрат може бути вищою, ніж є насправді. Усі ці спостереження викликають критику щодо методології опитування споживачів, яка є вкрай суб'єктивною, і, таким чином, дає непереконливі результати для оцінки ВПС.

Для вирішення проблеми нульових відповідей та екстремальних реакцій набори даних повинні бути оброблені, щоб небажані та ненадійні точки даних були видалені. Для досягнення цієї мети існує безліч статистичних інструментів, які підходять для цього завдання. Для простоти, було використано стандартний тест на z-оцінку, щоб усунути нульові та екстремальні реакції. При стандартному нормальному розподілі 99,7% значень даних потраплять в межах 3 стандартних відхилень середнього значення в будь-якому напрямку. Коли z-оцінка обрана як 2,0, відсоток необроблених даних падає до 95%. Для того, щоб усунути як незначні, так і крайні випадки, у цьому дослідженні z-оцінка обрана рівною 2,0 для обробки необроблених наборів даних. Однак одна перешкода виникає при перевірці гістограми зібраних даних. Як видно з Рис. 1, гістограма відповідей опитування споживачів є досить перекошеною. Застосування методу усунення для обробки розподілу відповідей, який є неправильним, призведе до обробки занадто багатьох точок даних, більшість з яких мають відношення до процесу аналізу. Щоб подолати цю проблему, до набору даних застосовано наступну процедуру. Оскільки стандартний бальний тест має значення, коли його застосовують до нормального розподілу, перш за все набір даних перетворено у натуральні значення логарифму. При перевірці (Рис. 2.) видно, що гістограма натуральних логарифмів приблизно відповідає нормальному розподілу, що забезпечує здоровий процес елімінації з набору даних. Після встановлення z-оцінки на 2,0, відхилення були виявлені та піддані обробці. Нарешті, решта точок даних були перетворені назад до нормальних значень.

### Гібридна модель

Після ретельного скорочення проблема нульових та екстремальних реакцій була вирішена. Однак суперечка зі стратегічними відповідями все ще зберігається. Стратегічні відповіді, що лежать в необробленій області розподілу даних, не можуть бути усунені за допомогою статистичних інструментів. Фінське дослідження пропонує три різні підходи (найбільший ефект у середньому методі, метод найменших і найбільших грошових значень та найменший і найбільший метод ВПС / L-вартості) для подолання проблеми стратегічного реагування [31]. Інше дослідження, проведене в США, використовує регресію Тобіту для отримання більш надійних оцінок [32]. Насправді неможливо сказати, чи є відповідь стратегічною, якщо вона не виявляється як відхилення в процесі обробки. Цей факт створює загрозу для надійності та об'єктивності результатів досліджень споживачів. Використання даного методу є доцільним в умовах України, але слід ретельно підійти до побудови методології, яка використовуватиме опитування споживачів, а потім поєднає висновки цих опитувань з аналітичними даними для отримання гібридної моделі. Кінцевою метою є отримання оцінок, які буде легко розрахувати та які враховуватимуть відповіді споживача за допомогою загальнодоступних, об'єктивних та вільних даних. Щоб встановити зв'язок між аналітичними даними та оцінками ВПС, від споживачів сектору послуг було зібрано наступну статистику.

Доходи та витрати споживачів сфери послуг були згруповані та зведені на рис. 1. Коли розглядаються відображення відключень електроенергії на підприємствах, можна пов'язати витрати та збитки з ВПС за наступною логікою.

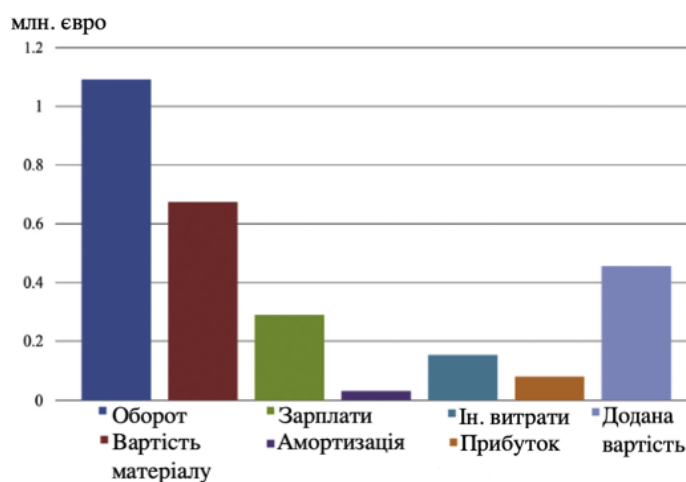


Рис. 1 - Розподіл доходів і витрат споживачів у сфері послуг

У разі перебоїв, коли бізнес не працює належним чином, персонал все одно отримує виплати за робочий час, що можна розцінити як непотрібні витрати. Це означає, що грошові виплати безпосередньо пов'язані з наслідками відключення електроенергії. Крім того, припускаючи, що під час відключення не відбувається продажів, оскільки товари не використовуються та не продаються, матеріальні витрати не мають значення для ВПС. Слід зосередитись на прибутку, а не на витратах на продаж, помітивши, що товари залишаються в бізнесі під час відключення, але прибуток втрачається, оскільки продажів немає. Тоді ВПС можна було б узагальнити як:

$$\text{ВПС} = \text{ВЗ} + \text{П} + \text{ШП} \quad (5)$$

де, ВЗ - Витрати на зарплату, П – Прибуток, ШП - Швидкопсувні (зіпсовані товари та збитки).

Всі витрати розраховуються під час переривання. З іншого боку, відомо, що:

$$\text{О} = \text{ДВ} + \text{МВ} + \text{ІВ} \quad (6)$$

де, О – Оборот, ДВ - Додана вартість, МВ - Матеріальні витрати, ІВ – Інші витрати.

Також,

$$\text{ДВ} = \text{ВЗ} + \text{П} + \text{ЗН} \quad (7)$$

де, ЗН – знос.

Якщо припустити, що сума амортизації незначна, у разі несподіваного відключення можна вивести:

$$\text{ВПС} = \text{ДВ} + \text{ШП} \quad (8)$$

У разі попередньо повідомленого відключення (планового відключення), споживачу дозволяється вживати запобіжних заходів, щоб мінімізувати наслідки переривання. Це означає, що кількість швидкопсувних матеріалів буде незначною. Тому оцінка ВПС для запланованих результатів буде приблизно такою:

$$\text{ВПС} = \text{ДВ} \quad (9)$$

тобто, витрати на відключення дорівнюють втраченій доданій вартості внаслідок перерваної діяльності в проміжку часу відключення.

Гібридний підхід просто використовує непрямі аналітичні методи для підрахунку втрати доданої вартості, а також використовує опитування споживачів, щоб з'ясувати вартість швидкопсувних речовин, яку можна буде побачити під час переривання. Теоретично результати ВПС запропонованої тут гібридної моделі мають бути досить близькими до результатів, отриманих при опитуванні споживачів. Однак насправді через стратегічні відповіді, відповіді невідповідальних споживачів та людський фактор завищення збитків, між гібридними ВПС та ВПС з опитування споживачів буде велика кількість помилок. Це спостереження можна узагальнити як:

$$\text{МОС} = \text{ГМ} + \text{ФСР} \quad (10)$$

де, МОС – модель опитування споживачів, ГМ – гібридна модель, ФСР – фактор стратегічного реагування. просто визначається як різниця між оцінками ВПС опитувань споживачів та розрахунками гібридного підходу. Для запланованих відключень гібридний підхід ВПС дорівнює , а для несподіваних відключень гібридний підхід ВПС дорівнює сумі та нормованої вартості швидкопсувних продуктів.

Для ілюстрації ідеї було розраховано ВПС моделі опитування споживачів (ВПС<sub>зв</sub> та ВПС<sub>нв</sub>) та ВПС економетричної моделі (ВПС<sub>т</sub> та ВПС<sub>дв</sub>) для кожного сегмента споживачів. Результати споживачів оптового продажу показані на рис. 2.

Як видно з рис. 2, спроба оцінити результат за допомогою економетричної моделі, використовуючи показники обороту споживачів, дає неприпустимо високі оцінки. З іншого боку, відповідно до співвідношень (8) - (10), висновки ВПС<sub>дв</sub> економетричної моделі СФПС у порівнянні з результатами опитування споживачів ВПС<sub>зв</sub> та ВПС<sub>нв</sub>. Отже, можна зробити наступні пропозиції:

$$\text{ВПС}_{\text{нв}} = \text{ВПС}_{\text{дв}} + \text{ШП/РС} + \text{ФСР} \quad (11)$$

$$\text{ВПС}_{\text{зв}} = \text{ВПС}_{\text{дв}} + \text{ФСР} \quad (12)$$



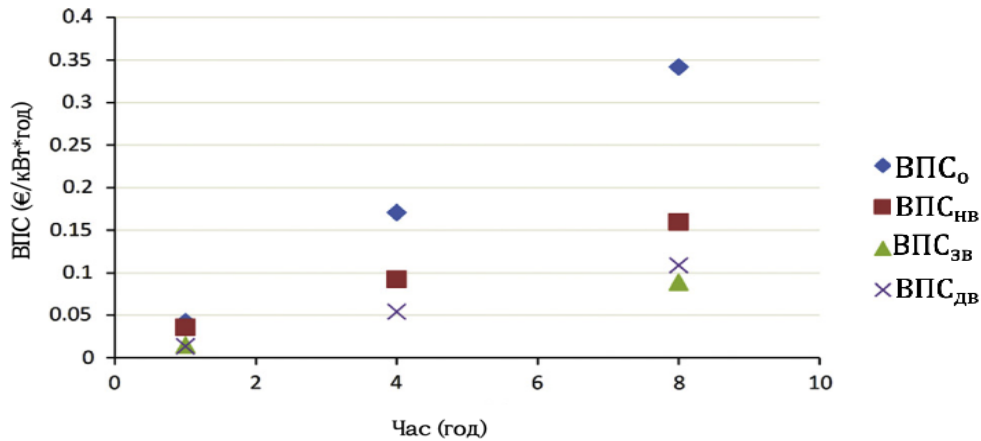


Рис. 2. Результати СФПС для всього сектору продаж споживачів в €/кВт\*год

Можливість застосування гібридної моделі для споживачів необмежена. Але якщо порівняти споживачів сектору послуг і споживачів металургійного сектору, виходячи із специфіки кожного можна найперше зазначити існуючу різницю між товарами. Як наслідок, наприклад кількість швидкопсувних матеріалів у споживачів металургійного сектору буде мінімальною, і можливість переносу споживання електричної енергії з пікових годин у непікові зони більш реальною ситуацією. Тобто, дана модель дозволяє отримати специфічну інформацію яка стосується не лише даного споживача але й схожих споживачів даної сфери. Найоптимальніше використання гібридної моделі можливе при об'єднанні інформації щодо можливостей переривання електричної енергії у споживачів в межах однієї галузі.

За допомогою гібридної моделі, яка виграє у порівнянні з економетричним методом та опитуванням споживачів, замість проведення широкого та детального опитування споживачів, що зосереджується лише на економічній вартості зіпсованих матеріалів (швидкопсувних) та збитках, буде достатньо для розрахунку та рекомендації оцінок як для несподіваних, так і для запланованих перебоїв в електроенергії. Таким чином, відповіді на питання анкети буде набагато простіше для споживача, незалежно від того, чи є він/вона відповідальною особою чи ні. Більше того, оскільки вартість зіпсованого або пошкодженого матеріалу добре відома, рівень суб'єктивності у відповідях буде значно низьким. У цьому випадку фактор стратегічного реагування (ФСР) буде мінімальним. Отже, задля зменшення суб'єктивності процесу аналізу та забезпечення об'єктивних оцінок ВПС, тими, хто проводить відповідні дослідження, можна знехтувати значеннями ФСР. Таким чином, з меншими зусиллями та меншими витратами грошей на опитування споживачів, більш об'єктивні та більш конкретні оцінки споживачів будуть досягнуті швидше, ніж звичайні підходи. Узагальнимо:

За несподівані відключення:

$$ВПС_{нв} = ВПС_{дв} + ШП/РС \quad (13)$$

І на заплановані відключення:

$$ВПС_{зв} = ВПС_{дв} \quad (14)$$

Для перевірки теорії для обробки даних споживачів сектору універмагів застосовано регресійний аналіз. У звіті Національної лабораторії Ернеста Орландо Лоуренса Берклі [33] стверджується, що протягом перших 8 годин характеристика ВПС майже лінійна. Це спостереження узгоджується з висновками цієї роботи, тому обрано метод лінійної регресії для оцінок ВПС.

Для більш ретельного процесу дослідження за допомогою регресійного аналізу використовувались дані про відключення за 2 хв і 15 хв. Нехай розраховані лінійні рівняння мають формат  $y = mx + n$ .

Коефіцієнти рівнянь та коефіцієнт визначеності представлені в табл.3.

Таблиця 3 - Коефіцієнти регресії ВПС для споживачів сектору універмагів

	$m$	$n$	$R^2$
СІС <sub>сuo</sub>	0.0031	0.001	0.98
СІС <sub>рo</sub>	0.0025	0.0001	0.99
СІС <sub>va</sub>	0.002	2.00E-18	1

Гібридний підхід, який намагається пов'язати результати опитування споживачів з економетричною моделлю, зазнає невдачі у короткі періоди переривання. Одне з пояснень цього результату може полягати в тому, що споживачі погано усвідомлюють свої економічні втрати у випадку коротких перебоїв, і тому вони повідомляють про значно більші витрати на відключення, ніж це повинно бути для перебоїв, менших за 2 години. Однак, з іншого боку, із збільшенням часу відключення коефіцієнт варіації стабілізується приблизно на 20% та 40% для запланованих та несподіваних сценаріїв відключення відповідно. Відповідно до співвідношення (14) різниця у 20% може бути заявлена як ФСР, що охоплює стратегічні відповіді. Крім того, за співвідношенням (13) розрив між двома лініями визначає вартість швидкокопсувних продуктів. Як можна помітити, через певний час відносна вартість швидкокопсувних виробів дещо зменшується. Це цілком логічно, оскільки відомо, що якщо час переривання живлення стає довшим, споживачі починають вживати запобіжних заходів, щоб зменшити негативні наслідки події. Це сприяє зменшенню збитків та зіпсованих матеріалів. І отже, це закінчується зменшенням витрат на загальні втрати.

### **Висновки**

1. Збільшення імпортової залежності від постачання вугілля та газу на потреби виробництва електричної енергії несе в собі значні ризики для України. У 2019 році частка імпортованого вугілля склала 25,6%, це на 3,4% більше ніж у 2018 році. При цьому з РФ на українські електростанції надійшло 5,31 млн т вугілля (частка — 88,4%), зі США — 693,9 тис. т (11,6%), з ПАР — 0,8 тис. т.

2. Вивчення потреб і бажань споживачів, а також усвідомлення основних механізмів балансування на ринку створить можливості для підвищення ефективності функціонування ринку електричної енергії України.

3. Вивчення оцінки перебоїв в електроенергетичній сфері, оцінки вартості надійності постачання електроенергії та витрати на переривання споживача (ВПС) є важливими і пріоритетними напрямками для вивчення, адже методологія побудови тарифів на ймовірне відключення має повністю базуватися на даних оцінках.

4. Використання гібридного підходу як методу для оцінки ВПС є прозорим, зручним у застосуванні та нарешті недорогим для кожного з учасників ринку електричної енергії: влади, комунальних підприємств та споживачів.

**A. Zamulko**, Cand. Sc., Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0001-8018-6332

**O. Ishchenko**, PhD student, **ORCID** 0000-0003-3315-4842

**National Technical University of Ukraine**  
**«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

## **PECULIARITIES OF USING TARIFFS FOR INTERRUPTION IN THE CONDITIONS OF THE ELECTRICITY MARKET OF UKRAINE**

*The use of schedules to disconnect consumers from electricity to reduce the load on the UES of Ukraine is an outdated model and may not meet the standards and requirements of the new model of the electricity market in Ukraine. The study of consumer desires and needs is a very promising area in improving the efficiency of the balancing mechanism in the electricity market and is an important factor in calculating interruption tariffs. In this paper, to minimize costs due to power outages, the consumer considers the creation of a hybrid econometric approach that combines the advantages and minimizes the disadvantages of two models: the popular consumer survey model and the econometric model. An econometric model that uses the added value created by a group of consumers for the year is a practical way to estimate the cost of planned outages. The method of consumer surveys is the most popular tool for assessing reliability in the electricity market. The paper proposes to use publicly available consumer data collected through a simple survey of consumers about their actions in case of undesirable power outages, taking into account the specifics of their work. It is worth noting that this study focuses on the interruption scenario that will lead to the highest shutdown costs, it covers only winter outages in the afternoon and eliminates the effect of the difference between time of day and season.*

**Keywords:** restrictions on electricity consumers, the cost of interruption for the consumer, interruption tariffs, econometric model, consumer surveys, hybrid model.

### **REFERENCES**

1. Звіт за 2019 рік про результати моніторингу безпеки постачання електричної енергії
2. Report on the results of the National Commission for State Regulation in the Fields of Energy and Utilities in 2019 (hereinafter the NCRECP Reports) (NCRECP Resolution of 27.05.2020 №975);

3. Report on conformity assessment (sufficiency) of generating capacities (hereinafter - the Assessment Report), (resolution of the National Commission for Regulation of Economic Competition dated 13.03.2020 №605);
4. Transmission system development plan for 2020 - 2029, which was approved by the National Commission for Regulation of Economic Competition on March 13, 2020;
5. Report of the National Commission for Electricity Market Regulation on monitoring the functioning of the wholesale electricity market in the IV quarter of 2019;
6. Report of the National Commission for Regulation of Economic Competition on monitoring the functioning of the retail electricity market in the I, II, III, IV quarters of 2019;
7. Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2035 "Security, Energy Efficiency, Competitiveness" (hereinafter - the Energy Strategy), approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 18.08.2017. №605-r.
8. Zamulko A., Veremiichuk Y. Organization of consumer restrictions on retail electricity market: legal issues. Power engineering economics, technique, ecology. 2018. No1. C. 23-32. ISSN 2308-7382 (Print).
9. On the electricity market: Law of Ukraine No. 2019-VIII of April 13, 2017.
10. Silvast A, Heine P, Lehtonen M, Kivikko K, Mäkinen A, Järventausta P. Sähkönjakelun keskeytyksestä aiheutuva haitta (Customer Interruption Costs in Finland). Tampereen teknillinen yliopisto: Teknillinen korkeakoulu; 2005.
11. Billinton JR et al. Methods to consider customer interruption costs in power systems analysis. CIGRE Task Force 2001.
12. Mok YL, Chung TS. Prediction of domestic, industrial and commercial interruption costs by relational approach. In: 1997 Fourth international conference on advances in power system control, operation and management.
13. Choi SB, Kim DK, Jeong SH, Ryu HS. Evaluation of the customer interruption cost taking into consideration macro economic approach in Korea. In: Proc. 2002 international conference on power system technology.
14. Praktiknjo AJ, Hähnel A, Erdmann G. Assessing energy supply security: outage costs in private households. Energy Policy 2011;39(12):7825–33.
15. Tollefson G, Billinton R, Wacker G, Chan E, Aweya J. Canadian customer survey to assess power system reliability worth. IEEE Trans Power Syst 1994;9(1):443–50.
16. Pandey M. Reliability worth assessment in a developing country – commercial and industrial survey results. IEEE Trans Power Syst 1999;14(4):1232–7.
17. Kjølle GH, Samdal K, Singh B, Kvitastein OA. Customer costs related to interruptions and voltage problems: methodology and results. IEEE Trans Power Syst 2008;23(3):1030–8.
18. Herman R, Gaunt CT. Direct and indirect measurement of residential and commercial CIC: preliminary findings from South African Surveys. In: Proc. 2008 of the 10th international conference on probabilistic methods applied to power systems, 2008. pp. 1–7.
19. Chowdhury AA, Mielnik TC, Lawton LE, Sullivan MJ, Katz A, Koval DO. System reliability worth assessment using the customer survey approach. IEEE Trans Ind Appl 2009;45(1):317–22.
20. Baarsma BE, Hop JP. Pricing power outages in the Netherlands. Energy 2009;34(9):1378–86.
21. Kufeoglu S, Lehtonen M. Customer interruption costs estimations for service sectors via customer survey method: a case study. Int Rev Electr Eng 2013;8(5):1532–8.
22. Kufeoglu S, Lehtonen M. A novel hybrid approach to estimate customer interruption costs for industry sectors. Eng, Spec Issue Power Electr Eng 2013;5(10A):34–40.
23. Kufeoglu S, Lehtonen M, Evaluation of power outage costs for industrial sectors in Finland. In: IET Conference Publications, Stockholm, (615 CP), 1044, 10–13 June 2013.
24. Lehtonen M, Lemström B. Comparison of the methods for assessing the customers' outage costs. In: International Conference on Energy Management and Power Delivery, Proceedings of EMPD, 1995.
25. Jonnavithula A, Billinton R. Features that influence composite power system reliability worth assessment. IEEE Trans Power Syst 1997;12(4):1536–41.
26. Sullivan MJ, Mercurio MG, Schellenberg JA, Eto JH. How to estimate the value of service reliability improvements. IEEE Power Energy Soc Gen Meet 2010:1–5.
27. Kjølle GH, Samdal K, Singh B, Kvitastein OA. Customer costs related to interruptions and voltage problems: methodology and results. IEEE Trans Power Syst 2008;23(3):1030–8.
28. Billinton R, Tollefson G, Wacker G. Assessment of electric service reliability worth. In: Third international conference on probabilistic methods applied to electric power systems, 1991.
29. Samdal K, Kjølle GH, Singh B, Kvitastein O. Interruption costs and consumer valuation of reliability of service in a liberalized power market. In: International conference on probabilistic methods applied to power systems, 2006.

