

## **ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

- В.І. Дешко, Н.А. Буяк, І.Ю. Білоус, О.С. Наумчук.** Економічна оцінка підвищення теплового захисту громадських будівель до сучасних європейських вимог. ....7
- П.О. Барабаш, А.С. Соломаха, В.Г. Петренко, В.Ю. Мараховська.** Автономні дослідження струминного компресора для відцентрової системи дистиляції.....19
- П.П. Куделя, С.В. Дубовський.** Енергетичний і ексергетичний аналіз типових систем опалення. ....25
- І.О. Суходуб, В.І. Шкляр, В.В. Дубровська** Аналіз фактичних, типових та нормативних кліматичних даних в контексті енергетичного моделювання будівель .....35
- Д.Г. Дерев'янка, Н.Г. Беспала, І.І. Богойко, А.О. Колодяжна.** Перспективи застосування відновлювальних джерел енергії для теплопостачання громадських і житлових будівель в Україні .....41
- В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, А.В. Чернявський** Формування стратегії підвищення енергоефективності металургійних підприємств як запорука декарбонізації економіки України .....48

## **ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ**

- Н.В. Беленок, В.І. Чибеліс, Л.Ю. Спінул.** Бікомплексний аналіз інваріантних систем електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії. ....57
- В.А. Степаненко, А.І. Замулко, Ю.А. Веремійчук, В.Ф. Находов.** Оцінка ризиків при інтеграції відновлюваних джерел енергії до системи електропостачання .....64
- А.А. Хотян, В.П. Розен.** Стан і перспективи розвитку локальних енергетичних об'єктів у складі мікромереж. ....75

## **SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ**

- І.Ю. Бойко.** Прототип пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії. ....82

## **ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ**

- В.А. Халімончук, М.М. Паламарчук.** Дослідження ксенонових коливань потужності в реакторах ВВЕР - 1000 в одномірній аксіальній геометрії. ....89
- С.В. Бойченко, А.В. Яковлєва, Д.В. Боднар, А.В. Гудзь, М.В. Московчук, М.Г. Лорія.** Порівняльний аналіз енерготехнологій отримання палив для повітряно-реактивних двигунів зі спирту. ....97

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

- В.П. Грудська, В.В. Голубєв, О.С. Денисенко.** Оптимізація перетворювачів напруги матричного та інверторного типу шляхом імітаційного моделювання. ....104
- В.А. Побігайло, С.В. Зайченко, Н.А. Жукова, В.О. Шаленко.** Дослідження теплового режиму приводу мотор-барабану стрічкового конвеєра. ....114
- Г.С. Белоха** Електромагнітносумісні джерела струму з релейним керуванням .....119
- Г.Б. Варламов, І.В. Сегеда, Є.О. Локоторьов, Цзян Цзяньго, І. Мітченко.** Автоматизована система апаратного забезпечення збору обладнання для потужних обчислювальних комплексів .....128
- ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ**.....138

## ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

- V. Deshko, N. Buyak, I. Bilous, O. Naumchuk.** Economic assessment of increasing thermal protection of municipal buildings to modern european requirements.....7
- P. Barabash, A. Solomakha, V. Petrenko, V. Marakhovskaya.** Autonomous investigations of jet compressor for centrifugal distillation system.....19
- P. Kudelya, S. Dubovskyi.** Energy and exergy analysis of typical heating systems.....25
- I. Sukhodub, V. Shklyar, V. Dubrovska.** Analysis of actual, typical and normative climate data in the context of buildings energy modeling .....35
- D. Derevinko, N. Bspala, I. Bohoiko, A. Kolodiazhna.** Prospects for using renewable energy sources for heat supply of public and residential buildings in Ukraine. ....41
- V. Nakhodov, O. Borychenko, A. Cherniavskiy.** Formation of a strategy for increasing the energy efficiency of metallurgical enterprises as guarantee of decarbonization of the ukrainian economy .....48

## ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

- N. Belenok, V. Chibelis, L. Spinul.** Bicomplex analysis of invariant power supply systems based on renewable energy sources.....57
- V. Stepanenko, A. Zamulko, Y. Veremiichuk, V. Nakhodov.** Assessment of risk for the integration of renewable energy sources into the electricity supply system. ....64
- A. Khotian, V. Rozen.** State and prospects of development of local energy objects within microgrids. ....75