30. Lehtonen M, Silvast A, Heine P, Kivikko K, Mäkinen A, Järventausta P. Outage costs in electrical distribution networks – a Finnish study. In: Nordic Distribution and Asset Management Conference NORDAC, Stockholm, 21–22 August 2006.

31. Kivikko K, Makinen A, Jarventausta P, Silvast A, Heine P, Lehtonen M. Comparison of reliability worth analysis methods: data analysis and elimination methods. IET Gener Transm Distrib 2008;2(3):321–9.

32. Sullivan M, Mercurio M, Schellenberg J, Freeman M. Estimated value of service reliability for electric utility customers in the United States. Ernest Orlando Lawrence, Berkeley, CA, USA: Energy Analysis Department; 2009.

33. Kristina Hamachi LaCommare, Joseph H. Eto. Understanding the cost of power interruptions to US electricity consumers. In: Ernest Orlando Lawrence, Berkeley National Laboratory, Environmental Energy Technologies Division, Berkeley, CA, 2004.

Надійшла 20.04.2021

Received 20.04.2021

# МІЖГАЛУЗЕВІ ПРОБЛЕМИ І СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ПАЛИВНО- ЕНЕРГЕТИЧНОМУ СЕКТОРІ CROSS-SECTORAL PROBLEMS AND SYSTEM RESEARCH IN THE FUEL AND ENERGY SECTOR

УДК 621.31:551.58

Б.І. Басок, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8935-4248  
Є.Т. Базєєв, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, ORCID 0000-0003-4292-1505  
Інститут технічної теплофізики НАН України

## ПРОБЛЕМИ ФІЗИКИ ТА ГЕОПОЛІТИКИ В ГЛОБАЛЬНОМУ ПОТЕПЛІННІ

**Вступ.** Глобальне потепління клімату і т. зв. «парниковий ефект» — одна з найбільш обговорюваних проблем фізики та геополітики, яка викликала протестні екологічні рухи в світі.

**Проблематика.** Широко обговорюються як антропогенна (емісія парникових газів в атмосферу), так і природна концепції глобального потепління з драматичними наслідками зміни клімату для планети і окремих її регіонів.

**Мета.** Оцінити стан проблеми, представити результати досліджень і заходи щодо можливого зниження парникового ефекту.

**Матеріали й методи.** Використано авторитетні літературні джерела з аналізом антропогенних і природних факторів глобального потепління, в т. ч. з поясненням фізичних процесів, що проявляються при сонячно-геомагнітній активності.

**Результати.** Визначено шляхи та напрямки підвищення ефективності використання енергоресурсів по зниженню емісії парникових газів.

**Висновки.** Найбільший потенціал підвищення енергоефективності використання енергоресурсів, і тим самим зниження емісії парникових газів, знаходиться в сфері теплопостачання житлово-муніципальної сфери країни. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою і реалізацією організаційно-економічних і технологічних інновацій в цьому секторі енергетики.

**Ключові слова:** антропогенний вплив, глобальне потепління, енергоефективність, зміна клімату, парниковий газ.

**Вступ.** До проблем сучасного світу - нерівності між багатими і бідними країнами, перенаселенню, виснаженню природних ресурсів - додалася і проблема глобального потепління. Останню тісно пов'язують з антропогенним впливом сфери енергетики на клімат.

Енергетика, як одна з галузей економіки та життєзабезпечення, була і залишається базовою основою розвитку суспільства. Зі збільшенням чисельності населення планети зростає і споживання енергоресурсів. Одночасно перетворення енергоресурсів в різні, зручні для використання види енергоносіїв, не обходиться без негативних наслідків для навколишнього середовища. З'являється ряд проблем планетарного масштабу з тривожними прогнозами. До однієї з них, що викликають підвищений інтерес протягом останніх десятиліть, було віднесено помітну зміну клімату, і зокрема, інструментальню виявлене глобальне потепління, що стало предметом наукових та соціально-громадських дискусій і обговорень на ряді міжнародних форумів в рамках Міжнародної програми з екології [1].

**Проблематика.** З середини ХХ століття помітно посилюється тренд підвищення глобальної приземної температури (рис. 1) - одного з показників кліматичної системи Землі. Наведені на рис. 1 прогнози моделі RCP, що лежать в основі висновків Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК, останній звіт 2014 р.), представляють фізично обґрунтований діапазон можливих зростань глобальної температури протягом наступних кількох десятиліть. Це явище (глобальне потепління) було пояснено посиленням пар –

© Б.І. Басок, Є.Т. Базєєв, 2021

никового ефекту внаслідок підвищення в атмосфері Землі концентрації так званих парникових газів, що викликають такий ефект (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> і ін., рис. 2, [2]). Виявлений зв'язок між підвищенням концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері і зростанням глобальної температури став предметом розгляду вищезазначених ініціатив з аналізу клімату. З'явилися численні публікації в ЗМІ та наукових виданнях з викладом необоротних драматичних для планети і її окремих районів наслідків:

- підйом рівня світового океану внаслідок танення льодовиків, що призведе до затоплення низинних просторів територій ряду прибережних і острівних країн, підвищенню кислотності океанів;
  - порушення біологічної різноманітності: деякі види тварин і рослин не зможуть пристосуватися до нових умов і можуть зникнути, що в свою чергу може викликати зниження врожайності ряду сільськогосподарських культур;
  - нестача питної води, міграція комах і як наслідок поширення епідемій (лихоманка, малярія);
  - зміна клімату ускладнить доступ до водних і продовольчих ресурсів, що може привести до загострення міждержавних відносин;
  - збільшення витрат енергії на кондиціонування в містах.
- Знаходяться і позитивні ефекти глобального потепління:
- скоротиться опалювальний сезон - знизиться витрата енергоресурсів;
  - північний кордон землеробства пересунеться в більш високі широти;
  - потепління в Арктиці полегшить судноплавство і освоєння родовищ вуглеводневих ресурсів на морському шельфі.

Програми адаптації та боротьби з глобальним потеплінням, обговорення систем торгівлі квотами на викиди парникових газів породжують в суспільстві тривоги, протести «зелених» і впливають на світову і регіональну політику і, безумовно, економіку.

Глобальне потепління і клімат як такий стали розглядатися як проблема фізики та геополітики. Організація Об'єднаних Націй, наукові інституції та спільноти виступили з низкою ініціатив з проблеми клімату:

- 1979 р. Перша всесвітня конференція з питань клімату;
- 1988 р. Резолюція ГА ООН № 43/53 закликає до «... охорони глобального клімату в інтересах нинішнього і майбутнього поколінь людства». Створення МГЕЗК з метою збору і оцінки наукової інформації про клімат;
- 1990 р. Перша оціночна доповідь МГЕЗК. Резолюція ГА ООН № 45/212 з закликом до розробки і підписання Глобального договору в сфері клімату;
- 1992 р. На Саміті Землі прийнята Рамкова Конвенція ООН про зміну клімату (РКЗК ООН) - вступила в силу у 1994 році;
- 1997 р. Підписано Кіотський протокол (додаток до РКЗК ООН) з кількісними національними зобов'язаннями щодо зниження викидів - в дії з 2004 року (перша фаза 2008-2012 рр. і друга фаза - до 2017 року);
- 2015 р. Паризька конференція - нова угода по спільним зусиллям щодо стримування кліматичних змін і зростання температури.

**Мета.** Ні Кіотський протокол, ні Паризькі угоди не обійшлися без розбіжностей між учасниками цих кліматичних самітів. Країни мають різні можливості розвитку своїх економік, що не дозволяє пред'являти до них однакові вимоги. Країни, що розвиваються вважають, що головну відповідальність за зміну клімату повинні нести розвинені країни - вони є головними продуцентами парникових газів. Країни з багатими родовищами традиційних вуглеводнів, які порівняно легко добуваються, насторожено сприймають заклики до скорочення викидів парникових газів і переходу до відновлюваних джерел енергії.

Сучасний погляд на глобальне потепління зводиться до наступних положень:

1. Основна причина глобального потепління - монотонне зростання концентрації парникових газів (в основному вуглекислого газу) в атмосфері Землі.
2. Тренд підвищення концентрації парникових газів визначається збільшенням їх антропогенної емісії при спалюванні вуглеводневих енергоресурсів.
3. Глобальне потепління загрожувє негативними наслідками для навколишнього середовища і економіки.
4. Необхідно вдосконалювати політику скорочення антропогенної емісії парникових газів.

Для прогнозів глобальної зміни клімату в даний час в якості наукової бази використовуються результати наукових досліджень Міжурядової групи експертів з проблеми зміни клімату (МГЕЗК), створеної в 1988 році Міжнародною метеорологічною організацією і ООН (в групу входило близько 2500 дослідників і експертів з усього світу). Починаючи з 1990 року, МГЕЗК періодично готує наукові оглядові доповіді з прогнозами оцінок зростання концентрації діоксиду вуглецю в атмосфері і збільшення

глобальної температури до кінця XXI століття. Опубліковані доповіді 1990, 1995, 2001, 2007, 2014 років. В кінці 2019 року на кліматичному саміті ООН були представлені чергові матеріали по сучасному стану і проблемам динаміки клімату.

МГЕЗК виходить з антропогенної концепції глобального підвищення приземної температури і розглядає сценарії динаміки атмосферних концентрацій антропогенних емісій. Огляди групи показують, що кількість антропогенних викидів, концентрація атмосферних парникових газів і середня глобальна температура залежать від соціально-економічних сценаріїв розвитку майбутнього світу. На реалізацію сценаріїв в свою чергу впливає цілий ряд невизначеностей - чисельність населення, темпи економічного зростання, впровадження нових ресурсоефективних і енергозберігаючих технологій, альтернативних напрямків технологічних змін в енергетиці: інтенсивне використання викопних видів палива або збалансоване використання всіх енергоресурсів. Облік такого роду ключових невизначеностей в модельних дослідженнях МГЕЗК призводить до того, що можливі прогнозовані оцінки підвищення атмосферної концентрації парникових газів і глобальної температури до кінця XXI століття варіюються в досить широких межах.

Залежно від сценаріїв розвитку світової енергетики прогнозувалося до 2100 року у порівнянні з кінцем XX століття збільшення концентрації CO<sub>2</sub> від 400 до 790 млн.<sup>-1</sup> і температури на 1-4 °C [1]. Були і більш тривожні прогнози - підвищення концентрації CO<sub>2</sub> від 540 до 970 млн.<sup>-1</sup> і температури на 1,4-5,8 °C [3]. Відносно безпечним вважається підвищення концентрації CO<sub>2</sub> до 470 млн.<sup>-1</sup> [4], і глобальної температури на 1,7 [4], 1,5-1,7 °C [5], на 2 °C [6]. Допускався значний розкид і в оцінці такого важливого показника як чутливість до зміни вмісту парникових газів в атмосфері при подвоєнні концентрації CO<sub>2</sub> - (1,5-5,5 °C) [7], (1,5-4,5 °C) [1].

Такі розмиті показники прогнозів зміни концентрації діоксиду вуглецю і глобальної приземної температури визначаються обмеженістю наукових знань про механізми складних, недостатньо вивчених природних процесів в природі, важко прогнозованих трендів розвитку світової економіки та енергетики в умовах невизначеності ряду факторів. Цю обставину відзначено і в Кліматичній конвенції, один з ключових пунктів якої говорить: «...відзначити наявність ряду невизначеностей в прогнозах кліматичних змін, зокрема щодо тимчасових, амплітудних і регіональних особливостей» [1]. Рекомендувалося посилити наукові дослідження, удосконалити моделі вуглецевого циклу і клімату, уточнити невизначеності щодо глобального потепління [1]. У міру розвитку науки, раніше висунуті теорії піддавалися все більшій критиці і чимало з них в подальшому були відкинуті.

**Матеріали та методи.** У вересні 2019 року (Нью-Йорк, США) відбувся кліматичний саміт ООН, покликаний прискорити процес підписання і ратифікації Паризької угоди. Напередодні (квітень 2019 року) провідні вчені Всесвітньої Метеорологічної організації ООН представили звіт про останні зафіксовані дані щодо глобального потепління. Температура піднялася на 1,1 °C у порівнянні з 1850-1900 рр. і на 0,2 °C у порівнянні з 2011-2015 рр., що призвело до танення льодовиків, підвищення рівня океану. Зростання концентрації парникових газів з 2015 по 2019 рр. перевищує темпи зростання в попередні п'ять років на 20 %. Щорічні втрати маси льоду в Арктиці збільшилися в 6 разів - з 40 Гт у 1979-1990 роках до 252 Гт на рік в 2009-2019 роках [8].

Не всі фахівці і наукові колективи поділяють такий драматичний підхід і висновки МГЕЗК. Частина з них, не відносячи себе до противників реальності антропогенного впливу на підвищення температури, оцінює тривожні прогнози цієї групи по збільшенню концентрації діоксиду вуглецю в атмосфері та підвищенню температури до кінця XXI століття як явно завищені, що не враховують тенденції зниження світового енергоспоживання, яка з'явилася в останні десятиліття, а пропозицію про необхідність прийняти вже зараз превентивні заходи по обмеженню викидів як недостатньо аргументовані. За різними сценаріями і моделям до кінця століття глобальне середньорічне потепління складе 1,2-2,6 °C і 0,9-1,2 °C [9], а чутливість глобальної кліматичної системи - 1,9 °C [7].

Найбільш послідовними опонентами МГЕЗК виступили наукові групи від Російської академії наук [5, 10, 11] і науково-дослідної лабораторії глобальних проблем енергетики Московського енергетичного інституту [12]. Використовуючи принципово різні методики, ці наукові групи прийшли практично до однакових результатів в прогнозних оцінках збільшення концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері і підвищення глобальної температури до 2100 року. Результати прогнозів МГЕЗК були оцінені як помилкові і сценарії глобального потепління як драматичні. Огляд робіт опонентів з порівняльним аналізом основних розбіжностей з висновками МГЕЗК наведено в [13, 14]. Розбіжності стосуються двох основних проблем, а саме: визначення чутливості кліматичної системи і прогнозу концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері. Від ступеня наукової аргументації висновків з цих проблем залежить обґрунтованість пропонованих заходів і рішень по обмеженню викидів двоокису вуглецю, що підлягають узгодженню на міжнародному рівні.

Разом з антропогенною концепцією глобального потепління (підхід МГЕЗК) розглядається і природна концепція потепління клімату. Не заперечуючи впливу антропогенних викидів на збільшення глобальної температури, прихильники природної концепції потепління клімату вважають, що все ж таки

визначальними факторами підвищення приземної температури є природні, пов'язані з космогенними циклічними процесами, з сонячно-земною взаємодією (обертання Землі навколо Сонця, прецесія осі обертання Землі, цикли сонячної активності та ін.) [15-20]. Є й підходи, що змінюють місцями причини та наслідки глобального потепління, а саме: зміни атмосферної концентрації діоксиду вуглецю - наслідок глобальних змін температури планети, а не їх причина. Прогрів Світового океану повинен призводити до зменшення розчинності CO<sub>2</sub> в морській воді і викиду надлишку CO<sub>2</sub> в атмосферу [15, 21].

Варто відзначити, що в цьому контексті велику кількість як вітчизняних, так і зарубіжних вчених геологічного профілю визначають як ключовий чинник генерації парникових газів процеси глибинної дегазації Землі (ГДЗ). На думку українських геологів [22], ГДЗ - головна рушійна сила ендегенних геологічних процесів, а скрізьформаційні флюїдопровідні системи (тріщини, розломи в земній корі) є основними каналами ГДЗ в літосфері. Уявлення про мантийні плюми, як про базові (мега) труби дегазації, система яких контролює глобальні процеси ГДЗ, дозволяє об'єднати практично всі основні аспекти ендегенного рудоутворення, нафтогенезу і формування парникових газів на Землі. При цьому вивчення процесів ГДЗ реалізується переважно за допомогою сучасних геофізичних методів досліджень.

На противагу гіпотезі про переважання на Землі парникових газів техногенного походження і ключовому впливу антропогенних факторів на зміну планетарної температури, російський геолог А.В. Ніколаєв [23] стверджує, що саме відновлені гази (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S), які є похідними висхідного потоку вихідного флюїду в надрах Землі, взаємодіючи з киснем силікатів мантиї і гірських порід земної кори, викликають виділення тепла, а також ініціюють магматичні і гідротермальні процеси. При цьому частина висхідного флюїду проривається до верхніх горизонтів земної кори, а його похідні у вигляді струменів водню, гелію, метану, сірководню досягають земної поверхні і потрапляють безпосередньо в атмосферу.

Уявлення про процеси ГДЗ в зв'язку зі змінами глобальної температури активно досліджуються вченими-геофізиками. Зокрема, наукові результати, викладені в [24], підтверджують теорію щодо утворення флюїдів у верхній частині астеносфери і подальшого вивільнення парникових газів в атмосферу Землі крізь тріщини і розломи. Була розглянута сукупність процесів, які протікають в мантиї від часу утворення астеносфери до її кристалізації. Запропонована і теоретично обґрунтована модель, в якій астеносферу розглядають як відкриту систему, а тонкий шар на її покрівлі - як реактор, в якому відбувається акумуляція активних компонентів. Саме відносно невелика потужність шару максимального плавлення забезпечує вплив на диференціацію розплаву елементів, вміст яких у мантиї в цілому незначний. Крізь реакційний об'єм проходить потік активних компонентів, в ньому відбуваються фізико-хімічні взаємодії. Далі в процесі активізації значна частина продуктів реакцій вивільняється до земної поверхні у вигляді розплавів (ексгаліцій).

**Результати.** Глобальне потепління як проблема фізики досить докладно розглянуте в [15]. Нижче коротко проанотовані основні положення [15].

Термін «клімат» («нахил» - з грецької) ввів давньогрецький астроном Гіппарх (190-120 рр. до нової ери), що розділив Землю на п'ять широтних зон - полярні, помірні і тропічну, що відрізнялися нахилом сонячних променів (тобто висотою Сонця над горизонтом). Гумбольдт (Німеччина) запропонував враховувати вплив підстильної поверхні суші і океану на атмосферу. Докучаєв (1857-1903) розвинув і деталізував теорію широтної і вертикальної географічної, в тому числі кліматичної зональності поверхні суші. Були побудовані численні кліматичні карти середніх температур, опадів, атмосферного тиску для різних сезонів, для року і т. п.

З сучасних позицій клімат визначається як статистичний ансамбль станів, які кліматична система океан-суша-атмосфера (ОСА) проходить за періоди часу в декілька (близько трьох) десятиліть. Міжнародними метеорологічними конференціями (Варшава 1935 р., Вашингтон 1957 р.) було рекомендовано для визначення сучасного клімату атмосфери вибирати тридцятирічні періоди осереднення.

Основним джерелом енергії для процесів в кліматичній системі Землі є падаючий на Землю потік сонячного випромінювання (інсоляція). Його значення (сонячна постійна) на середній відстані від Землі до Сонця дорівнює близько 1367 Вт·м<sup>-2</sup>. Цьому відповідає світимість Сонця (повна потужність сонячного випромінювання) близько 3,83·10<sup>26</sup> Вт і ефективна температура сонячного випромінювання 5770 К.

Основна задача теорії клімату - визначити поля температури в кліматичній системі ОСА з властивими їм коливаннями в часі. Цій задачі підпорядковані дві інші, а саме:

1. визначення глобальних горизонтальних неоднорідностей поля температури, що створюються різницею інсоляцій в екваторіальних і полярних зонах при згладжуючому впливі великомасштабних рухів, що генеруються температурними неоднорідностями, і відповідного теплообміну в атмосфері і океані.

2. визначення вертикальних неоднорідностей температурного поля, включаючи «парниковий ефект», що створюються на Землі (з майже прозорої для основної частки сонячного випромінювання земною атмосферою) нагріванням її поверхні і згладжуючим впливом вертикального теплообміну внаслідок термічної конвекції, домінуючою в нижніх шарах атмосфери, променевого переносу власного випромінювання поверхні землі і атмосфери, домінуючого у верхніх шарах.



Суть вищезазначеного парникового ефекту полягає в наступному. У нижньому десятикілометровому шарі атмосфери температура в середньому зменшується з висотою, тому що сонячне короткохвильове випромінювання поглинається в атмосфері слабо і, досягаючи поверхні Землі, нагріває її, а власне довгохвильове випромінювання, навпаки, сильно поглинається в атмосфері, підвищуючи її температуру. Цей процес не є рівномірним - в одних регіонах температура змінюється швидше, в інших - повільніше.

В атмосфері Землі на висотах близьких до 5 км фіксується температура 255 К. Середня приповерхнева температура шару повітря на висоті метеорологічного пункту близька до 288 К. Різниця цих температур в 33 К характеризується як парниковий ефект (за аналогією з таким ефектом в парниках, теплицях). За інших рівних умов, чим більше парниковий ефект, тим тепліші нижні шари атмосфери. Без парникового ефекту приповерхнева температура не перевищувала б  $-18^{\circ}\text{C}$ , а це означає відсутність умов для життя. Вода на земній поверхні існувала б тільки у вигляді льоду. Таким чином, головними механізмами, що забезпечують стабільність температури на поверхні Землі, є сонячне випромінювання і парниковий ефект.

Довгохвильове випромінювання інтенсивно поглинається цілим рядом наявних в атмосфері так званих парникових газів, основними з яких є водяна пара (найбільш ефективний поглинач), діоксид вуглецю  $\text{CO}_2$ , метан  $\text{CH}_4$ , закис азоту  $\text{N}_2\text{O}$ , озон  $\text{O}_3$  і інші (таблиця). Як видно з табл., головним парниковим газом є водяна пара, а не вуглекислий газ. Властивості водяної пари як парникового газу було відзначено Д. Тіндалем ще в 1863 році [15]. Вуглекислий газ є другим за значимістю, але втричі меншим за обсягом парникового ефекту (табл.).

Таблиця. Парникові гази атмосфери Землі

Парниковий газ	Концентрація (вміст) парникового газу	Внесок в парниковий ефект, градусів
Водяна пара, $\text{H}_2\text{O}$	$2,5 \text{ г} \cdot \text{Кг}^{-1}$	20,6
Діоксид вуглецю, $\text{CO}_2$	355 чнм	7,2
Озон, $\text{O}_3$	343 ED*	2,4
Закис азоту, $\text{N}_2\text{O}$	0,28 чнм	1,4
Метан, $\text{CH}_4$	1,3 чнм	0,8
Сірчистий газ, $\text{SO}_2$	$2 \cdot 10^{-3}$ чнм	0,8
Фреон, чотирихлористий вуглець, аміак та ін.	$1 \cdot 10^{-4}$ чнм	0,8

\* ED – одиниця Добсона.  $1 \text{ ED} = 2,7 \cdot 10^{16}$  молекул  $\text{см}^{-2}$  [15]

Роль вуглекислого газу, як парникового, була показана С. Арреніусом (1896 р.) і Т. Чемберленом (1899 р.). Збільшення концентрації  $\text{CO}_2$  в період 1956-1997 рр. з 315 до 360 млн.<sup>-1</sup> стало підставою висунути гіпотезу про антропогенний внесок у потепління клімату саме вуглекислого газу внаслідок спалювання викопного палива. Вперше про таку гіпотезу заявив Д. Каллендор ще у 1938 р. Головний же парниковий газ - водяна пара - не став предметом пильної уваги при розгляді зв'язку температури і вмісту водяної пари в атмосфері. У той же час в цілому ряді авторитетних джерел відстоюється особлива, домінуюча роль саме водяної пари в підвищенні глобальної температури [15, 25, 26].

Значний внесок у вібрацію клімату вносять завислі в атмосфері частки - аерозоль природного (до 90%) і антропогенного походження. При цьому, аерозоль може викликати як парниковий так і антипарниковий ефекти. Якщо аерозоль пропускає більшу частину теплового випромінювання Землі, то температура атмосфери під аерозольним шаром може виявитися нижче, ніж за відсутності аерозолі (антипарниковий ефект). Але при деяких поєднаннях властивостей аерозолі (просторова і часова мінливість характеристик) він може посилювати парниковий ефект [15]. Крім водяних крапельок і кристалів водяного льоду в хмарах визначають наступні види тропосферного аерозолі:

1. морський аерозоль - частинки солі, які випарувалися з бризків води морських хвиль. Інтенсивність їх утворення значна (до  $1 \text{ Гт} \cdot \text{рік}^{-1}$ ) і визначається в основному швидкістю вітру. Аерозоль досить швидко осідає або вимивається, не проникаючи через «хмарний фільтр» на висоті до 3-х км.

2. сульфатний аерозоль - субмікронні частинки, що містять сульфат амонію  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , бісульфат  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  і сірчану кислоту в водному розчині. Вони утворюються в атмосфері в реакціях окислення відновлених з'єднань сірки, що виділяються океанським фітопланктоном. Сульфатні частки вносять найбільший внесок в антипарниковий ефект.

3. пустельний аерозоль - мінеральний пил з частинок глинистих мінералів під час пилових буревіїв. Середня концентрація частинок -  $300 \text{ мкг/м}^3$ , але в поверхневому шарі під час бурі зростає в 3-10 разів.

4. біогенний аерозоль - летючі органічні речовини, що виділяються рослинами, особливо вічнозеленими, а також деякими бактеріями, грибами і комахами. Емісія таких речовин може бути до  $0,2 \text{ Гт} \cdot \text{рік}^{-1}$  середня концентрація в атмосфері невисока (близько  $50 \text{ мкг/м}^3$ ).

5. димовий аерозоль - дим, сажа та інші продукти згоряння при лісових, степових та інших пожежах. Сумарні викиди в широкому діапазоні - (0,003-0,150 Гт·рік<sup>-1</sup>).

6. вулканічний аерозоль - сульфатний аерозоль з вулканічних газів і вулканічний попел - викинуті в атмосферу частинки роздроблених і розпорошених вибухами гірських порід. Вихід такого аерозолю близько 0004 Гт·рік<sup>-1</sup>).

Є також два види антропогенного аерозолю. Кількість його на порядок менша природного, але викиди їх можна порівняти з природними. Промисловий сульфатний аерозоль - частинки, що утворюються в атмосфері з сірчистого газу SO<sub>2</sub> при спалюванні палива, особливо вугілля, на електростанціях, при виплавці металів, виробництві сірчаної кислоти та в інших технологіях. Промисловий пил - викиди гірничодобувної промисловості, цементних, металургійних і інших заводів. Ці два види промислового аерозолю становлять не менше 0,045 Гт·рік<sup>-1</sup>.

В межах України характерним прикладом території з значною кількістю промислового пилу в атмосферному повітрі є м. Маріуполь [27]. Індекс забруднення атмосфери тут становить 17,7 умовних одиниць, і за цим параметром місто є абсолютним лідером серед інших промислових регіонів країни. При цьому валовий вміст важких металів в пилових викидах становить (мг/кг): Mn – 4300, Ni – 60, Co – 4, V – 210, Cr – 600, Mo – 4, Cu – 286, Pb – 1088, Zn – 5825, Sn – 26.

Антипарниковий ефект аерозолю в цілому невеликий, хоча сильні виверження вулканів і великі лісові пожежі (Росія, Бразилія, 2019 рік) вносять істотний внесок у вібрацію клімату [15].

При всій простоті визначення поняття «парниковий ефект» ... *«прямий розрахунок парникового ефекту виявляється важкою справою через складність спектрів поглинання парникових газів»* [15]. Фізика парникового ефекту досить детально представлена в [15]. Згідно [15] необхідно вирішувати завдання по визначенню глобальних горизонтальних неоднорідностей поля температури внаслідок різниці інсоляцій в екваторіальній і полярних зонах, а також вертикальних неоднорідностей температурного поля, включаючи парниковий ефект, внаслідок вертикального теплообміну за рахунок термічної конвекції (з урахуванням вертикального перенесення звичайної теплоти і прихованої теплоти випаровування, теплоти ка переноситься водяною парою). Для цього розглядають і описують «горизонтальні» процеси тепло- і масопереносу між екваторіальній і полярними зонами і вертикальні процеси радіаційно-конвективного тепло- і масопереносу по вертикалі, включаючи парниковий ефект водяної пари і малих газових домішок, та радіаційного теплопереносу в атмосфері, замуненою аерозольною суспензією з включенням її антипарникового ефекту. *«Переконливі розрахунки парникового ефекту можливі, звичайно, лише при використанні повних (тривимірних нестационарних) чисельних моделей загальної циркуляції атмосфери з детальним описом променистого і конвективного теплообміну, при обліку хмарності і аерозолю»* [15]. Зараз же для якісного розуміння суті парникових процесів побудована оціночна теорія, що викладена в [15].

Немає єдиної думки фахівців і про природу парникового ефекту. Як відомо, МГЕЗК пояснює підвищення глобальної температури монотонним зростанням концентрації в атмосфері парникових газів, головним чином, діоксиду вуглецю, внаслідок їх антропогенних викидів. Не всі в науковому співтоваристві поділяють підхід МГЕЗК про визначальну роль антропогенних викидів в підвищенні глобальної температури. Наявність парникового ефекту ніхто не заперечує, але по іншому визначають природу такого ефекту. Наприклад, фахівці з фізичної оптики нижньої атмосфери пояснюють природу сучасного глобального потепління впливом факторів сонячно-магнітної активності (спалахи на Сонці, магнітні бурі) [25]. Потік мікрохвиль з іоносфери утворює в тропосфері з кластерів водяної пари конденсаційно-кластерну димку, що переходить в оптично тонку хмарність (у вигляді «молодих» перистих хмар), яка екранує потік тепла в космос з нижньої тропосфери і підстильної поверхні. Відбувається розігрів приземного повітря і поверхні світового океану [25]. Пари води - основний парниковий газ в тропосфері і його зміст набагато більше (до 36-70%) у порівнянні (9-26%) для CO<sub>2</sub>, (4-9%) метану або (3-7%) озону [25]. Таким чином, кластероутворення з парів води, що призводить до створення оптично тонкої хмарності, стає основною причиною сучасного глобального потепління в епоху проходження в кінці ХХ-го початку ХХІ століття як сонячної так і геомагнітної активності. Викид парникових газів антропогенного походження (головним чином діоксиду вуглецю, метану), може посилювати ефект глобального потепління.

Як зазначається в [25], дослідження сонячно-геомагнітної активності і техногенного електромагнітного шуму (що виникає в тому числі в передавальних пристроях мобільного зв'язку) дозволять краще зрозуміти механізм впливу порівняно слабких впливів на біосферу і навколишнє середовище, зокрема, і на погодно-кліматичні характеристики.

Є й інші дослідження про зв'язок потепління зі збільшенням хмарності [28]. На основі аналізу метеорологічних і аерологічних даних, отриманих на стнції Восток (Антарктида), були виявлені значні варіації рівня хмарного покриву і температури повітря, пов'язані з варіаціями рівня галактичних космічних променів і міжпланетного магнітного поля. «Посилення хмарності на висотах нижче 8 км викликає

потепління приземної температури атмосфери, ймовірно, за рахунок парникового ефекту, відсутність вихолодження поверхні Землі» [28].

Сценарії антропогенного посилення глобального парникового ефекту, термічні, гідрологічні режими і основні висновки для можливих температурних змін клімату в Україні були розглянуті на початку 90-х років ХХ століття і представлені в [29]:

1. при глобальному антропогенному потеплінні приблизно на 1 °С (в першій чверті ХХІ століття) в південних районах України рівень потепління практично збігатиметься з глобальним, а в північних може посилитися до 40%.

2. широтний градієнт температур на території України буде по абсолютній величині зменшуватися до 10 % (в сучасну епоху широтний градієнт приземної річної температури - близько 0,8 °С на 1° широти).

3. якщо річна глобальна температура підніметься на 3 °С (близько середини ХХІ століття), то температурний режим північних областей України може стати подібним температурному режиму її південних регіонів.

Відзначається, що отримані рядом дослідників результати математичного моделювання динаміки земної кліматичної системи для створення сценаріїв RCP регіональних змін клімату при антропогенному посиленні парникового ефекту поки малонадійні. Труднощі тут в недостатньо глибокій вивченості всієї сукупності фізичних процесів, які формують широтно-довготний розподіл полів температури та інших кліматичних параметрів (суми опадів, мінливість погоди та ін.)

Публікація прогнозів через десять років показала, що в Україні підвищення середньої приземної температури в період 1900-2000 рр. склало 0,4-0,6 °С, причому по регіонах: північний схід близько - 1 °С, полісся і лісостеп - 0,7-0,9 °С, степ - 0,2-0,3 °С. За порами року: взимку - 1,2 °С, навесні - 0,8 °С, влітку - 0,2-0,3 °С. Виявлений негативний тренд числа морозних днів і деконтиненталізація клімату. Прогнозні оцінки зміни середньої приземної температури в Україні до 2050 року зводяться до того, що підвищення складе 1,5-2,0 °С, причому в січні для півдня - 2,0 °С, для півночі - 2,8 °С і в липні для України - 0,5-1,0 °С [30].

Недавній прогноз для потепління в Україні по ряду періодів до 2100 року наведено на рис. 3. Видно, що результати інструментальних вимірювань підвищення температури і прогнози потепління в Україні в цілому відповідають трендам зміни глобальної температури, і перед Україною стоять ті ж виклики і ризики, якими стурбований світ [31].

Шлях до зниження викиди парникових газів - зменшення кількості використання енергоресурсів внаслідок підвищення енергоефективності їх використання, залучення до теплового циклу низьковуглецевих енергоресурсів і (або) ефективне управління теплотехнічними характеристиками процесу спалювання вуглеводнів (низькоемісійне спалювання, утилізація теплоти продуктів спалювання).

Відомо, що на збільшення енергоемності продукції впливає як необґрунтована втрата цінності енергії (ексергії) в технологічних процесах виробництва, так і надмірне споживання енергоресурсу в результаті недотримання принципів і методів економічного стимулювання зниження енергоемності продукції. Тому необхідно спрямовувати зусилля на вдосконалення виробництва енергоносіїв (електричної, теплової енергії), продукції теплотехнологій, вдосконалення і підвищення ролі держави в створенні стимулюючих заходів по реалізації інвестиційних проєктів, енергоефективних технологій та енергозберігаючих заходів, методів і програмних засобів організаційно-технологічного та економічного управління підвищенням ефективності використання енергоресурсів з удосконаленням політики ціноутворення, формування тарифів в умовах ринку. Що стосується організаційно-економічних механізмів модернізації теплоенергетики України, то вони досить детально представлені в [32].

Як відомо, неодмінним наслідком перетворення енергоресурсів в зручні для використання види енергоносіїв (електричний струм, пара, гаряча вода та ін.) є викид забруднюючих речовин, тепла і парникових газів у навколишнє середовище. При цьому принципово важливо підкреслити, що немає жодного виду енергоресурсів, при використанні якого б не виявлялося негативного впливу на екологічну рівновагу в природі. Поновлювані джерела енергії, умовно віднесені до "екологічно чистих", такими не є, якщо розглядати т. зв. повний цикл їх життя. Але все ж таки є потенційно значний екологічно чистий енергоресурс, який не видобувається з родовищ, який не витягується з навколишнього середовища і, природно, не зазнає ніяких перетворень. Він відсутній в природі як такий і може бути віднесений до екологічно абсолютно чистих енергоресурсів. В літературі [33] з'явився вже термін, що характеризує такий енергоресурс - «негаджоуль»: него - заперечую (латин.), тобто це як би "віртуальні" джоулі. Мова йде про підвищення енергоефективності - понятті, що не є тотожним поняттю енергозбереження.

Енергоефективність - характеристика, що відображає відношення будь-якого корисного ефекту (виробництво матеріальних цінностей, надання послуг, проведення різного виду робіт з використанням енергоресурсів) до витрат енергетичних ресурсів з метою отримання такого ефекту [34]. Енергоефективність характеризує ефект від використання одиниці енергії і вимірюється в відносних одиницях (позитивний ефект / Дж) і має ідеальним результатом, наприклад, для теплопостачання - це

повне без втрат використання первинної енергії на створення належного теплового режиму комфорту в зонах перебування людини. Енергоефективність, як правило, показник, обернено пропорційний енергоемності виробництва продукції.

Енергозбереження - це реалізація організаційних, правових, технічних, технологічних, економічних та інших заходів, спрямованих на зменшення обсягу енергетичних ресурсів, що використовуються, при збереженні відповідного корисного ефекту від їх використання (в тому числі обсягу виробленої продукції, виконаних робіт, наданих послуг) [35]. Важливо підкреслити: "існуючого корисного ефекту", інакше просте припинення подачі теплоносія для опалення або електроенергії аж до відключення можна віднести до заходу "енергозбереження". Енергозбереження вимірюється в абсолютних одиницях (т. у. п., Гкал, Дж і ін.).