## SMART GRID SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

- I. Boiko.** Prototype of the calculation device of dynamic cost of the basic part of electricity .....82

## TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN POWER ENGINEERING

- V. Khalimonchuk, M. Palamarchuk.** Study of xenon power fluctuations in WWER-1000 reactors in one-dimensional axial geometry .....89
- S. Boichenko, A. Yakovlieva, D. Bodnar, A. Hudz, M. Moskovchuk.** Comparative analysis of technologies of get fuel production from alcohols.....97

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

- V. Grudska, V. Golubev, O. Denysenko.** Optimization of voltage converters of matrix and inverter types using simulation modelling. ....104
- V. Pobigailo, S. Zaichenko, N. Zhukova, V. Shalenko.** Research of the thermal regime of the belt conveyor motor-drum .....114
- H. Bielokha.** Electromagnetic compatible current sources with relay control .....119
- G. Varlamov, I. Segeda, Y. Lokotarov, Jiang Jianguo, I. Mitchenko.** Automated system for providing powerful computing systems with a complex of equipment. ....128

# ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

## ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 697.1

DOI 10.20535/1813-5420.2.2022.261277

В.І. Дешко<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8218-3933

Н.А. Буяк<sup>1</sup>, к.т.н., асистент, ORCID 0000-0003-0597-6945

І.Ю. Білоус<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0002-6640-103X

О.С. Наумчук<sup>1</sup>, аспірант, ORCID 0000-0002-7059-8867

<sup>1</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<sup>2</sup>Інститут технічної теплофізики НАН України

### ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ПІДВИЩЕННЯ ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ ГРОМАДСЬКИХ БУДІВЕЛЬ ДО СУЧАСНИХ ЄВРОПЕЙСЬКИХ ВИМОГ

*Згідно з планом скорочення викидів двоокису вуглецю в Україні, виникає необхідність заміщення традиційних джерел енергії і, відповідно, видів палива. У роботі виділено основні відмінності діючих нормативно – правових документів у сфері енергоефективності будівель, проаналізовано динаміку енергопотреби громадської будівлі за умов її термомодернізації до діючих в Україні та Європі нормативних показників, та регулювання графіку роботи опалення та вентиляції.. Оцінка енергопотреби базується на результатах розрахунків згідно діючого стандарту ДСТУ А.2.2 – 12:2015 та моделі будівлі у програмному середовищі DesignBuilder. Використання DesignBuilder допомагає оцінити екологічні характеристики нових і існуючих будівель, енергію та комфорт, HVAC, денне освітлення, вартість, оптимізацію дизайну, CFD, BREEAM/LEED кредити та звіти, які відповідають кільком національним будівельним нормам і стандартам сертифікації.*

*Досліджено вплив економічних показників України та Європи на загальну чутливість проекту з підвищення теплового захисту громадської будівлі з урахуванням історичного приросту цін на енергоносії у країнах, що розглядаються. Робота є базисом для подальшого аналізу та розвитку концепції будівель з майже нульовим споживанням енергії в Україні.*

**Ключові слова:** енергопотреба, термомодернізація, утеплення, нормативні показники, економія, тарифи.

#### Вступ

Сфера будівництва в Україні була та залишається однією з найперспективніших галузей. За даними [1] протягом січня – вересня 2018 на території України введено в експлуатацію 16 565 житлових будівель, частка будівництва комерційних будівель становить 7% від житлового фонду. Разом з тим, відповідно [2] у 2019 році показник будівництва нежитлових будівель зріс на 27,4% (49,3 млрд грн). На фоні поступового зростання частки нового будівництва відбувається реформування ставлення до енергії у, практично, всіх галузях народного господарства.. Такі реформи стосуються, насамперед, інженерних, економічних, екологічних та соціальних сфер: у забезпеченні якісного постачання енергоносіїв, створення інфраструктури, у забезпеченні екологічно безпечною територією і, врешті, бути передовим забудовником. І саме останній пункт переліку визначає роль забудовника на ринку та диктує свої умови для покупців нерухомості. До 2010 року нове будівництво в Україні не мало вагомих обмежень у питанні використання енергоресурсів, [3] зобов'язав основних «гравців» ринку на внесення змін до нових проектів забудови. Це був перший крок уряду до енергетичної незалежності та втілення глобальних цілей сталого розвитку у державі. Мінімальні вимоги до енергетичної ефективності будівель визначають необхідність будівництва, реконструкції та капітального ремонту будівель з рівнем енергоефективності – не нижче класу «С». Разом з тим, дані Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України [4] підтверджують недотримання таких вимог забудовниками. Паралельно з наказом Міністерства розвитку громад та територій України, що визначає згадані Мінімальні вимоги до енергетичної ефективності