На початку XXI століття енергоефективність стала одним з основних енергоресурсів в енергетичному балансі світу (рис. 4, [36]) У енергобаланс України цей енергоресурс поки ще не включений в належній мірі. Як видно з рис. 4, енергоресурси у вигляді «негаджоулей» можуть бути порівнянні з іншими енергоресурсами в структурному енергобалансі світу і Європи і, зокрема, можуть бути рівні або навіть перевищувати обсяги використання нафти.

Загострена ситуація в українській енергетиці, зокрема, імпортозалежність від поставок газу і нафтопродуктів, недопоставки антрациту, відсутність повноцінних ринкових відносин в енергетиці та інші негативні явища, поглибила проблему диверсифікації енергоресурсів. І в той час все ще залишається малопомітним і проігнорованим такий енергоресурс як негаджоулі. Досвід роботи по підвищенню енергоефективності недостатньо систематизується і пропагується, немає банку пропонуваніх інноваційних технологій і їх ієрархічного ряду для вибору найбільш оптимальних. Ігнорування підвищення енергоефективності - це зниження економічного зростання, збереження високої енергоемності ВВП, загроза енергетичної безпеки, зниження конкурентоспроможності промисловості та інвестиційної привабливості, підвищення рівня бідності, підвищення рівня забруднення навколишнього середовища і карбонізації економіки.

За даними ЦЕНЕФ-XXI у 1973-2011 роках за рахунок підвищення енергоефективності було забезпечено більше половини приросту потреби людства в енергії. У ці роки світовий ВВП зріс в 3,3 рази, а споживання первинної енергії – лише в 2,1 рази. Якби енергоемність ВВП залишалася б на постійному рівні 1973 року, то приріст споживання енергії склав би 14,1 млрд. т н.е., а фактично він склав 7 млрд. т н.е. Внаслідок підвищення енергоефективності було забезпечено половину приросту - 7 млрд. т н.е. У ці ж роки прирости палива і енергії склали (в млрд. т н.е.): нафта - 1,35; вугілля - 2,28; природний газ - 1,81; ядерне паливо - 0,62 [34].

Останнім часом в Україні в законодавчому полі і в політиці виконавчої влади активізувалася діяльність по пропаганді енергоефективності та реальним шляхам її реалізації в сфері енергетики. До знакових заходів у цьому напрямку відносяться:

1. прийнята в 2017 році нова Енергетична стратегія України на період до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Слід зауважити, що в порівнянні зі стратегіями 2006 і 2013 рр. в останній стратегії окремими суттєвими блоками представлені: теплозабезпечення населення і промисловості, відновлювальна енергетика та енергоефективність, включаючи підрозділ підвищення енергоефективності будівель. Причому в матеріалах стратегії до 2035 року, в яких розглядаються конкретні сектори енергетики, на перше місце ставиться енергоефективність, далі йдуть електроенергетика, теплоенергетика, видобуток газу, вугілля, нафти, а потім відновлювальна енергетика. Так розставлені пріоритети впливу на ситуацію в енергетиці.

2. реалізація двох національних планів дій до 2020 року - з відновлюваної енергетики та енергоефективності з відповідними секторальними дорожніми картами.

3. розробка і прийняття декількох енергозначимих законів України: по енергоефективності будівель; по фонду енергоефективності; по комерційному обліку комунальних послуг; по житлово-комунальним послугам; про тариф на негазову теплогенерацію; по створенню оптового ринку електроенергії; по енергосервісним компаніям, а також проекту закону по енергоефективності.

4. проекти науково-технічного та експертного середовища з прогнозування на далеку перспективу соціально-економічного розвитку України, включаючи докладні дослідження спільної динаміки економіки і енергетики.

Найбільший потенціал підвищення енергоефективності використання енергоресурсів, і тим самим зниження викидів парникових газів, знаходиться в сфері теплопостачання житлово-комунального господарства (ЖКГ) країни. Головною метою для комунальної теплоенергетики України стає вибір стратегічно вивірених рішень щодо розвитку цієї сфери ЖКГ - розробка керівних документів державного значення (концепції, стратегії, програми) і формування на їх основі науково-технічної політики, створення комплексу нормативно-правових актів та науково-організаційних заходів, реалізація яких забезпечить

енергоефективне використання енергоресурсів, енергетичну безпеку, сталий розвиток і ефективне функціонування систем теплозабезпечення населених пунктів України.

Дослідження у вирішенні глобальних і регіональних проблем потепління клімату проводяться, зокрема, в установах НАН України (відділення фізико-технічних проблем енергетики [37-46], відділення наук про Землю [22, 24, 27, 47]).

У сфері електроенергетики також можна виділити ряд факторів перегляду стратегії її розвитку з урахуванням проблем зміни клімату [48, 49]. По-перше, розвиток за рахунок використання традиційних технологій викликає значне погіршення екологічної ситуації і збільшення споживання органічного палива. По-друге, в ситуації, коли відбувається об'єднання традиційних енергетичних систем і систем з розподіленою генерацією, які орієнтовані на використання нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії. Організація функціонування таких систем істотно відрізняється. Необхідність врахування цих факторів і інших чинників дозволила сформуванню нової концепції розвитку енергетики, яка отримала назву Smart Grid. При цьому енергетична система розглядається як розгалужена мережева інфраструктура, призначена для підтримки енергетичних, інформаційних, економічних і фінансових взаємовідносин між усіма суб'єктами енергетичного ринку. Вона стає об'єктом формування нового технологічного базису, що дає можливість істотного поліпшення досягнутих і створення нових функціональних властивостей енергосистеми. Енергоспоживачі отримують можливість організації взаємодії в інформаційній мережі, стануть керованими і будуть виконувати функції вимірювання власного споживання електроенергії і потужності. Передбачається розробка ідеології матеріальної реалізації концепції інтелектуальних мереж - її технічної і технологічної платформ, головним чином по відношенню до технології та пристроїв генерування малої і середньої потужностей, до складу яких входять альтернативні і поновлювані джерела енергії.

Важливою постає проблема моделювання ринку електроенергії. Зокрема, моделювання стану конкурентної рівноваги пов'язано з пошуком таких цін на електроенергію в енерговузлах й таких обсягів виробництва, передачі і споживання електроенергії, за яких результати діяльності кожного з учасників (агентів) досягають власних цілей: споживача – максимум власного добробуту, компанії-постачальника – максимум постачання електроенергії споживачам, генеруючої компанії – максимум власного прибутку, компанії-оператора системи передачі електроенергії – максимум сприяння учасникам ринку у виконанні їх зобов'язань. Роботи у цьому напрямку проводяться в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г. С. Пухова НАН України [50].

Для сфери теплоенергетики в ІТТФ НАН України проведені детальні дослідження з енергоефективності сфери теплопостачання населення з розробкою проекту стратегії теплопостачання населених пунктів України.

Комунальна теплоенергетика України та її головна сфера - теплопостачання населених пунктів України - основний споживач первинних енергоресурсів (понад 60% загального енергобалансу країни, переважно імпортованого природного газу). У той же час саме цей сектор має і найбільший потенціал енергозбереження, якщо задіяти заходи і механізми підвищення ефективності використання енергоресурсів, в першу чергу при енергопостачанні в будівлях (теплові втрати тут доходять до 40%).

Для реалізації потенціалу підвищення показника енергоефективності в будівлях необхідно задіяти технологічні та організаційно-економічні інновації, розробляти заходи та механізми, що стимулюють підвищення сприйнятливості економіки до інновацій. Технологічні інновації пов'язані як з істотним посиленням теплового опору огорожувальних конструкцій будівель, так і з модернізацією технологій і інженерних систем їх енергопостачання з використанням нових підходів до розробок таких технологій і систем, з активним залученням відновлюваних джерел енергії та інформаційно-інтелектуальних технологій.

Організаційно-економічні інновації припускають необхідність максимально ефективного управління наявними ресурсами відповідно до нових завдань, а також соціально-економічними, технічними можливостями і механізмами взаємодії комунальної теплоенергетики з економікою в цілому. Такі інновації пов'язані також з удосконаленням механізмів використання результатів досліджень, взаємодії державних інститутів, підприємств, експертів, науковців.

Функції держави полягають у створенні високоефективної системи управління теплопостачанням населених пунктів України із забезпеченням мінімальних витрат на розвиток і ефективність генерації, транспорту та розподілу теплоти з досягненням якісного, надійного, безпечного теплопостачання, доступного по оплаті для споживача.

Пропозиції по технологічним, організаційним і соціально-економічним інноваціям підвищення енергоефективності будівель, а також обладнання та інженерних систем їх енергозабезпечення, в тому числі. При спорудженні «пасивних» будинків типу «нуль-енергії» наведені в [38, 39, 41, 51, 52].

У світовому масштабі геополітика, екологія, економіка знаходяться в тісному взаємозв'язку. Енергетична політика різних країн (і регіонів) будується з урахуванням переваг тієї чи іншої складової

такої залежності. Наприклад, 2019 рік відзначився особливою увагою світової громадськості до кліматичних проблем. На саміті G7 генеральний секретар ООН Антоніу Гуттеріш оголосив «надзвичайну кліматичну ситуацію». У США проходить офіційний процес виходу з Паризького угоди по клімату. Франція прийняла закон про енергетику та клімат, який встановлює екологічний і кліматичний надзвичайний стан і передбачає досягнення країною вуглецевої нейтральності до 2050 року. До 2030 р. Франція повинна зменшити споживання викопного палива на 40% [53].

На 25-й конференції ООН з клімату (Мадрид, грудень 2019 р.) Генеральний секретар ООН визначив чіткі завдання з порятунку планети: до 2030 року скоротити викиди парникових газів на 45%; до 2050 року досягти вуглецевого нейтралітету; до 2100 року обмежити зростання глобальної температури на 1,5° С [54]. Європарламент 28 листопада 2019 року прийняв резолюцію, яка оголошує «глобальну кліматичну і екологічну надзвичайну ситуацію», і закликав усі країни ЄС до 2050 року повністю позбутися від викидів парникового газу. За ухвалення резолюції проголосували 429 депутатів, проти - 225 осіб, ще 19 утрималися. При цьому екологи вже розкритикували декларацію практично за повну відсутність якихось конкретних положень, а кліматичні цілі ЄС що існували до цього і зовсім не відповідали Паризькій угоді [55].

Але не всі фахівці з клімату поспішають оголошувати про прийдешні катастрофи. Уточнюється методологія, поглиблюється і розширюється теорія і практика досліджень, вдосконалюється інструментарій досліджень. Достовірні на перший погляд висновки беруться під сумнів. Здавалося б, можна достовірно визначити площу морських льодовиків в Арктиці - одного з ключових індикаторів клімату. Існують широко розвинена авіарозвідка, супутникові спостереження. Однак похибка при вимірюваннях і розрахунках досягає, наприклад, для Арктичного басейну 10% - в цілому близько 1 млн. км<sup>2</sup>. Причина такої похибки - великі моря талої води шаром в 1-2 м в полярне літо на поверхні льоду. Талий шар води «екранує власне випромінювання льоду, в такій ситуації льодові спостереження в інфрачервоному діапазоні неможливі» [56].

Визначаються нові напрямки і об'єкти досліджень навколишнього середовища, що впливають на клімат внаслідок природної емісії парникових газів. У 2010 р виконані унікальні дослідження в Арктиці з вивчення причин і механізмів виникнення «метанового максимуму» в атмосфері Північної півкулі. Виявлені чинники і встановлені закономірності надходження в атмосферу величезних кількостей метану на мілководних акваторіях арктичних морів, дають підстави вважати метановий фактор одним з основних при розгляді причин глобальних змін клімату на Землі, а також пояснюють природу раніше встановлених аномалій [57].

У порівнянні з матеріалами щодо антропогенної концепції зміни клімату які широко публікуються, менш доступні (і менш помітні) для громадськості публікації в спеціальних журналах про результати досліджень іншого чинника впливу на клімат - сонячно-земної взаємодії. Природному впливу на глобальне потепління саме такого фактора фахівці з фізики атмосфери і океану, геомагнетизму і аеронауки відводять вирішальну роль.

Зараз основним трендом досліджень природи і характеру динаміки глобального потепління стають міждисциплінарні дослідження на стику, здавалося б, досить далеких дисциплін. Так, наприклад, виконавцями програми «Глобальні та регіональні зміни клімату та природного середовища пізнього кайнозою Сибіру» були десять інститутів Сибірського відділення РАН - Археології та етнографії, геології та мінералогії ім. В.С. Соболева, Нафтогазової геології і геофізики ім. А.А. Трофимука, Геохімії ім. А.П. Виноградова, Лісу ім. В.Н. Сукачова, Лімнологічного, Ядерної фізики ім. Г.І. Будкера, Обчислювального моделювання, Земної кори, Мерзлотоведення ім. П.І. Мельникова.

Проведені дослідження підтверджують спільність ходу і єдиний механізм кліматичних змін як в середніх широтах Північної Азії, так і всієї планети. Ці результати переконливо свідчать, що сучасне потепління має природний характер, його рівень поки не перевищив порогу природних змін клімату, що відбувалися протягом навіть останніх 1000 років, а тим більше четвертинного періоду [58].

В [19] проведено порівняльний аналіз отриманих результатів і висновків обговорюваних концепцій. *«Як прихильників, так і противників антропогенного потепління не можна звинуватити в некоректному трактуванні наявних даних. ... Тому для вибору між концепціями необхідно залучити додатковий набір даних (палеокліматичних реконструкцій)».*

Для реконструкції був обраний період 500-1900 рр., в якому потенційний антропогенний вплив на клімат зневажливо малий. Проведений аналіз динаміки глобальної температури показав, що на зазначеному вище часовому інтервалі *«не спостерігалось циклічних процесів такого поєднання і періодичності і амплітуди, яке могло б призвести до потепління яке спостерігається в ХХ столітті, а значить, його не можна пояснити без причини антропогенного чинника».* «... Однак і ігнорувати природну циклічність не варто, оскільки вона визначає ряд специфічних рис сучасної кліматичної динаміки, або знижуючи, або збільшуючи темпи зміни температури» [19].

З урахуванням спрямованої антропогенної і циклічних природних компонент був виконаний прогноз динаміки глобальної температури в XXI столітті. Були використані прогнозні оцінки емісії вуглецю і змін атмосферної концентрації CO<sub>2</sub> в залежності від майбутньої динаміки антропогенних емісій, яка в свою чергу визначається багатьма факторами: технологічним прогресом та інноваціями в енергетиці, темпами розвитку світової економіки, результатами реалізації запланованих заходів, прийнятих на міжнародних кліматичних самітах, геополітичними турбулентностями і т. п. (див. посилання [12] в [19]).

В залежності від різних сценаріїв розвитку енергетики за прогнозними оцінками зростання температури в XXI столітті складе 2,2; 1,8; і 1,0 °С. Прогноз МГЕЗК для тих же умов - 3,6; 2,8 і 1,8 °С. Розбіжність в оцінках є суттєвою, тому що за багатьма пропозиціями висловленими на останніх кліматичних самітах, і зокрема, на Паризькій нараді в 2015 р, небезпечна зміна потепління не повинна перевищувати 2 °С. Така межа в 2 °С за двома сценаріями (більш жорстким по динаміці викидів CO<sub>2</sub>) за прогнозами МГЕЗК буде перевищена в 2050 році і за менш жорстким сценарієм в 2060 році. Згідно [19] таке перевищення за двома сценаріями настане в 2070 році, а за останнім сценарієм не матиме місце. Таким чином, є час для вирішення проблем пов'язаних, з антропогенної емісією парникових газів, хоча для першого сценарію (більш жорсткого) залишилося не так багато - близько 30-ти років.

Таким чином, глобальне потепління, ставши однією з найбільш гостро обговорюваних проблем сучасності, викликало дискусії серед фахівців з клімату щодо причин, що породжують глобальне потепління і наслідки такої зміни клімату. Є прихильники як антропогенного, так і природного впливу на клімат. І ті й інші відстоюють свої концепції, приводячи, з їх точки зору, переконливі аргументи. Але треба спиратися на «науковий метод в політиці: велике мистецтво - це не переконувати себе в тому, що ми не зробили жодної помилки, ігнорувати їх, приховувати і звинувачувати інших людей, а взяти на себе відповідальність за помилки, вчитися на них і застосовувати цей досвід так, щоб уникнути помилок в майбутньому [59]. Треба дотримуватися і такого принципу, як «Скільки б сил не було витрачено на вашу теорію, не можна ігнорувати дані, що суперечать їй» або «Слід звертати більше уваги на пошук даних, що суперечать вашій теорії, ніж доказів, що підтверджують її» [60].

**Висновки.** Безсумнівно, є протистояння точок зору прихильників антропогенної і природною концепцій глобального потепління. Вчені мають свої гіпотези, ведуть дискусії, до проблеми підключається широка громадськість. Форми протесту збагачують навіть словниковий запас. У 2019 з'явилося «слово року»: кліматичний страйк (Climate strike). Протести - це теж трибуна громадської експертизи. Але головне при вирішенні соціально значущих проблем - дотримуватися принципу: від громадянської сміливості і гучного патетики - до наукової доказовості там, де можуть домінувати емоційні перегини. Тільки так можна зняти небезпеку руйнівних моментів, які можуть проявлятися при масовому залученні людей в громадські рухи.

Незважаючи на існуючу серед фахівців неоднозначність висновків про природу глобального потепління і оцінок значущості ролей антропогенного і природного факторів в зміні клімату, ступеня небезпеки таких змін, відсутність в міжнародному співтоваристві узгодженої позиції щодо прийняття та виконання рішень, визначених кліматичними самітами, (зокрема, Паризьких угод), довгострокова енергетична політика України повинна бути спрямована на підвищення енергоефективності використання енергоресурсів з необхідними заходами з охорони навколишнього середовища на всіх етапах паливного циклу; від видобутку енергоресурсів до споживання енергії. Можна підтримати твердження: «Навіть якби глобального потепління не було, з точки зору провідних країн світу його слід було б вигадати, оскільки для його запобігання вживаються заходи які сприяють розробці нових енергетичних технологій, заснованих на поновлюваних джерелах енергії» [61]. Розробка нових енергетичних технологій не повинна, природно, обмежуватися тільки орієнтацією на поновлювані джерела енергії.

Реалізація енергоефективного використання енергоресурсів повинна передбачати:

1. Розвиток і вдосконалення виробничо-технологічної бази теплоенергетики шляхом підвищення її науково-технічного рівня із забезпеченням необхідних екологічних норм і вимог, з тим, щоб послабити вплив цієї галузі енергетики на навколишнє середовище і, зокрема, в локальних регіональних масштабах.

2. Зниження питомих витрат палива на одиницю валового внутрішнього продукту внаслідок впровадження інноваційних енергоефективних технологій, структурних змін в економіці.

3. Розвиток і розширення масштабів впровадження комбінованого виробництва тепла й електричної енергії (когенерацію).

4. Розробку заходів щодо зниження викидів парникових газів оптимізацією вибору видів використовуваних енергоресурсів і режимів роботи енергообладнання.

5. Розвиток малої (децентралізованої, розподіленої, розосередженої, автономної) енергетики і більш широке залучення в паливний цикл нетрадиційних і поновлюваних енергоресурсів.

6. Підвищення ефективності використання енергоресурсів у комунальній теплоенергетиці при виробництві, транспортуванні та споживанні теплової енергії в житлово-комунальному секторі.

7. Впровадження систем прозорого тривалого і постійного моніторингу за станом і достовірним прогнозом викидів парникових газів для оцінки екологічної ситуації в регіонах, де реально існує можливість створення резервів для передачі квот на викиди парникових газів на комерційній основі.

Якщо говорити про прогнози розвитку енергетики і, відповідно, характеру динаміки емісії парникових газів, то згідно «досвіду генетичних прогнозів світової енергетики» в найближчі десятиліття будуть проявляти себе тенденції [62]:

1) стабілізація національної питомого енергоспоживання на душу населення на рівні, який в основному визначається клімато-географічними факторами країн;

2) неухильне і практично лінійне зниження з часом вуглецевої інтенсивності світової енергетики (кількість діоксиду вуглецю, що припадає на одиницю споживання енергії) в результаті змін структури паливно-енергетичного балансу, спостерігається вже більше ста років (перехід від вугілля до нафти, газу і останнім часом - до збільшення обсягів поновлюваних енергоресурсів).

Остання тенденція призводить, як зазначено в [62], до зниження темпів зростання антропогенного впливу на кліматичну систему і тому слід очікувати досить помірних змін складу атмосфери і клімату планети.

Сильні країни світу цього (G7, G20) на кліматичних самітах, при наявності політичної волі, можуть впливати на антропогенні фактори глобального потепління. Впливати на зміни клімату внаслідок сонячно-земної взаємодії надзвичайно важко. Але до наслідків спільної дії обох факторів необхідно розробляти заходи адаптації до можливих природних змін.

Автори висловлюють подяку доктору географічних наук Бойченко С.Г. за корисні дискусії при написанні цієї статті.

Фрагментарно дана стаття написана в рамках виконання: цільової комплексної міждисциплінарної програми наукових досліджень НАН України з розробки наукових основ раціонального використання природно-ресурсного потенціалу та сталого розвитку і цільової програми наукових досліджень НАН України «Інтелектуальна екологічно безпечна енергетика з традиційними та відновлюваними джерелами енергії».

#### Список використаної літератури

1. Мировая энергетика будущего — время действовать. Документы МИРЭС 2000. Мировой энергетический Совет. Справочный перевод. 2000. 175 с.
2. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). Интернет-ресурс: [https://archive.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports.shtml](https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml).
3. Флавін К. та ін. Стан світу 2002. Пер. з англійської: ВГО «Україна. Порядок денний на ХХІ століття та інститут сталого розвитку.» - Київ, Інтелсфера. 2002. 289 с.
4. Терешин А.Г., Клименко А.В., Клименко В.В. Золотой век газа и его влияние на мировую энергетику, глобальный цикл углерода и климат. *Теплоэнергетика*. 2015. №5. С. 3-13.
5. Демерчян К.К., Демерчян К.С., Кондратьев К.Я. Темп роста концентрации CO<sub>2</sub> и уточнение его прогнозных оценок. *Известия РАН. Энергетика*. 2001. №1. С. 3-35.
6. Елисеев А.В. Глобальный цикл CO<sub>2</sub>// Eliseev\_A\_V\_theses\_26042017. Pdf
7. Клименко В.В., Терешин А.Г. Мировая энергетика и глобальный климат в ХХІ веке в контексте исторических тенденций: Пределы роста. Универсальная и глобальная история. Эволюция Вселенной, Земли, жизни, общества. Под ред. Л.Е. Гринина, И.В. Ильина, А.В. Коротаева. Волгоград: Учитель, 2012. — С. 608-621. - 688 с.
8. Интернет-ресурс: <https://www.segodnya.ua/world/wnews/temperatura-na-planete-podnyalas-na-1-1-0s-v-oon-byut-trevogu-1335122.html>
9. Аржанов М.М. и др. Оценка климатических изменений в Северном полушарии в ХХІ веке при альтернативных сценариях антропогенного воздействия. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48. № 6. С. 643- 654.
10. Демерчян К.С., Демерчян К.К., Данилевич Я.Б., Кондратьев К.Я. Глобальное потепление, энергетика и геополитика. *Известия РАН. Энергетика*. 2002. №3. С. 18-46.
11. Демерчян К.С., Кондратьев К.Я. Научная обоснованность прогнозов влияния энергетики на климат. *Известия РАН. Энергетика*. 1999. №6. С. 3-46.
12. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. Энергетика и климат на рубеже веков: прогнозы и реальность. *Теплоэнергетика*. 2001. №10. С. 61-66.
13. Базеев Е.Т. Киотский протокол: препятствия на пути реализации (к вопросу неоднозначности прогнозных оценок изменения концентрации парниковых газов в атмосфере Земли и повышения приземной температуры. Обзор). Труды международного энергоэкологического конгресса «Энергетика. Экология. Человек». 27-28 марта 2003 года. Киев. 2003. С. 67-71.



14. Базеев Е.Т., Диденко В.М. Парниковый эффект и теплоэнергетика Украины. Політичні, економічні та екологічні проблеми енергетичної безпеки і транспортування енергоресурсів в Україні. Збірник наукових праць міжнародної науково-практичної конференції. 24-26 жовтня 2000 р., м. Київ. РВПС НАН України, 2001. 268 с.
15. Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики. *Успехи физических наук*. 2000. Т. 170, № 4. С. 419-445.
16. Иванов В., Богуславський С., Совга О., Жоров В. Світовий океан як стабілізатор клімату Землі. *Вісник НАН України*. 2004. №3. С.32-37.
17. Лосев К.С. Парадоксы борьбы с глобальным потеплением. *Вестник РАН*. 2009. Т. 79, №1. С 36-40.
18. Большаков В.А., Капица А.П. Уроки развития орбитальной теории климата. *Вестник РАН*. 2011. Т. 81, № 7. С. 603-612.
19. Замолодчиков Д.Г. Естественная и антропогенная концепции современного потепления. *Вестник РАН*. 2013. Т. 83, №3. С. 227-235.
20. Корабльєв О.И. Марс и Венера: разные судьбы планет земной группы. *Вестник РАН*. 2016. Т. 86, № 7. С 587-599.
21. Сорохтин О.Г. Эволюция климата Земли и происхождение ледовых эпох. *Вестник РАН*. 2006. Т. 76. №8. С. 699-706.
22. Шестопапов В.М., Лукин А.Е., Згонник В.А., Макаренко А.Н., Ларин Н.В., Богуславський В.М. Очерки дегазации Земли. Київ, 2018. 632 с.
23. Николаев А.В. Проблемы геотомографии. Москва, 1997. С. 4-38.
24. Усенко О.В. Формирование расплавов. Геодинамический процесс и физико-химические взаимодействия. Київ, 2014. 237 с.
25. Авакян С.В. Супрамолекулярная физика окружающей среды: климатические и биофизические эффекты. *Вестник РАН*. 2017. Т. 87, № 5. С. 456-466.
26. Барцев С.И., Белоліпецький П.В., Дегерменджи А.Г. и др. Новый взгляд на динамику климата Земли. *Вестник РАН*. 2016. Т. 86, № 3. С. 244-251.
27. Кармазиненко С.П., Кураєва І.В., Самчук А.І., Войтюк Ю.Ю., Манічев В.Й. Важкі метали у компонентах навколишнього середовища м. Маріуполь (еколого-геохімічні аспекти). Київ, 2014. 168 с.
28. Вовк В.В., Егорова Л.В., Трошичев О.А. Связь атмосферных характеристик в Антарктиде с факторами космической погоды. *Геомагнетизм и аэрономия* 2008. Т. 48, №4. С 561-565.
29. Волошук В., Срипник М. Глобальний парниковий ефект і кліматичні умови України. *Вісник НАН України*. 1993. №9. С. 43-46.
30. Ліпінський В.М. Глобальна зміна клімату та її відгук в динаміці клімату України. Матеріали міжнародної конференції «Інвестиції та зміна клімату: можливості для України, 10–12 липня 2002 р. — К.: Інвестиції з питань зміни клімату. 2002. С. 177-185.
31. Підвищення стійкості до зміни клімату сільськогосподарського сектору Півдня України. Сентендре, Угорщина. Regional environmental center. Жовтень 2015. 73 с.
32. Організаційно-економічні механізми модернізації теплоенергетики України (під ред. Баска Б.І.). Київ, 2015. 338 с.
33. Сам собі пан. *Вісник української мережі "Енергоефективні міста"*. 2005. №3-4. С. 17.
34. Башмаков И. Повышение энергоэффективности - главный энергетический ресурс (презентация). <https://www.cenef.ru/file/Stady.ppt>.
35. Закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. №261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации".
36. Башмаков И. Закон повышающейся энергоэффективности. *Енергоінформ*. 2002. №27 (158).
37. Патон Б.Є., Долінський А.А., Геєць В.М., Кухар В.П., Басок Б.І., Базєєв Є.Т., Подолець Р.З. Пріоритети національної стратегії теплозабезпечення населених пунктів України. *Вісник НАН України*. 2014. №9. С. 29-47.
38. Басок Б.І., Новосельцев О.В., Дубовський С.В., Базєєв Є.Т. Модернізація систем теплозабезпечення населених пунктів України (теплофізика, енергоефективність, енергоекономіка, екологія). Київ, 2018. ТОВ. «Видавничий дім «Калита». 406 с.
39. Карп И.Н., Никитин Е.Е. Пути решения проблем коммунальной энергетики. *ЖКХ Украины*. 2011. №6. С. 16-22.
40. Сігал О.І., Бикоріз Є.Й. Екологічні аспекти процесів спалювання органічних палив. /Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: Сборник трудов. Институт промышленной экологии. К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2016. С. 142-148.

41. Сігал О.І., Падерно Д.Ю., Павлюк Н.Ю., Сафьянц А.С., Бикоріз Є.Й., Плашихин С.В. Скорочення споживання природного газу та зниження викидів шкідливих речовин з продуктами спалювання в комунальній теплоенергетиці. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. Т. 41, №2. С. 54-63.
42. Мацевитый Ю.М., Шубенко А.Л., Канило П.М., Соловей В.В. Энергия, экология и глобальное потепление климата. *Доповіді НАН України*. 2016. №12. С. 102-108.
43. Сорока Б.С. Влияние климатических факторов на теплотехнические характеристики, энергетическую эффективность и оценка экологических последствий сжигания газового топлива. *Альтернативная энергетика и экология*. 2017. №04-06 (216-218). С. 116-129.
44. Сорока Б.С. Влажное горение — современное направление экологически чистого сжигания топлива и решение проблемы устойчивого развития энергетики. *Альтернативная энергетика и экология*. 2018. №25-30 (273-278). С. 97-117.
45. Вольчин І.А., Гапонич Л.С. Викиди діоксиду вуглецю на українських вугільних теплових електростанціях. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2018. Т. 24, № 6. С. 131-142. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnuokht\\_2018\\_24\\_6\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnuokht_2018_24_6_17).
46. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Дослідження ефективності зниження оксидів азоту при застосуванні вдосконаленого методу триступеневого спалювання вугілля з використанням вугілля в якості палива допалення. *Промышленная теплотехника*. 2017. Т. 39. №5. С. 91–96.
47. Бойченко С.Г. Напівемпіричні моделі та сценарії глобальних і регіональних змін клімату. НАН України, Ін-т геофізики ім. С.І. Субботіна. Київ: Наук. думка, 2008. 310 с.
48. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П., Буцьо З.Ю. Національні пріоритети енергоефективності'2010. Київ, Текст. 2010. 580 с.
49. Кулик М.М., Горбулін В.П., Кириленко О.В. Концептуальні підходи до розвитку енергетики України (аналітичні матеріали). Київ: Інститут загальної енергетики НАН України, 2017. 78 с.
50. Саух С.Є. Проблеми математичного моделювання конкурентної рівноваги на ринку електроенергії. *Вісник НАН України*. 2018. №4. С. 53-67.
51. Долінський А.А., Басок Б.І., Базєєв Є.Т., Піроженко І.А. Комунальна теплоенергетика України: стан, проблеми, шляхи модернізації. У 2-х томах. Київ, 2007. 827 с.
52. Басок Б.І., Базєєв Є.Т. Инновационные технологии для зданий — приоритет повышения энергоэффективности в Украине. *Промышленная теплотехника*. 2017. Т. 39, №4. С. 61-67.
53. Интернет-ресурс: <https://www.unian.net/ecology/10749615-franciya-obyavila-klimaticheskoe-chrezvychaynoe-polozhenie.html>
54. Интернет-ресурс: <https://www.rbc.ua/rus/news/gensek-oon-klimaticheskoy-konferentsii-nazval-1575336213.html>.
55. Интернет-ресурс: <https://hightech.fm/2019/11/30/euro-eco>.
56. Матишев Г.Г., Дженюк С.Л., Моисеев Д.В. Климат и большие экосистемы Арктики *Вестник РАН*. 2017. Т. 87, №2. С. 110-120.
57. Сергиенко В.И. Выступление на общем собрании РАН (стенограмма). *Вестник РАН*. 2011. Т.81, № 10. С. 893.
58. Фомин В.М., Молодин В.И., Ерминов В.Д. Междисциплинарные исследования — главный тренд развития науки в России. *Вестник РАН*. 2015. Т. 85, №11. С. 993-1004.
59. Поппер К. Нищета историцизма. *Вопросы философии*. 1992. №9. С. 22-48.
60. Харре Р. Социальная эпистемология: передача знаний посредством речи. *Вопросы философии*. 1992. №9. С. 49–60.
61. Миронов Н. Меры и вызовы глобальной энергетической безопасности. *Мировая энергетика*. 2007. №4. С. 50-51.
62. Клименко В.В. Опыт генетических прогнозов мировой энергетики: можем ли мы предвидеть далёкое будущее. *Доклады академии наук. Энергетика*. 2014. Т. 458, №4. С. 415-418.

**B. Basok**, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-8935-4248

**Ye. Basyev**, Cand. Sc. (Eng.), SRF, ORCID 0000-0003-4292-1505

**Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine**

## **PROBLEMS OF PHYSICS AND GEOPOLITICS IN GLOBAL WARMING**

*Introduction. Global warming and so-called the “greenhouse effect” is one of the most discussed problems of physics and geopolitics, which has caused protest environmental movements in the world.*

**Problem Statement.** Widely discussed are both anthropogenic (the emission of greenhouse gases into the atmosphere) and the natural concepts of global warming with the dramatic effects of climate change on the planet and individual regions.

**Purpose.** Evaluate the state of the problem, to present the results of research and measures to possible reduction of the greenhouse effect.

**Materials and Methods.** Authoritative literary sources were used to analyze anthropogenic and natural factors of global warming, including an explanation of the processes from physics that manifest themselves during solar-geomagnetic activity.

**Results.** Ways and directions of increasing the efficiency of energy use to reduce greenhouse gas emissions are identified.

**Conclusions.** The greatest potential for increasing energy efficiency in the use of energy resources, and thereby reducing greenhouse gas emissions, lies in the heat supply sector of the country's housing and municipal sector. Prospects for further research are related to the development and implementation of organizational, economic and technological innovations in this energy sector.

**Keywords:** anthropogenic impact, global warming, energy efficiency, climate change, greenhouse gas.

## REFERENCES

1. World energy of the future - time to act. *Documents WEC 2000*. World Energy Council. Reference translation. (2000) [in Russian].
2. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4) URL: [https://archive.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports.shtml](https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml)
3. Flavin K. et al. (2002). *State of the World 2002*. Translated from English: VGO «Ukraine. The Agenda for the 21st Century and the Institute for Sustainable Development». Kyiv, Intelsfera [in Ukrainian].
4. Tereshin A.G., Klimenko A.V., Klimenko V.V. (2015). The golden age of gas and its impact on global energy, the global carbon cycle and climate. *Thermal Engineering*, №5, 3-13 [in Russian].
5. Demerchyan K.K., Demerchyan K.S., Kondratiev K.Ya. (2001). The growth rate of CO<sub>2</sub> concentration and the refinement of its forecast estimates. *News of the Russian Academy of Sciences. Energy*, №1, 3-35 [in Russian].
6. Eliseev A.V. *Global CO<sub>2</sub> cycle*. Eliseev\_A\_V\_theses\_26042017. Pdf [in Russian].
7. Klimenko V.V., Tereshin A.G. (2012). *World energy and the global climate in the 21st century in the context of historical trends: The limits of growth. Universal and global history. The evolution of the universe, earth, life, society*. Ed. L.E. Grinin, I.V. Ilyin, A.V. Korotaev. Volgograd: Teacher, 608-621 [in Russian].
8. Internet resource URL: <https://www.segodnya.ua/world/wnews/temperatura-na-planete-podnyalas-na-1-1-0s-v-oon-byut-trevogu-1335122.html>
9. Arzhanov M.M. et al. (2012). Climate change assessment in the Northern Hemisphere in the 21st century under alternative scenarios of anthropogenic impact. *News of the Russian Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and the ocean*. V. 48. № 6, 643- 654 [in Russian].
10. Demerchyan K.S., Demerchyan K.K., Danilevich Ya.B., Kondratiev K.Ya. (2002). Global warming, energy and geopolitics. *News of the Russian Academy of Sciences. Energy*, №3, 18-46 [in Russian].
11. Demerchyan K.S., Kondratiev K.Ya. (1999). The scientific validity of forecasts of the impact of energy on climate. *News of the Russian Academy of Sciences. Energy*, №6, 3-46 [in Russian].
12. Klimenko V.V., Klimenko A.V., Tereshin A.G. (2001). Energy and climate at the turn of the century: forecasts and reality. *Thermal Engineering*, №10, 61-66 [in Russian].
13. Baseyev E.T. (2003). Kyoto Protocol: obstacles to implementation (to the question of the ambiguity of forecast estimates of changes in the concentration of greenhouse gases in the Earth's atmosphere and an increase in surface temperature. Overview). *Proceedings of the International Energy-Ecological Congress "Energy. Ecology. Human"*. March 27-28, 2003. Kiev, 67-71 [in Russian].
14. Baseyev E.T., Didenko V.M. (2001). Greenhouse effect and heat power of Ukraine. Political, economic and environmental problems of energy security and transportation of energy resources in Ukraine. *Collection of scientific papers of the international scientific-practical conference. October 24-26, 2000, Kyiv. RVPS of NAS of Ukraine* [in Russian].
15. Monin A.S., Shishkov Yu.A. (2000). Climate as a problem of physics. *Advances in physical sciences*. V. 170, № 4, 419-445 [in Russian].
16. Ivanov V., Boguslavsky S., Sovga O., Zhorov V. (2004). World Ocean as a stabilizer of the Earth's climate. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*. №3, 32-37 [in Ukrainian].
17. Losev K.S. (2009). Paradoxes of the fight against global warming. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. V. 79, №1, 36-40 [in Russian].
18. Bolshakov V.A., Kapitsa A.P. (2011). Lessons from the development of the orbital theory of climate. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. V. 81, № 7, 603-612 [in Russian].