будівель, в Європі активно ведеться робота з законодавчими актами для нормування будівництва та експлуатації будівель з нульовим споживанням енергії [5].

Основним законодавчим інструментом Європейського Союзу для підвищення енергоефективності європейського житлового фонду є Директива з енергоефективності будівель [6], що являє собою вимогу будівництва будівель з майже нульовим споживанням енергії (NZEB - nearly zero – energy buildings) з 2021 року, громадські будівлі – з 2019 року. Згідно Директиви, уряд Австрії вніс зміни до законодавства і країна стала, фактично, прикладом для втілення вимог у нормативно – правову документацію інших держав – членів Європейського Союзу. [6] дає можливість країнам ЄС оцінити методологію розрахунків власних NZEB з урахуванням кліматичних умов, фактору первинної енергії та традицій будівництва перед узаконенням показників споживання енергії на рівні NZEB. Показники, зафіксовані на рівні NZEB, означають: дуже високий рівень енергоефективності будівлі разом з дуже низьким обсягом енергопотреб, кількісний показник первинної енергії в кВт·год/м<sup>2</sup> за рік залежить від призначення будівлі і може бути для громадських будівель на рівні 85 – 100 кВт·год/м<sup>2</sup> за рік, при чім не менше половини цього повинно забезпечуватися від поновлюваних джерел [30].

Розуміння того, що спільного NZEB для всіх країн не існує зумовило створення проекту ZEBRA2020 [7], що фокусує свою діяльність на відстеженні переходу ринку до будівель з майже нульовим споживанням енергії для подальшої рекомендації будівельним компаніям та уряду. [7] дає змогу оцінити якісний та кількісний аналіз будівельних норм у кожному регіоні та направлений на представлення результатів згідно чотирьох секторів:

- 1) Будівлі з нульовим споживанням енергії;
- 2) Будівлі з майже нульовим споживанням енергії;
- 3) Будівлі з енергоефективністю, що є вищою за мінімальні національні вимоги 2012 року;
- 4) Будівлі (відремонтовані, побудовані) згідно мінімальних національних вимог 2012 року.

Можливість такого відслідковування є потужною мотивацією для розвитку енергоефективного будівництва житлового, громадського, медичного та навчального сектору. Варто зазначити, що країни пострадянського простору уже успішно впровадили механізм побудови NZEB внесенням показника первинної енергії в кВт·год/м<sup>2</sup> за рік у законодавчі акти – Латвія [8], Литва [9], Чехія [10].

Індикатори впливу галузі енергоефективності на сферу будівництва ведуть за собою скорочення викидів двоокису вуглецю в атмосферу та забезпечують виведення нових технологій будівництва на світовий ринок. Насамперед, виникає необхідність створення/реконструкції якісного теплового захисту будівель та якісних інженерних систем як ключову оцінку комфортного мікроклімату [31], згодом – обов'язкове використання відновлювальних джерел енергії як забезпечення енергетичної незалежності та економії коштів, запобігання енергетичній бідності та зміні клімату загалом. Для оцінки можливих наслідків впровадження заходів з енергоефективності можна використовувати як перевірений ручний кількісний розрахунок, так і моделювання можливих змін у програмних середовищах прикладу DesignBuilder та Energy Plus.

Разом з тим, існує велика кількість програмних продуктів для оцінки тієї ж величини первинної енергії для вибраного регіону світу. Тут доречно згадати DesignBuilder, яка моделює процес зміни величини первинної енергії згідно заданих людиною параметрів – географічні координати, теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій, графік роботи системи опалення та/або вентиляції, використання відновлювальних джерел енергії і т.п.