19. Zamolodchikov D.G. (2013). Natural and anthropogenic concepts of modern warming. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. V. 83, №3, 227-235 [in Russian].
20. Korablev O.I. (2016). Mars and Venus: different fates of the planets of the earth group. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. V. 86, № 7, 587-599 [in Russian].
21. Sorokhtin O.G. (2006). The evolution of the Earth's climate and the origin of the ice eras. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. V. 76, №8, 699-706 [in Russian].
22. Shestopalov V.M., Lukin A.E., Zgonnik V.A., Makarenko A.N., Larin N.V., Boguslavsky V.M. (2018). *Essays on the degassing of the Earth*. Kyiv [in Russian].
23. Nikolaev A.V. (1997). *Problems of geotomography*. Moscow, 4-38. [in Russian].
24. Usenko O.V. (2014). The formation of melts. Geodynamic process and physicochemical interactions. Kyiv, [in Russian].
25. Avakyan S.V. (2017). Supramolecular environmental physics: climatic and biophysical effects. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. V. 87, № 5. 456-466 [in Russian].
26. Bartsev S.I., Belolipetskiy P.V., Degermendzhi A.G. et al. (2016). A new look at the dynamics of the Earth's climate. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. V. 86, № 3, 244-251 [in Russian].
27. Karmazinenko S.P., Kuraeva I.V., Samchuk A.I., Voityuk Yu.Yu., Manicheva V.I. (2014). *Heavy metals in environmental components. Mariupol (ecological and geochemical aspects)*. Kyiv [in Ukrainian].
28. Vovk V.V., Egorova L.V., Troshichev O.A. (2008). The relationship of atmospheric characteristics in Antarctica with space weather factors. *Geomagnetism and Aeronomy*. V. 48, №4, 561-565 [in Russian].
29. Voloschuk V., Sripnik M. (1993). Global greenhouse effect and climatic conditions of Ukraine. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*. №9, 43-46 [in Ukrainian].
30. Lipinskiy V.M. (2002). Global climate change and its response in the dynamics of Ukraine's climate. *Proceedings of the International Conference "Investment and Climate Change: Opportunities for Ukraine, July 10-12, 2002, Kyiv: Climate Change Investments*, 177-185 [in Ukrainian].
31. Increasing the climate resilience of the agricultural sector of the South of Ukraine. Szentendre, Hungary. Regional environmental center. October 2015 [in Ukrainian].
32. Basok B.I. (Ed.). (2015). *Organizational and economic mechanisms for modernization of the heat power industry of Ukraine*. Kyiv [in Ukrainian].
33. Mister himself. (2005). *Bulletin of the Ukrainian Network "Energy Efficient Cities"*. №3-4, p. 17 [in Ukrainian].
34. Bashmakov I. Improving energy efficiency - the main energy resource (presentation). URL: <https://www.cenef.ru/file/Stady.ppt> [in Russian].
35. The Law of the Russian Federation of November 23, 2009 No. 261-ФЗ "On energy conservation and on improving energy efficiency and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation" [in Russian].
36. Bashmakov I. (2002). The law of increasing energy efficiency. *Energoinform*. №27 (158) [in Russian].
37. Paton B.E., Dolinsky A.A., Geyets V.M., Kuhar V.P., Basok B.I., Baseyev E.T., Podolets R.Z. (2014). Priorities of the national strategy of heat supply of settlements of Ukraine. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*. №9, 29-47.
38. Basok B.I., Novoseltsev O.V., Dubovsky S.V., Baseyev E.T. (2018). *Modernization of district heating systems of settlements of Ukraine (thermal physics, energy efficiency, energy economy, ecology)*. LLC «Kalita» Publishing House. Kyiv [in Ukrainian].
39. Karp I.N., Nikitin E.E. (2011). Ways to solve the problems of public utilities. *Housing and communal services of Ukraine*. №6, 16-22 [in Russian].
40. Segal O.I., Bykoriz E.Y. (2016). Environmental aspects of organic fuel combustion processes. *Problems of ecology and exploitation of energy objects: Collection of works. Institute of Industrial Ecology*. Kyiv: IPC ALCON NAS of Ukraine. 142-148 [in Ukrainian].
41. Segal O.I., Paderno D.Yu., Pavlyuk N.Yu., Safyants AS, Bykoriz E.Y., Plashikhin S.V. (2019). Reducing the consumption of natural gas and reducing emissions of harmful substances from combustion products in municipal heating. *Thermophysics and thermal power engineering*. V. 41, №2, 54-63 [in Ukrainian].
42. Matsevity Yu.M., Shubenko A.L., Kanilo P.M., Solovey V.V. (2016). Energy, ecology and global warming. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*. №12, 102-108 [in Russian].
43. Soroka B.S. (2017). Influence of climatic factors on heat engineering characteristics, energy efficiency and environmental impact assessment of gas fuel combustion. *Alternative energy and ecology*. №04-06 (216-218), 116-129 [in Russian].
44. Soroka B.S. (2018). Wet burning is a modern direction of environmentally friendly fuel combustion and a solution to the problem of sustainable energy development. *Alternative energy and ecology*. №25-30 (273-278), 97-117 [in Russian].

45. Volchin I.A., Gaponich L.S. (2018). Carbon dioxide emissions from Ukrainian coal-fired thermal power plants. *Scientific works of the National University of Food Technology*. V. 24, № 6, 131-142. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht\\_2018\\_24\\_6\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2018_24_6_17) [in Ukrainian].
46. Kobzar S.G., Halatov A.A. (2017) Investigation reduction efficiency of nitrogen oxides at an improved method for applying a three-stage burning coal using coal as fuel reburning. *Industrial Heat Engineering.*, V. 39, № 5, 91-96 [in Ukrainian].
47. Boychenko S. (2008). *Semi-empirical models and scenarios of global and regional climate change*. NAS of Ukraine, S.I. Subbotin Institute of Geophysics. Kyiv: Naukova Dumka [in Ukrainian].
48. Stogniy B.S., Kirilenko O.V., Prahovnik A.V., Denisyuk S.P., Butzo Z.Y. (2010). *National energy efficiency priorities'2010*. Kyiv, Text [in Ukrainian].
49. Kulyk M.M., Gorbulin V.P., Kirilenko A.V. (2017). Conceptual approaches to the development of energy in Ukraine (analytical materials). Kyiv: Institute of General Energy of the NAS of Ukraine [in Ukrainian].
50. Saukh S.E. (2018). Problems of mathematical modeling of competitive equilibrium in the electricity market. *Bulletin of the NAS of Ukraine*. №4, 53-67[in Ukrainian].
51. Dolinsky A.A., Basok B.I., Bazeyev E.T., Pirozhenko I.A. (2007). *Communal heat power engineering of Ukraine: state, problems, ways of modernization*. In 2 volumes. Kyiv [in Ukrainian].
52. Basok B.I., Bazeyev E.T. (2017). Innovative technologies for buildings are a priority for improving energy efficiency in Ukraine. *Industrial heat engineering*. V. 39, №4, 61-67 [in Russian].
53. Internet resource URL: <https://www.unian.net/ecology/10749615-franciya-obyavila-klimaticheskoe-chrezvychaynoe-polozhenie.html>
54. Internet resource URL: <https://www.rbc.ua/rus/news/gensek-oon-klimaticheskoy-konferentsii-nazval-1575336213.html>.
55. Internet resource URL: <https://hightech.fm/2019/11/30/euro-eco>.
56. Matishev G.G., Dzhenyuk S.L., Moiseev D.V. (2017). Climate and large ecosystems of the Arctic. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. V. 87, №2. 110-120 [in Russian].
57. Sergienko V.I. (2011). Speech at the general meeting of the RAS (transcript). *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. V. 81, № 10, 893 [in Russian].
58. Fomin V.M., Molodin V.I., Erminov V.D. (2015). Interdisciplinary research is the main trend in the development of science in Russia. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. V. 85, №11, 993-1004 [in Russian].
59. Popper K. (1992). The Poverty of Historicism. *Problems of Philosophy*. №9, 22-48 [in Russian].
60. Harre R. (1992). Social epistemology: knowledge transfer through speech. *Problems of Philosophy*. №9, 49-60 [in Russian].
61. Mironov N. (2007). Measures and challenges of global energy security. *World energy*. №4, 50-51.
62. Klimenko V.V. The experience of genetic predictions of world energy: can we foresee the distant future. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Energy*. 2014. V. 458, №4, 415-418.

Надійшла 01.05.2021

Received 01.05.2021

# ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

УДК 602.6:578/579:502/504

**І.О. Шкільнюк**, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-8808-3570  
**С.В. Бойченко**, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-2489-4980  
**С.Й. Шаманський**, д-р техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-6215-3438  
**О.О. Вовк**, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-7531-9847  
Український науково-дослідний та навчальний центр  
хіммотології та сертифікації ПММ і ТР,  
Національний авіаційний університет,  
Національний університет «Київський політехнічний інститут»

## ОЦІНЮВАННЯ ПОТЕНЦІАЛУ МІКРООРГАНІЗМІВ ДО БІОДЕСТРУКЦІЇ МОТОРНИХ ПАЛИВ З РІЗНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Транспортна галузь характеризується значним впливом на довкілля відходами своєї діяльності, зокрема моторних палив. Найбільш масовими забруднювачами ґрунтів та водойм, особливо міських, є вуглеводні, особливо токсичні ароматичні вуглеводні. Присутність цих токсикантів погіршує екологію та негативно впливає на життя та здоров'я живих організмів. Тому характеристика впливу моторних палив на життєдіяльність мікроорганізмів з біодеструкційним потенціалом важлива для керованого знешкодження відходів транспортної інфраструктури. У статті розглянуто можливості використання різних мікроорганізмів для очищення ґрунтів і водойм від забруднення моторними паливами з різними характеристиками шляхом біодеструкції. Досліджено також біодеструкційний потенціал автентичних для довкілля мікроорганізмів та відновлювальних процедур у випадку промислового забруднення довкілля нафтопродуктами. Дана праця підготовлена у рамках виконання проекту «Експериментально-аналітичні засади гарантування безпеки людини та суспільства удосконаленням технологій поводження з відходами у техносфері» за підтримки Національного фонду досліджень України у межах грантового проекту № 2020.01/0242.

**Ключові слова:** моторне паливо, мікроорганізми, біодеструкція, вуглеводні, біоремедіація, навколишнє середовище.

### Вступ

Усі об'єкти матеріального світу, зокрема промислові матеріали підлягають мікробіологічному ураженню. Окрім негативного, таке ураження може мати позитивний ефект. Завдяки йому різні види відходів, у тому числі відходів промисловості можуть бути утилізовані мікробіологічною деструкцією (рис. 1).



Рис. 1. Відходи промислової продукції, що придатні до мікробіологічної деструкції.

Досвід свідчить, що паливно-мастильні матеріали (ПММ) – це одна з найбільш нестійких до біоуражень продукція. Мікробіологічній деструкції підлягають практично усі види ПММ: моторні палива, оливи, мастила, мастильно-холодильні рідини, бітуми [1–3].

Оскільки до складу палив (гасу та дизельного палива) входять багато легкозасвоєваних компонентів, у процесі біодеструкції паливо може виступати поживним субстратом (джерелом вуглецю та енергії) для цілого ряду мікроорганізмів. На сьогодні, з багатьох методів, що дозволяють зменшити концентрацію нафти та нафтопродуктів у навколишньому природному середовищі, найбільш перспективними вважаються біологічні. Інтенсивність процесів очищення визначається наявністю у середовищі окиснюючої вуглеводні мікрофлори, здатної до біодеструкції нафтопродуктів. Представники такої мікрофлори широко розповсюджені у природі. Вони здатні до окиснювання будь-яких органічних сполук нафтового ряду, завдяки чому, вуглець з нафти може залучатися до біохімічного циклу. Швидкість і повнота утилізації нафтопродуктів у ґрунтах великою мірою залежить від чисельності та видового складу мікрофлори.

Проте, певні властивості моторних палив, таких, як склад, наявність вологи та домішок, наявність біокомпонентів (додатків рослинного походження), інші властивості, можуть по різному впливати на здатність до мікроорганізмів до розмноження.

#### **Мета та завдання**

Метою даної роботи є дослідження можливостей використання природних мікроорганізмів для очищення ґрунтів та водойм від забруднення моторними паливами, що мають зрізні характеристики, шляхом біодеструкції, а також дослідження біодеструкційного потенціалу автентичних для довкілля мікроорганізмів та відновлювальних процедур у випадку промислового забруднення довкілля нафтопродуктами.

#### **Матеріал і результати досліджень**

На сьогодні відомо більше двохсот видів мікроорганізмів, у тому числі 30 сімейств, які можуть використовувати вуглеводні як єдине джерело вуглецю та енергії. До них входять бактерії, дріжджі та гриби [4–5]. На процес хімічного і біологічного перетворення вуглеводнів нафти у ґрунтах впливає багато факторів. Перш за все це концентрація і склад нафтового забруднення, кількісний та якісний склад ґрунтової мікрофлори, мінеральний та органічний склад ґрунтів, температура, вологість, аерація та кислотність середовища.

Відомо, що при застосуванні асоціацій мікроорганізмів біодеградація нафтопродуктів відбувається повніше і за менші терміни, ніж при використанні індивідуальних мікроорганізмів [6]. Цей факт пояснюється тим, що, володіючи різними ферментативними системами, асоціації з бактерій- деструкторів здатні витягувати нафтопродукти з субстрату з великою ефективністю [7]. Крім того, включення декількох монокультур в асоціації забезпечує розширення спектра окислення, велику варіабельність біоагентів в різних умовах.

Активний розвиток мікроскопічних грибів (*Hormoconis resinae*, його типи. *Penicillium*, *Aspergillus fumigatus*, *Raecilomyces variotii* та ін.) у моторних паливах та паливних системах визнано найбільш небезпечними. Найбільш активним руйнівником палива донедавна було визнано мікроскопічні гриби *Cladosporium resinae* (сучасна назва *Hormoconis resinae* або *Amorphoteca resinae*). Сьогодні ця група класифікується як гриби *Monascus floridanus*, яким властива здатність швидко розвиватися зокрема в авіаційному паливі. Гриби мають деякі морфологічні, фізіологічні та генетичні особливості, завдяки чому вони займають домінуюче становище серед мікроорганізмів, що завдають біологічну шкоду паливу.

Наявність води є критичним чинником розвитку та метаболічної активності мікроорганізмів в вуглеводневих середовищах. Як зазначено вище, життєдіяльність мікроорганізмів залежить від води, так як вода складає 75-90% маси вегетативної клітини [4].

Волога у паливі також утворюється з конденсату через перепад температур. Під час охолодження палива вода конденсується і на стінках та дні баків утворюються краплини вільної води [8].

Гас та дизельне паливо – гігроскопічні види нафтової продукції. Під впливом зовнішніх чинників паливо здатне до поглинання вологи, яка може переходити з палива в навколишнє середовище або утворювати емульсію води у паливі. З часом краплини емульсійної води зливаються під впливом гравітаційних сил та утворюють відстійну воду. Розчинність води у паливі визначається багатьма чинниками, основні з яких – це температура, тиск, відносна вологість повітря, з яким зустрічається паливо, та вуглеводневий склад палива.

Кількість розчиненої води пов'язана з довжиною вуглеводневого ланцюга, наявністю ароматичних структур та температурою. Парафіни з коротким ланцюгом розчиняють більше води ніж парафіни з довшим ланцюгом. Керосин здатний до мікробіологічного ураження, зокрема, через властивість поглинати воду [5].

Вода, що наявна в зовнішньому середовищі, може бути доступною або недоступною. Встановлено, що ступінь доступності води для мікроорганізмів визначають показником активності води, який характеризує ступінь зв'язаності її молекул. Для чистої вільної води цей показник дорівнює одиниці, а для води, що знаходиться в певній взаємодії з іншими речовинами, менше одиниці. Отже, мікроорганізми можуть зростати в середовищах з коефіцієнтом доступності води в межах 0,6-0,9 [9].

Після розмноження мікроорганізми в процесі біодеструкції вуглеводнів палив починають виділяти воду як один з кінцевих продуктів свого метаболізму. За результатами досліджень вчених, наприклад, *Hormoconis resiniae* в процесі чотиририжневого розвитку може виділяти 0,94 г води на 1 л палива.

Деякі бактерії та спори грибів здатні виживати в зневодненому паливі від декількох місяців до декількох років (наприклад, *Hormoconis resiniae*). Виконі дослідження [10] щодо виживання *Ps. aeruginosa* та спор гриба *Hormoconis resiniae* в різних паливах без водної фази за температур 18-20 °С, 28-30°C та 37°C показали, що *Ps. aeruginosa* не розвивається після висівання з палив через 1–2 тижні, а спори *Hormoconis resiniae* залишаються життєздатними у більшості палив тривалий час. Результати дослідження життєздатності грибів без водної фази наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Результати дослідження життєздатності грибів без водної фази

Паливо	Термін зберігання життєздатності, місяці		
	18-20 °С	28-30 °С	37 °С
Гас	20	18	10
Дизельне паливо	20	20	20

Встановлено, що використання деяких додатків для покращення експлуатаційних властивостей палив може інтенсифікувати розвиток мікроорганізмів-нафтодеструкторів, так як містить поживні елементи.

Азот, сірка, фосфор, калій, магній, кальцій, залізо, селен, цинк – це основні неорганічні поживні речовини, необхідні для розвитку та метаболізму мікроорганізмів-нафтодеструкторів [11]. Хлорид натрію, вольфрам та нікель можуть бути теж необхідні мікроорганізмам. Вода, пил та паливні добавки можуть забезпечувати наявність таких поживних речовин.

Обмеження щодо окислення вуглеводнів мікроорганізмами-нафтодеструкторами пов'язані з розчинністю вуглеводнів у воді. Потрапляння поживного субстрату всередину клітини можливе з стану істинного розчину або під час безпосереднього контакту з ним [12].

*Органічне середовище.* Нафтопродукти містять достатню кількість органічних поживних речовин для розвитку мікроорганізмів-нафтодеструкторів. Мікроорганізми, як правило, краще споживають низькомолекулярні (до C<sub>18</sub>) аліфатичні вуглеводні з прямими ланцюгами. Здатність нафтопродуктів до біодеструкції має тенденцію збільшуватися зворотно пропорційно до вмісту ароматичних сполук та температури дистиляції. Тобто, середньодистилятні палива та бензини особливо схильні до біодеструкції та мають низький рівень біологічної стійкості [2, 5].

Вони містять вуглеводні різних класів, гетеро атомні сполуки та неорганічні домішки. Вуглеводневе паливо складається з різних класів вуглеводнів [5], серед яких найпоширенішими є парафіни. У табл. 2 наведено груповий вуглеводневий склад деяких палив.

Таблиця 2. Груповий вуглеводневий склад деяких палив

Паливо	Груповий вуглеводневий склад, %			
	парафінові	олефінові	нафтонові	ароматичні
ТС-1	42–52	1,1–2	30–49	11–21
РТ	53–58	0,2–0,3	25–30	12–22
Дизельне паливо	10–45	0,5–1,5	10–20	15–30

Результати досліджень свідчать, парафіни є найбільш нестійким до мікробіологічного ураження класом вуглеводнів, особливо парафіни нормальної будови. У табл. 3 наведено класифікацію здатності вуглеводнів до біодеструкції.

Здатність до біологічної деструкції класів вуглеводнів залежить від фізіологічних властивостей конкретного мікроорганізму, зокрема від здатності до адаптованості його ферментативного апарату до умов середовища.

Таким чином, моторні палива складаються переважно з високочутливих та чутливих до мікробіологічного ураження вуглеводнів.



Відомо, що процесу ферментативного окислення підлягають вуглеводні з середньою довжиною ланцюга (C<sub>5</sub> – C<sub>15</sub>), в свою чергу легкі *n*-алкани здатні поглинати лише деякі види бактерій (наприклад, *Pseudomonas*), так як вони розчиняють ліпіди бактеріальних клітин і викликають розчинення цитоплазматичної мембрани [9, 12].









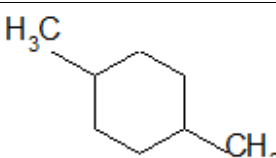
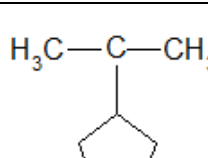
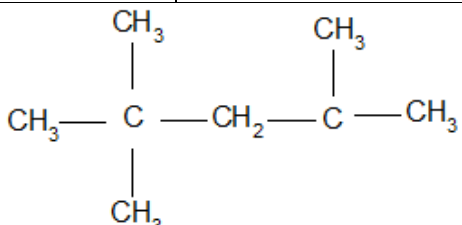
Таблиця 3. Класифікація здатності вуглеводнів до біодеструкції

Група	Відношення до впливу мікроорганізмів	Ступінь біодеструкції, % до вхідному вмісту	Вуглеводні
I	Високочутливі	80-100	Н-алкани, ізо-алкани
II	Чутливі	60-80	Циклани з 6, 1, 5, 2 кільцями, S-ароматика, моноароматика
III	Помірночутливі	45-60	Циклоалкани з 3 та 4 кільцями, триароматичні
IV	Стійкі	30-45	Тетраароматичні, стерани, тритерпани, нафтоароматичні
V	Високостійкі	0-30	Пентаароматичні, асфальтени, смоли

Таким чином, існує певна залежність у відношенні довжини бокового ланцюга до ступеня мікробіологічного ураження. Усі парафінові вуглеводні підлягають біодеструкції, однак ізооктан (з розгалуженою структурою) лишається стійким до дії мікроорганізмів.

Метициклопентан та метициклогексан піддаються біоураженню, проте етилциклопентан, пропілциклопентан та циклогексан з подібними замісниками піддаються мікробіологічному ураженню повністю. У табл. 4 наведено результати дослідження здатності до біоураження нафтенів в залежності від довжини бічного ланцюга.

Таблиця 4. Здатність до біоураження нафтенів в залежності від довжини бічного ланцюга

			
1 бал	4 бали	5 балів	5 балів
			
0 балів	4 бали	5 балів	5 балів
			
0 балів	1 бал	1 бал	

Ароматичні вуглеводні більш стійкіші до мікробіологічної деструкції, ніж парафіни та олефіни [5, 13]. Більшість ароматичних вуглеводнів є фунгіцидами по відношенню до мікроорганізмів, вони порушують пропускну здатність мембран клітин мікроорганізмів, інгібують синтез білка та хітину. Незважаючи на високу токсичність даної групи вуглеводнів, все ж існують мікроорганізми здатні використовувати ці сполуки в якості джерела живлення.

Дослідження свідчать [14], що замісники у бензольному ядрі можуть слугувати джерелом карбону й енергії чи джерелом нітрогену для мікроорганізмів, які не здатні руйнувати бензольне кільце. На рис. 2

наведено загальну схему використання мікроорганізмами замісників у бензольному кільці. Бензоїл-КоА – найпоширеніша проміжна сполука, що утворюється унаслідок розкладання ароматичних молекул, що містять галогеновані, метоксильовані або карбонові бічні ланцюги. Бензоїл-КоА також є проміжною сполукою під час деградації моногідроксильованих ароматичних субстратів і деяких дигідроксильованих сполук, наприклад, катехолу. У результаті використання мікроорганізмами замісників у бензольному ядрі може видалятися ацильний бічний ланцюг, можуть відбуватися процеси деметоксильовання та гідролізу ефіру.

Наявність кисневмісних сполук у складі палив визначає аеробні і анаеробні шляхи біодеградації ароматичних сполук, що мають певні особливості. Різноманітні сполуки через велику кількість периферичних метаболічних шляхів трансформуються у декілька ключових сполук, що у подальшому, завдяки роботі подібних для різних груп мікроорганізмів метаболічних шляхів, ведуть до центрального метаболізму клітини [2, 5].

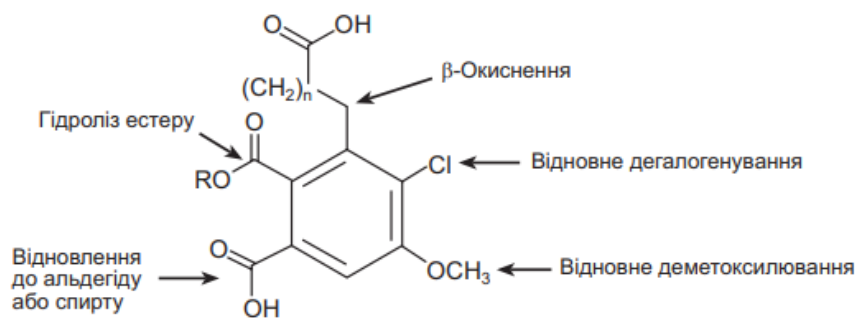


Рис. 2. Загальна схема використання мікроорганізмами замісників у бензольному кільці [14]

### Висновки

Мікробіологічна ремедіація є найбільш економічно вигідною та екологічно безпечною порівняно з іншими способами. Під біорекультивациєю мається на увазі активізація аборигенної ґрунтової мікрофлори, що сформувалася в умовах нафтового розливу, а так само внесення спеціально розроблених біопрепаратів. Розкладання нафти і нафтопродуктів в ґрунті в природних умовах - процес біохімічний. Інтенсивність деградації нафти знаходиться в прямій залежності від біологічної (ферментативної) активності ґрунту, загальної кількості ґрунтової мікрофлори і її фізіологічної активності. У даний час існують технології рекультивациі, що ґрунтуються на окиснючій активності мікроорганізмів. В основі їх лежить внесення у середовище або стимуляція аборигенної мікрофлори внесенням комплексу речовин. Ці заходи спрямовані на поліпшення повітряного, водного і мінерального режиму ґрунту.

Таким чином, співвідношення вуглеводнів, наявність води, кисневмісних сполук та неорганічних елементів у складі палив впливає на швидкість мікробіологічної деструкції нафтопродуктів. Цей чинник потрібно враховувати під час оцінки біологічної стабільності палив, а також для визначення біодеструкційного потенціалу автентичних для довкілля мікроорганізмів та відновлювальних процедур у випадку промислового забруднення довкілля цим видом продукції. Транспортна інфраструктура характеризується значним впливом на ґрунти та гідросферу відходами своєї діяльності, зокрема моторних палив. Тому чітке розуміння природи забруднювачів дає змогу використати біотичний чинник для біоремедіації ґрунтів та очищення водою.

### Список використаної літератури

1. Бойченко С. В., Шкільнюк І. О., Новак А. О. Систематизація видового складу мікробіологічної фази у складі авіаційних палив / Наукоємні технології. – 2014. – Том 21. № 1. 2014. – С. 5–9.
2. Литвиненко С.Н. Защита нефтепродуктов от действия микроорганизмов.–М.:Химия, 1977.–139 с.
3. Shkilniuk I., Boichenko S. Methodically organizational principles of biological stability providing of aviation fuel / Transactions of the Institute of aviation of Warsaw. – 2014. – № 4 (237). – P. 76–83
4. Пирог Т. П. Загальна мікробіологія: підручник.– К.: НУХТ. 2004. – 471 с.
5. Безпальчук О. В., Шкільнюк І. О., Бойченко С. В. Дослідження механізму біодеструкції авіаційних палив / Наукоємні технології. – 2013. – №1(17). – С. 44–49.
6. Wenderoth D. F., Rosenbrock P., Abraham W-R., Pieper D. H., Hofle M. G. Bacterial community dynamics during biostimulation and bioaugmentation experiments aiming at chlorobenzene degradation in groundwater // Microbial Ecology. 2003. Vol. 46, № 2. P. 161 – 176.
7. Андреева И. С., Емельянова И. К., Загребельный С. Н. Психротолерантные штаммы-нефтедеструкторы для биоремедиации почв и водной среды // Биотехнология. 2006. № 1. С. 46 – 48.

8. Svarovskaya L. and Altunina L. Biodestruction of hierarchical organized oil structures in conditions of watered oil layer / AIP Conference Proceedings. Volume 2167, Issue 1. 10.1063/1.5132225.

9. Genner C., Hill, E. C., Fuels and oils. In: A. H. Rose, (ed.), Economic Microbiology, Vol. 6, Microbial Biodeterioration, London, Academic Press. – 1981.– P. 260–306.

10. Егоров Н. С., Вишнякова Т. П., Гречушкина Н. Н., Власова И. Д., Мыльникова С. И., Азова Л. Г. Поражаемость микроорганизмами нефтяных дистиллятных топлив и их защита / Биологические повреждения строительных и промышленных материалов. – К.: Наукова думка. –1978. – С. 136-146

11. Козлова І.П., Радченко О.С., Степура Л.Г., Кондратюк Т.О. Геохімічна діяльність мікроорганізмів та її прикладні аспекти: навч. Посібник. – К.: Наук. думка, 2008. – 528 с.

12. Тимергазіна И. Ф., Переходова Л. С. К проблеме биологического окисления нефти и нефтепродуктов углеводородокисляющими микроорганизмами / Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2012. – № 1. – С. 2–17.

13. Патица В. П., Омелянець Т. Г., Гриник І. В. Екологія мікроорганізмів: посібник. – К.: Основа, 2007. – 192 с.

14. Н. С. Верхоляк, Т. Б. Перегятко. Використання ароматичних сполук бактеріями. Аеробна й анаеробна деструкція / Біологічні студії, 2018: 12(2); 135–156.

**I. Shkilniyk**, PhD, ORCID 0000-0002-8808-3570

**S. Boichenko**, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-2489-4980

**S. Shamanskyi**, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-6215-3438

**O. Vovk**, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-7531-9847

**Center of chemotology and certification of fuel, lubricants, liquids,**

**National aviation university,**

**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

## **ASSESSMENT OF THE MICROORGANISMS POTENTIAL FOR BIODESTRUCTION OF MOTOR FUELS WITH DIFFERENT CHARACTERISTICS**

*The transport industry is characterized by a significant impact on the environment by waste from its activities, including motor fuels. The most common pollutants in soils and water bodies, especially urban ones, are hydrocarbons, especially toxic aromatic hydrocarbons. The presence of these toxicants degrades the environment and adversely affects the life and health of living organisms. Therefore, the characterization of the impact of motor fuels on the activity of microorganisms with biodestructive potential is important for the controlled disposal of waste transport infrastructure. The article considers the possibility of using different microorganisms to clean soils and reservoirs from contamination by motor fuels with different characteristics by biodegradation. The biodestructive potential of environmentally friendly microorganisms and recovery procedures in case of industrial pollution of petroleum products have also been studied.*

**Keywords:** motor fuel, microorganisms, biodegradation, hydrocarbons, bioremediation, environment.

### **REFERENCES**

1. Boichenko S., Shkilniuk I. and Novak A. Systematization of the species composition of the microbiological phase in aviation fuels / Science-Based Technologies. 2014. Issue 21. No. 1. 2014. PP. 5-9.

2. Litvinenko S. Protection of petroleum products from the action of microorganisms. M.: Chemistry, 1977. 139 p.

3. Shkilniuk I. and Boichenko S. Methodically organizational principles of biological stability providing of aviation fuel / Transactions of the Institute of aviation of Warsaw. 2014. No. 4 (237). P. 76–83.

4. Pirog T. General microbiology: textbook.– K.: NUHT. 2004. 471 p.

5. Bezpalcchuk O., Shkilniuk I. and Boichenko S. Investigation of aviation fuels biodegradation mechanism / Science-Based Technologies. 2013. No. 1(17). PP. 44–49.

6. Wenderoth D. F., Rosenbrock P., Abraham W-R., Pieper D. H. and Hofle M. G. Bacterial community dynamics during biostimulation and bioaugmentation experiments aiming at chlorobenzene degradation in groundwater // Microbial Ecology. 2003. Vol. 46, No. 2. PP. 161–176.

7. Andreeva I., Emeljanova I. and Zagrebelnyi S. Psychrotolerant strains-oil destructors for bioremediation of soils and aquatic environment // Biotechnology. 2006. No. 1. PP. 46–48.

8. Svarovskaya L. and Altunina L. Biodestruction of hierarchical organized oil structures in conditions of watered oil layer / AIP Conference Proceedings. Volume 2167, Issue 1. 10.1063/1.5132225.

9. Genner C., Hill, E. C., Fuels and oils. In: A. H. Rose, (ed.), Economic Microbiology, Vol. 6, Microbial Biodeterioration, London, Academic Press. – 1981.– P. 260–306.

10. Egorov N., Vishnyakova T., Grechushkina N., Vlasova I., Mylnikova S. and Azova L. Microbial affectivity of petroleum distillate fuels and their protection / Biological damage to building and industrial materials. – K.: Naukova dumka. –1978. – PP. 136-146.

11. Kozlova I., Radchenko O., Stepura L. and Kondratiuk T. Geochemical activity of microorganisms and its applied aspects: handbook. – K.: Naukova dumka, 2008. – 528 p.

12. Timergazina I. and Perehodova L. On the problem of biological oxidation of oil and oil products by hydrocarbon-oxidizing microorganisms / Oil and Gas Geology. Theory and practice. 2012. No. 1. – PP. 2–17.

13. Patyka V. Omelianets. and Grinyk I. Ecology of microorganisms. K.: Osnova, 2007. 192 p.

14. Verholjak N. and Peretjatko T. Use of aromatic compounds by bacteria. Aerobic and anaerobic destruction / Biological studios. 2018. 12(2). PP. 135–156.

Надійшла 15.05.2021

Received 15.15.2021

В.П. Щокін, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-9709-1831  
О.В. Щокіна, ст. наук. співр., ORCID 0000-0002-0275-8646  
Науково-дослідний гірничорудний інститут  
Криворізького національного університету

## ЗАСТОСУВАННЯ ГУМАТОВОГО РЕАГЕНТУ ДЛЯ ПИЛОПРИГНІЧЕННЯ І ДЕГАЗАЦІЇ ПРИ МАСОВИХ ВИБУХАХ

*В роботі наведені результати дослідно-промислових випробувань ефективності застосування гуматового реагенту у внутрішніх та зовнішніх гідрозабійках для зниження пиловиділення та дегазації при проведенні масових вибухів у порівнянні зі зволоженням блоку перед вибухом ПАР «Лексол-5». В ході досліджень у 2020 році в умовах ПрАТ «Північний гірничозбагачувальний комбінат» було підтверджено процес зв'язування дрібнодисперсних частинок пилу, які активно беруть участь в загальному процесі формування пилогазової хмари та ефект нейтралізації газів після вибуху. При концентрації водного розчину гуматового реагенту 3% екологічна ефективність у порівнянні з водою складала: пилоподавлення збільшилось на 20,0%; нейтралізація оксиду вуглецю – 59,4%; нейтралізація оксидів азоту – 55,1%. Ефективність зв'язування ПАР «Лексол-5» дрібнодисперсних частинок пилу який утворився в результаті масового вибуху розрахована за результатами експериментів при проведенні масового вибуху у кар'єрі ПрАТ «Інгулецький гірничозбагачувальний комбінат». Так, при застосуванні ПАР "Лексол-5" при попередньому зволоженні блоку 5% водним розчином, середня ефективність пилопригнічення складала 21%, ефект дегазації відсутній.*

**Ключові слова:** кар'єр, масовий вибух, гуматовий реагент, гідрозабійка, пилоподавлення, дегазація.

**Вступ.** При проведенні масових вибухів у кар'єрах в атмосферу викидається значна кількість пилу і газів, більша, ніж при інших технологічних процесах гірничого виробництва. Пилогазова хмара, що утворюється під час вибуху, забруднює атмосферу не тільки кар'єрів та їх промислових майданчиків, а й територію прилеглих до них районів. За даними Науково-дослідного інституту безпеки праці та екології в гірничорудній і металургійній промисловості (НДІБПГ КНУ) при масових вибухах у кар'єрах утворюється від 0,027 до 0,170 кг пилу на 1 м<sup>3</sup> гірничої маси [1].

Відомі методи та заходи по скороченню пилогазових викидів в атмосферу при проведенні масових вибухів до теперішнього часу не вирішили вищезазначену екологічну проблему, що підтверджується визначенням проблеми дегазації та пилопригнічення при масових вибухах у кар'єрах однією з пріоритетних для промислових підприємств м. Кривий Ріг відповідно до рішень Науково-технічної екологічної ради при Департаменті екології та природних ресурсів Дніпропетровської обласної державної адміністрації (п.1, Протокол №2 від 09.06.2020р.) та рішень Ради екологічного планування при управлінні екологією виконкому Криворізької міської ради (п.4.1 Протокол від 27.10.2017р, ч.ІІ Протокол від 30.06.2018р.) щодо реалізації заходів Міської програми вирішення екологічних проблем Кривбасу та поліпшення стану навколишнього природного середовища на 2016-2025 рр.

### 1. Мета та завдання

Основні способи боротьби з пилом при масових вибухах в даний час базуються на використанні методу попереднього зволоження кар'єрних блоків та застосуванні водних гідрозабійок різних видів. Типи гідрозабійок розроблені НДІБПГ КНУ і включають зовнішні, внутрішні та комбіновані. У «Керівному документі по використанню зволоженою набійки зарядів при вибухових роботах на кар'єрах, по дегазації підірваної гірничої маси і очищення атмосфери від шкідливих продуктів вибуху» вказані технологічні рекомендації щодо застосування забійок, організації їх використання, а в [2] наведені значення ефективності застосовуваних заходів по пилогазоподавленню при масових вибухах [1].

При виборі пилов'язуючого реагенту для ефективного пилопригнічення при проведенні масових вибухів необхідно також враховувати його конкурентну вартість і умови виробництва обраного реагенту в Україні. Задачею даного дослідження є визначення ефективності використання гуматового реагенту для зниження пиловиділення та дегазації при проведенні масових вибухів. Поставлена задача вирішується шляхом проведення комплексних промислових досліджень з визначення ефективності зниження пилоутворення та дегазації при заміні води у забійках на гуматовий реагент, через порівняння з екологічними показниками при штатній гідрозабійці та при попередньому зволоженні блоків ПАР «Лексол-5».

## 2. Робоча гіпотеза

З метою теоретичного обґрунтування ефективності застосування гуматового реагенту для пилогазопригнічення при масових вибухах, проведено дослідження промислових адсорбентів, основними з яких є досить дороге активоване вугілля та його модифікації.

Використання вуглежужного реагента (ВЛР) та реагенту торфгідрооксидного (РТГ) в складі робочої гуматової суміші при масових вибухах у кар'єрах показало його здатність сорбувати гази і пил. ВЛР є продуктом переробки бурого вугілля, основними активними складовими ВЛР є натрієві та калієві солі гумінових кислот та желатинові речовини, які є тонкодисперсними вуглегуміновими комплексами. Загальним для гумінових кислот різного походження є наявність ароматичного ядра і периферійні відкриті ланцюги, які складаються з карбоксильних, карбонільних груп, гідроксилів спиртового і фенольного характеру, залишок азотовмісних амінокислот. Така будова гумінових кислот пояснює їх адсорбційні властивості. Вставлено, що процес адсорбції оксиду карбону (II) ВЛР – це процес екзотермічний і має значну величину  $\Delta H$ . Вона дорівнює - 179 кДж/моль, що дозволяє зробити висновок про наявність хемосорбції (не тільки фізичної, але і хімічної сорбції). Здатність сорбуватись можна пояснити будовою молекули CO, яка є вкрай стійкою, але яка має атом елементу, що може приймати участь в утворенні ковалентного зв'язку за донорно-акцепторним механізмом. Донором електронів виступає атом оксигену. За схожим механізмом можлива сорбція оксидів нітрогену і аміаку. У випадку аміаку донором є нітроген [3]

## 3. Результати досліджень

Промислові випробування під час ведення масових вибухів у кар'єрах ПРАТ «ПВНГЗК» проведені НДГРІ та НДІБПГ КНУ у вересні 2020 р. з метою визначення ефективності способу пилогазоподавлення методом зовнішньої та внутрішньої гідрозабійки, зволоженні забійки з використанням гуматового реагенту.