В умовах наближеності України до країн Євросоюзу, затверджено державний стандарт України [11], що дозволяє розрахувати показник первинної енергії в кВт·год/м<sup>2</sup> за рік для будівлі. Тобто, для певного регіону України (включення кліматичних умов у розрахунок), для заданих геометричних та теплотехнічних показників, розраховується енергопотреба, що при подальших розрахунках приводить до показника первинної енергії. Даний стандарт дозволяє оцінити величину первинної енергії для всіх типів будівель окрім промислових.

Відповідно до директиви [6] країни Європи ефективно розробляють національні стандарти щодо будівель з майже нульовим споживанням енергії. Україна приєдналася до цієї директиви а визначення економічної доцільності конкретних кроків в цьому напрямку є актуальним і потребує додаткового обґрунтування та дослідження.

#### **Мета та завдання**

Метою роботи є економічна оцінка основних відмінностей українських та європейських вимог при підвищенні теплового захисту будівлі.

Відповідно до поставленої мети повинні бути вирішені наступні завдання:

1. Аналіз сучасних вимог для огорожувальних конструкцій будівлі України та ЄС, на прикладі Швеції.
2. Розробка моделі адміністративної будівлі в Design Builder з урахуванням джерела теплоти.
3. Розрахунок обраного об'єкту згідно ДСТУ А.2.2 – 12:2015 та у програмному середовищі DesignBuilder для існуючого стану будівлі, при коригуванні графіку роботи опалення, при

термомодернізації будівлі до рівня вимог України та Швеції з подальшим порівнянням отриманих основних параметрів.

4. Розрахунок та аналіз основних економічних показників для проекту підвищення теплового захисту будівлі до рівня вимог України та Швеції.

#### Матеріал та результати досліджень

**Вихідні дані для розрахунку.** Для розрахунку було обрано чотирьох поверхову громадську будівлю у м. Київ, загальна площа якої становить 2652,3 м<sup>2</sup>. Зовнішні стіни будівлі представлені керамзитобетонними плитами, основні світлопрозорі конструкції – металопластиковими двокамерними склопакетами (393,96 м<sup>2</sup>) та склоблоками (30,63 м<sup>2</sup>) які складають основну частку втрат теплоти через одну зі стін. Дах будівлі (645,8 м<sup>2</sup>) плоский, конструкція являє собою залізобетонне перекриття з шаром руберойду, дах вимагає реконструкції. Перекриття над неопалювальним підвалом (645,8 м<sup>2</sup>) представлено залізобетонним перекриттям. Джерело енергії – котельня, що працює на природному газі. Розрахунок основних теплотехнічних параметрів та енергопотребі проводиться згідно [11] з паралельним створенням моделі будівлі заданого конструктиву у DesignBuilder (рисунок 1).

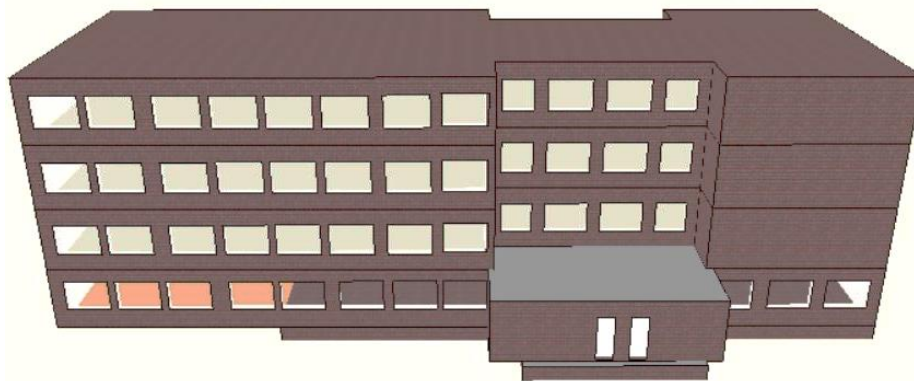


Рисунок 1 - Модель досліджуваної будівлі у середовищі DesignBuilder

Для покращення умов мікроклімату будівлі та для забезпечення виконання нормативних вимог України щодо оболонки будівлі згідно [12] було внесено пропозиції щодо її термомодернізації – утеплити зовнішні стіни, перекриття над неопалювальним підвалом та дах, провести заміну існуючих світлопрозорих конструкцій. Для виконання вимог [12] було обрано наступні матеріали для підвищення теплового захисту об'єкту розрахунку: зовнішні стіни – екструдований пінополістерол ( $\delta = 0,06$  м,  $\lambda = 0,029$  Вт/м·°C), дах – пінополістерол ( $\delta = 0,12$  м,  $\lambda = 0,022$  Вт/м·°C), перекриття над неопалювальним підвалом – мінеральна вата ( $\delta = 0,15$  м,  $\lambda = 0,039$  Вт/м·°C).

Для оцінки рівня відповідності вимог України щодо огорожувальних конструкцій будівлі Європейським нормативним документам у сфері енергоефективності було проведено аналіз існуючих документованих матеріалів країн Європейського Союзу. Для порівняння було обрано Швецію як країну, клімат якої на основній частині території є наближеним до клімату України, а вимоги щодо огорожувальних конструкцій є найбільш жорсткими серед країн – членів ЄС [13]. Порівняння показників термічного опору огорожувальних конструкцій згідно вимог України та Швеції наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Показники нормативного термічного опору будівлі

Тип огорожувальної конструкції	Нормативний термічний опір огорожувальних конструкцій, R, м <sup>2</sup> ·°C/Вт	
	Вимоги України [12]	Вимоги Швеції [13]
Зовнішні стіни	3,3	5,56
Перекриття над проїздами та неопалювальними підвалами	3,75	6,67
Світлопрозорі конструкції	0,75	0,83
Двері зовнішні	0,6	0,83
Суміщене перекриття	5,35	7,69

Покращення теплової оболонки будівлі до вимог [13] забезпечувалось доутепленням екструдованим пінополістеролом ( $\delta = 0,13$  м,  $\lambda = 0,029$  Вт/м·°C), пінополістеролом ( $\delta = 0,2$  м,  $\lambda = 0,022$  Вт/м·°C), мінеральною ватою ( $\delta = 0,2$  м,  $\lambda = 0,039$  Вт/м·°C) для зовнішніх стін, даху та перекриття над неопалювальним горищем відповідно. Отримані в процесі дослідження розрахунки термічного опору будівлі для описаних вище умов наведено у таблиці 2.

Таблиця 2. Розрахункові термічні опори огорожувальних конструкцій

Тип огорожувальної конструкції	Площа, м <sup>2</sup>	Термічний опір огорожувальної конструкції, R, м <sup>2</sup> ·°C/Вт		
		Існуючий стан	Після термомодернізації	
			Згідно вимог України [12]	Згідно вимог Швеції [13]
1	2	3	4	5
Зовнішні стіни	923,214	1,36	4,4	5,84
Перекриття над проїздами та неопалювальними підвалами	645,8	0,37	4,3	6,7
Світлопрозорі конструкції	металопластикові	393,96	0,83	1
	склоблоки	30,63		
Двері зовнішні	металопластикові	9,528	0,6	1,05
	металеві	3,368	0,3	0,84
Дах	645,8	0,4	5,86	9,5

Розрахунок енергопотреб в Design Builder для обраної моделі (кліматичні умови м. Київ) виконувався для наступних варіантів:

1) існуюча ситуація - діюча будівля, термічні опори огорожувальних конструкцій відповідають значенням стовпця 3 таблиці 2, робота системи опалення та вентиляції у постійному режимі;

2) теплова оболонка будівлі покращена до вимог України [12] (термічні опори огорожувальних конструкцій відповідають значенням стовпця 4 таблиці 2), робота системи опалення та вентиляції у постійному режимі;

3) теплова оболонка будівлі покращена до вимог України [12] (термічні опори огорожувальних конструкцій відповідають значенням стовпця 4 таблиці 2), робота опалення та вентиляції за переривчастим графіком;

4) теплова оболонка будівлі покращена до вимог Швеції [13] (термічні опори огорожувальних конструкцій відповідають значенням стовпця 5 таблиці 2), робота опалення та вентиляції за переривчастим графіком.

Регулювання графіку роботи системи опалення та вентиляції – один зі способів скорочення енергопотреб та енергоспоживання будівлею, що не потребує капітальних вкладень. У програмному середовищі DesignBuilder динаміка енергоспоживання при відрегульованому графіку роботи системи опалення та вентиляції досліджувалась, виходячи з робочого графіку будівлі, що розглядається (з понеділка по п'ятницю, з 8:00 до 18:00). Скорочення енергоспоживання будівлею при регулюванні графіку роботи системи опалення і вентиляції та покращенні теплового захисту її огорожувальних конструкцій до вимог України та Швеції зведено у рисунку 2.