Гуматовим реагентом, безпосередньо на блоці кар'єра, наповнювались поліетиленові рукави, які призначені для зовнішньої та внутрішньої гідрозабійки. Розміщення пилогазовідбірників на блоці, що підривається здійснювалось після заряджання вибухових свердловин та після підготовки зовнішньої гідрозабійки. На кожному з ділянок блоку встановлюються пилогазовідбірники, які розташовуються на відстані 30-50 м від останнього ряду свердловин в напрямку переважаючого руху атмосферного повітря за 1,5-2 години перед проведенням масового вибуху. Для забезпечення селективного відбору проб від кожної ділянки блоку (забезпечення відбору проб до початку інтенсивного перемішування пилогазових хмар від зазначених ділянок блоку) пилогазовідбірники розміщувались на кожній ділянці блоку на максимально можливій відстані. Розміщення пилогазовідбірників наведено на рис. 1.

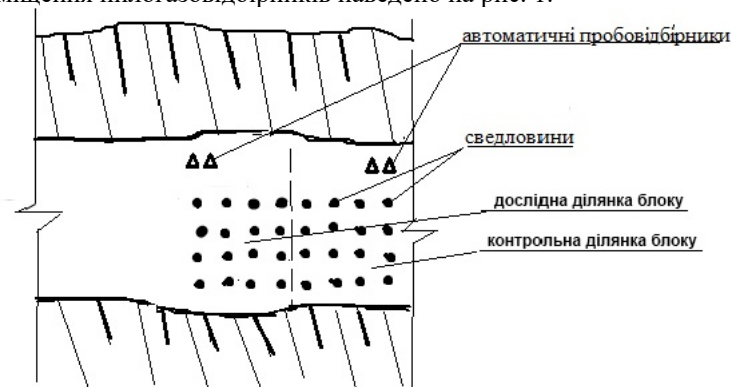


Рисунок 1. Схема розміщення пробовідбірників на блоці, що підривається

Аналіз пилогазових проб здійснювався експрес- та лабораторним методом в аналітично-випробувальній лабораторії НДІБПГ КНУ, яка відповідає вимогам ДСТУ ISO 10012:2005 «Системи керування вимірюваннями. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання» (свідоцтво №08-0017/2018 від 17.05.2018 р.).

Ефективність застосування гуматового реагенту при використанні зовнішньої гідрозабійки визначається за формулою:

$$E_{РТГ} = \frac{C_0 - C_{\phi}}{C_0} \cdot 100, \% \quad (1)$$

де  $E_{РТГ}$  - ефективність пилогазоподавлення при застосуванні гуматового реагенту, %;  $C_0$  - середня концентрація шкідливої речовини в атмосферному повітрі без застосування гуматового реагенту, мг/м<sup>3</sup>;  $C_{\phi}$  - середня концентрація шкідливої речовини в атмосферному повітрі при застосування гуматового реагенту, мг/м<sup>3</sup>.

Досліджуваний блок №52 (рис.2) знаходиться на горизонті -20/-30 м, який представлений кварцитами магнетит-силікатними з коефіцієнтом міцності по шкалі М.М. Протод'яконова – 12. Даний блок був розділений на дві частини. На першій ділянці, що становить 54 свердловини, була виконана зовнішня гідрозабійка з гуматовим реагентом (суміш з 3% розчину реагенту торфогідроксидного та ВЛР 3%) в об'ємі 24 м<sup>3</sup>. На другій частині блоку, яка складала 42 свердловин, заходи з пилогазопригнічення не виконувались. Пилогазовідбірні прилади розміщувались на відстані 30-50 м від підривається блоку.

Застосування зовнішньої гідрозабійки з використанням гуматового реагенту знизило пиловиділення на 50,5%, концентрацію шкідливих газів на 66,0%, а саме оксид вуглецю на 64,0%, оксиди азоту на 68,0%.

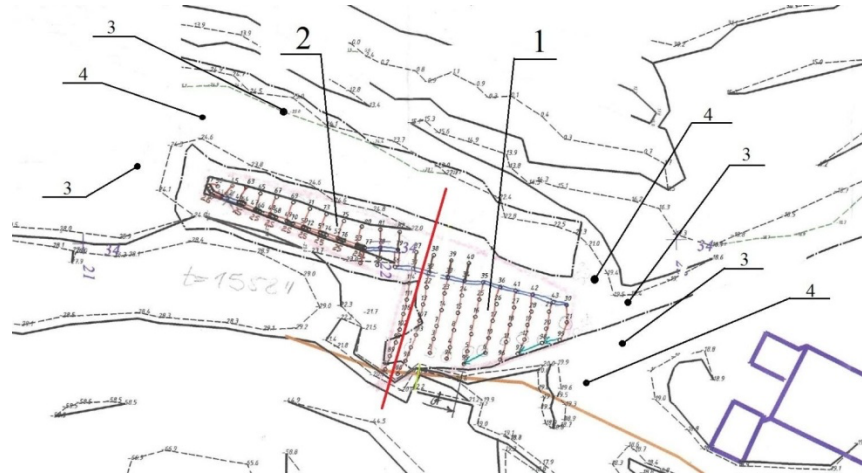


Рисунок 2. Схема експерименту на блоці №52

У кар'єрі ПрАТ «ІнГЗК» у вересні 2017 р. НДІБПГ КНУ були проведені експериментальні вибухи із застосуванням антипилового реагенту ПАР «Лексол-5». Вибухи проводились на горизонті -360м. Характерна схема одного з досліджуваних кар'єрних блоків, зволоженої ділянок на блоках і місця установки вимірювальної апаратури, наведені на рисунку 3.

На поверхню експериментальної ділянки блоку наносився водний розчин ПАР «Лексол-5» з витратою 2,0 – 2,5 літри на 1м<sup>2</sup> досліджуваної поверхні шляхом його розпилення за допомогою поливальної машини з гідромонітором. На другій ділянці засоби пилоподавлення не використовувались.

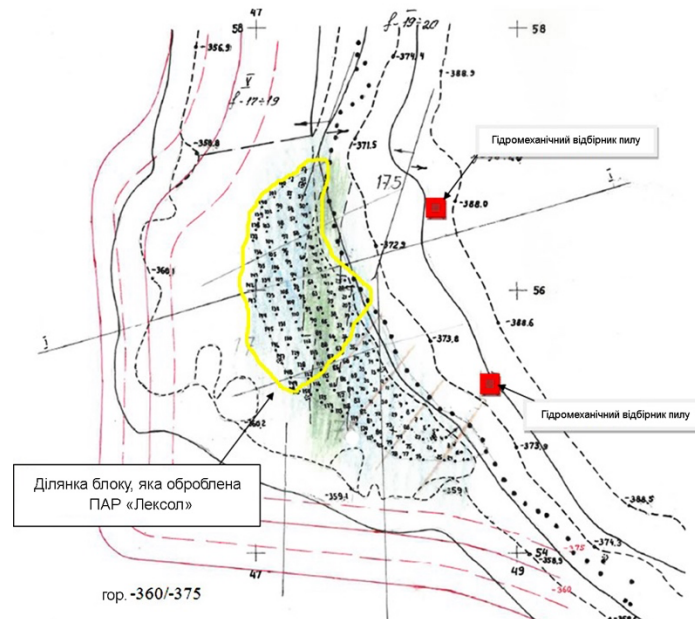


Рисунок 3. Схема досліджуваного блоку з його зволоженою ділянкою поверхнево-активною речовиною «Лексол» і місця установки вимірювальної апаратури

В ході досліджень було підтверджено процес зв'язування поверхнево-активною речовиною «Лексол» дрібнодисперсних частинок пилу, що залишилися на поверхні підривної блоку після бурових робіт на його поверхні, і які активно беруть участь в загальному процесі формування пилогазової хмари. При концентрації водного розчину антипилового реагенту "Лексол-5" 5% середня ефективність пилоподавлення склала 21%.

Промислові дослідження також показали можливість попереднього зволоження карерного блоку до двох днів до моменту вибуху. Випаровування застосовуваного реагенту на зволоженому блоці в теплий період року не відбувається внаслідок утворення захисної плівки реагентом "Лексол-5".

#### **Висновки.**

1. Застосування зовнішньої гідрозабійки з використанням гуматового реагенту (суміш водного 3% розчину реагенту торфогідроксидного та водного 3% розчину вуглелужного реагенту) забезпечило зниження пиловиділення на 50,5%, концентрацію шкідливих газів на 66,0%, а саме оксид вуглецю на 64,0%, оксиди азоту на 68,0%.

2. При застосуванні ПАР "Лексол-5" при попередньому зволоженні блоку 5% водним розчином, середня ефективність пилопригнічення склала 21%, ефект дегазації відсутній.

3. Ефективність використання гуматового реагенту у зовнішній гідрозабійці в порівнянні з використанням технічної води склала: пилоподавлення – 20,0%; нейтралізація оксиду вуглецю – 59,4%; нейтралізація оксидів азоту – 55,1%.

4. Для забезпечення максимального екологічного ефекту при проведенні масових вибухів необхідно при формуванні зовнішньої гідрозабійки свердловинних зарядів вибухової речовини (ВР) використовувати поліетиленові ємності діаметром близько 0,3-1 м і більше з наповненням гуматовим реагентом. Зовнішня забійка в поліетиленових рукавах розташовується по рядах свердловин. Довжина рукавів визначається геометричними параметрами поверхні зарядженого блоку і контуром свердловин. Технологічний процес виконання зовнішньої гідрозабійки з використанням гуматового реагенту не відрізняється від штатного виконання гідрозабійки із застосуванням води.

5. З метою зменшення пиловиділення при масових вибухах більше 50,5%, зниження дії ударних повітряних хвиль та підвищення якості дроблення гірських порід по всій висоті уступу, доцільним є формування ущільненої до 2450 кг/м<sup>3</sup> забійки неактивної частини свердловинних зарядів ВР 30% гуматовим реагентом (гуматовим концентратом) та дробленою породою фракції 5-20мм.

#### **Список використаної літератури**

1. Shchokin V.P., Ezhov V.V., Nalyvaiko V.G. Application of Leksol (R) surfactant aqueous solution to bind the dust on quarries' roads and reduce the dust emission during large-scale blasts. Ukrainian journal of ecology. 2018. Vol: 8, №1. P. 755-761.

2. Типові заходи по зменшенню викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря при використанні масових вибухів на кар'єрі ПАТ «ІнГОК». – Кривий Ріг, -2015р. -3с.

3. Тишук В.Ю., Єрмак Л.Д., Часова Е.В. Кінетика процесу газопоглинаючої дії вуглелужного реагенту / Охорона праці та навколишнього середовища на підприємствах гірничо-металургійного комплексу. Збірник наукових праць ,Кривий Ріг. 2000, вип. 2, с.99-112.

V. Shchokin, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0001-9709-1831

O. Shchokina, SRF, ORCID 0000-0002-0275-8646

Ore Mining Scientific Research Institute of Kryvyi Rih National University

## **APPLICATION OF HUMATIC REAGENT FOR DUST DESTRUCTION AND DEGASATION IN MASS EXPLOSIONS**

*The work is devoted to the coverage of the results of research and industrial tests of environmental efficiency of water replacement in internal and external hydraulic wells in the quarries of mining enterprises for humic reagent [1]. Scientific and technical problem of determining environmental efficiency, solved by conducting in 2020 by the Research Mining Institute (NDGRI KNU) industrial research in the conditions of PJSC "Northern Mining and Processing Plant" (PJSC "PIVNGZK", Kryvyi Rih) kg / dust3 kg rocks) and gas formation (kg / kg BP) during mass explosions with the use of water in the holes in comparison with the use of humic reagent. Dust-binding and degassing properties of humate-based reagents are confirmed by the results of research and industrial tests conducted by the Research Institute of Occupational Safety and Ecology in the Mining and Metallurgical Industry (NDIBPG KNU) in 2019 by conducting experiments with pre-wetting blocks before*



*conditions of quarries of Inguletskyi, Central and Northern GZK [1]. According to the results of experimental and industrial tests, it is substantiated that the efficiency of the use of humic reagent in the external water hammer in comparison with the use of technical water was: dust suppression increases by 20.0%; neutralization of carbon monoxide - 59.4%; neutralization of nitrogen oxides - 55.1%.*

**Keywords:** quarry, mass explosion, humic reagent, water hammer, dust suppression, degassing.

#### REFERENCES

1. Shchokin V.P., Ezhov V.V., Nalyvaiko V.G. Application of Leksol (R) surfactant aqueous solution to bind the dust on quarries' roads and reduce the dust emission during large-scale blasts. Ukrainian journal of ecology. 2018. Vol: 8, №1. P. 755-761.
2. Typical measures to reduce the emission of pollutants into the atmosphere when using massive explosions in the career of PJSC "INMPP". - Kryvyi Rih, -2015.-3 p.
3. Tyschuk V.Y., Yermak L.D, Chasova E.V Kinetics of the process of gas-absorbing action of carbon alkali reagent. / Labor and environmental protection at the enterprises of the mining and metallurgical complex. Collection of scientific works, Kryvyi Rih, 2000, vol. 2, pp.99-112.

Надійшла 17.05.2021

Received 17.05.2021

### **ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ**

Для подання рукопису до журналу автори повинні дотримуватись всіх встановлених вимог, які вказані нижче.

**У разі невідповідності поданих матеріалів статті пунктам цих вимог, а також якщо вони не відповідають тематиці наукового журналу, редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання!**

#### **Обсяг статті**

Загальний обсяг статті – від 6 до 10 сторінок формату А4. Сторінки повністю заповнені текстом. Схеми, рисунки, таблиці й формули повинні бути пронумеровані та розміщені в тексті після посилань на них. Матеріал має бути викладений стисло, без повторювань даних таблиць і рисунків у тексті. Неприпустимо використовувати елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонтитули.

**Стаття має бути ретельно перевірена авторами та відповідати всім пунктам вимог до оформлення!!!!**

#### **Текстовий редактор**

Стаття набирається в текстовому редакторі Microsoft Word (версії 2007 та вище) і зберігається з розширенням \*.doc або \*.docx.

**Обов'язково** надсилається стаття, збережена у форматі \*.pdf !!!

#### **Загальне оформлення:**

**1) Мова.** Статті приймаються до друку трьома мовами: українською, російською, англійською.

#### **2) Параметри сторінки:**

- Поля: зліва, справа, зверху, знизу – **2,5 см.**
- Вирівнювання основного тексту – **за шириною.**
- Перші рядки всіх абзаців – **з відступом 1,0 см!!!**
- Шрифт – **Times New Roman, кегль 10, міжрядковий інтервал 1.**
- Назва статті друкується великими (Caps Lock) напівжирними літерами (Ж) – **кегль 14.**
- Заголовки елементів основного тексту (Вступ, Мета та завдання тощо) виділяються напівжирним шрифтом (Ж).

#### **3) Структура статті:**

- **номер УДК** (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом кегль 10)
- **прізвища авторів** (приклад: **І.І. Петренко** (укр.), **И.И. Петренко** (рос.) **I. Petrenko** (англ)) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання); **індекс ORCID – обов'язково;**
- **(Порядок оформлення наукових ступенів та вчених звань описано нижче в цьому ж документі в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і наукових ступенів»).**
- **повна назва організації** (навчального закладу, установи) – **вирівнювання за правим краєм;**
- **реферат обсягом від 1000 до 1100 знаків** повинен відображати короткий зміст статті, не повторювати назву, не містити загальних фраз та бути структурованим (мета дослідження, методика реалізації, результати дослідження, висновки). В англійській версії статті наводяться реферат **обсягом 1700-2000 знаків,**
- **ключові слова:** (6–8 слів), словосполучення «Ключові слова» – напівжирним + курсив.

Відповідно до постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003р. до друку приймаються наукові статті, що мають такі елементи:

#### **Основний текст статті**

**Вступ** (постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується зазначена стаття);

**Мета та завдання** (формулювання цілей статті, постановка завдання);

**Матеріал і результати досліджень** (виклад основного матеріалу дослідження, з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, з можливим поділом на частини з відповідними назвами);

**Рисунки** (діаграми, фото тощо) подаються у **чорно-білому зображенні** разом із текстом, після посилань на них. **Вимога до графічних матеріалів:** будь-яка ілюстрація повинна бути єдиним нерозривним графічним об'єктом. Рекомендується застосування растрових форматів з роздільною здатністю не менше 300 dpi. Рисунок має бути розташований у центрі, без обтікання текстом. Підписи до рисунків повинні містити нумерацію в порядку розміщення в тексті та пояснювальний підпис. Неприпустимо включати підписи до самого рисунка. **Рисунок не повинен займати всю площу аркуша!!!**

Крапки після назви структурних частин статті не ставити.

**Графіки** повинні містити підписи усіх осей на самому рисунку. Будь-який інший вигляд підпису розглядатись та виправляти не буде!

**Таблиці.** При заповненні слід користуватись шрифтом 10 кеглю. Кожна таблиця повинна мати порядковий номер та назву і розташовуватись після посилання на неї у тексті статті. Якщо таблиця не вміщується на сторінці або виходить на іншу, слід використати позначення «Продовження табл.».

**Формули повинні бути набрані** за допомогою редактора формул Math Type (версія 6.8 і вище) або внутрішній редактор формул у Microsoft Word з розмірами: звичайного символу – 11, великого індексу – 10, малого індексу – 9. Кириличні та грецькі символи мають бути набрані прямим шрифтом, латинські літери – похилим. Виняток становлять символи операторів і стандартних функцій, які набираються прямим шрифтом. Нумерація формул, на які є посилання в тексті, – справа в дужках. Цілі частини від десяткових відокремлюються комою **Одиниці розмірності можна набирати окремо від формул, або у формулах, з обов'язковим використанням проміжку.**

**Висновки:** (навести основні висновки з дослідження та перспективи його подальшого розвитку в цьому напрямку).

**Список використаної літератури** наводиться в порядку посилань у тексті, відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках.

Список використаних літературних джерел подається двічі: мовою оригіналу відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр, рос) і англійською, відповідно до вимог IEEE style

**У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!**

Для надання відомостей про авторів англійською, або російською мовами, слід використовувати загальноприйнятую лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

**Англійська анотація за обсягом рекомендується більшою за українську (російську) 1700-2000 знаків**, оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

**У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!**

**В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:**

(Анкети подаються 3 мовами (укр., англ. та рос.). Вказується повна назва організації або установки, вказати місце де працює автор. Якщо всі автори статті працюють або навчаються в одній установі, можна не вказувати місце роботи кожного автора окремо.)

Прізвище, ім'я, по-батькові автора (повністю, без скорочень)	
Вчений ступінь, вчене звання, посада	
Місце роботи кожного автора в називному відмінку (повна назва без скорочень)	
Поштова адреса місця роботи, з поштовим індексом	
Контактний телефон	
Електронна адреса	
ORCID	

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку статей.

**Редакція журналу здійснює перевірку на плагіат за допомогою спеціального програмного забезпечення!!!**

**Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" та не пройшли перевірку на плагіат, будуть повернуті на доопрацювання.**

**Увага!!! На електронну адресу журналу надсилається:**

- стаття версія в форматі \*.doc або \*.docx;
- стаття версія в форматі \*.pdf (ОБОВ'ЯЗКОВО);
- анкета відомостей про авторів;
- акт експертизи про можливість оприлюднення матеріалів у засобах масової інформації.

**Контакти:**

- тел.: +38(044) 204-82-37;
- сайт: <http://energy.kpi.ua>;
- e-mail: [kravkpi@ukr.net](mailto:kravkpi@ukr.net)