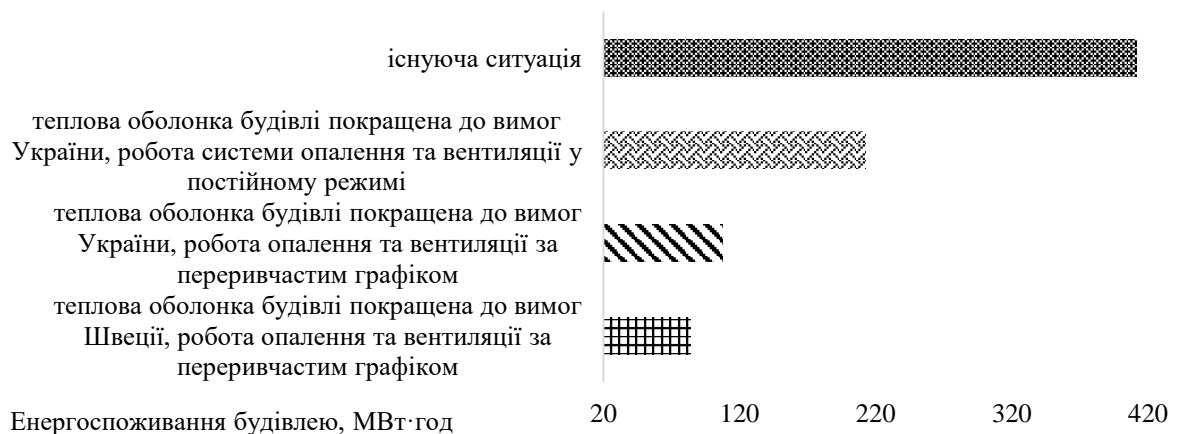


Рисунок 2 - Річне енергоспоживання будівлею при регулюванні графіку роботи системи опалення і вентиляції та покращенні теплового захисту її огорожувальних конструкцій до вимог України та Швеції

Послідовна реалізація вищеописаних варіантів впливу на енергоспоживання досліджуваної будівлі у Design Builder дає змогу оцінити величину та динаміку енергоспоживання для кожного з варіантів. Отримані результати свідчать про скорочення споживання енергії при покращенні теплової оболонки будівлі до вимог України та нерегульованому графіку роботи системи опалення та вентиляції (варіант 2) на 48 % відносно початкової величини (варіант 1), при переривчастому опаленні та вентиляції утепленої

до вимог України будівлі (варіант 3) величина спожитої енергії зменшилась на 74 % відносно поточного рівня, при утепленні будівлі до вимог Швеції та відрегульованому графіку роботи системи опалення та вентиляції (варіант 4) отримали величину енергоспоживання, меншу від існуючого рівня на майже 80%. Таким чином, спостерігаємо очікувану тенденцію відносного зменшення витрат на опалення та трансмісійних тепловтрат в оберненій пропорції до зростання термічного опору огорожень. Разом з тим, послідовне зростання опору не тільки зменшує потребу на опалення, але і нівелює абсолютну величину цього зменшення. Тому при досягненні опору теплопередачі рівня сучасних стандартів актуальним завданням забезпечення енергоефективності є управління режимами інженерних систем адекватно до умов комфортності і потреб експлуатації будівель. Для прикладу, питома величина споживання енергії (кВт·год/м<sup>2</sup>) до покращення теплової оболонки будівель згідно вимог України [12] та при постійній роботі системи опалення й вентиляції (існуюча ситуація) становить 65,99 кВт·год/м<sup>2</sup>, після – 34,08 кВт·год/м<sup>2</sup>. Регулювання роботи системи вентиляції та опалення паралельно з утепленням огорожувальних конструкцій до вимог України [12] та Швеції [12] знижує питоми показник до 17,21 кВт·год/м<sup>2</sup> й 17,48 кВт·год/м<sup>2</sup> відповідно.

Подобове відображення динаміки енергоспоживання кожного з вищезгаданих варіантів покращення теплового захисту будівлі зображено на рисунку 3.

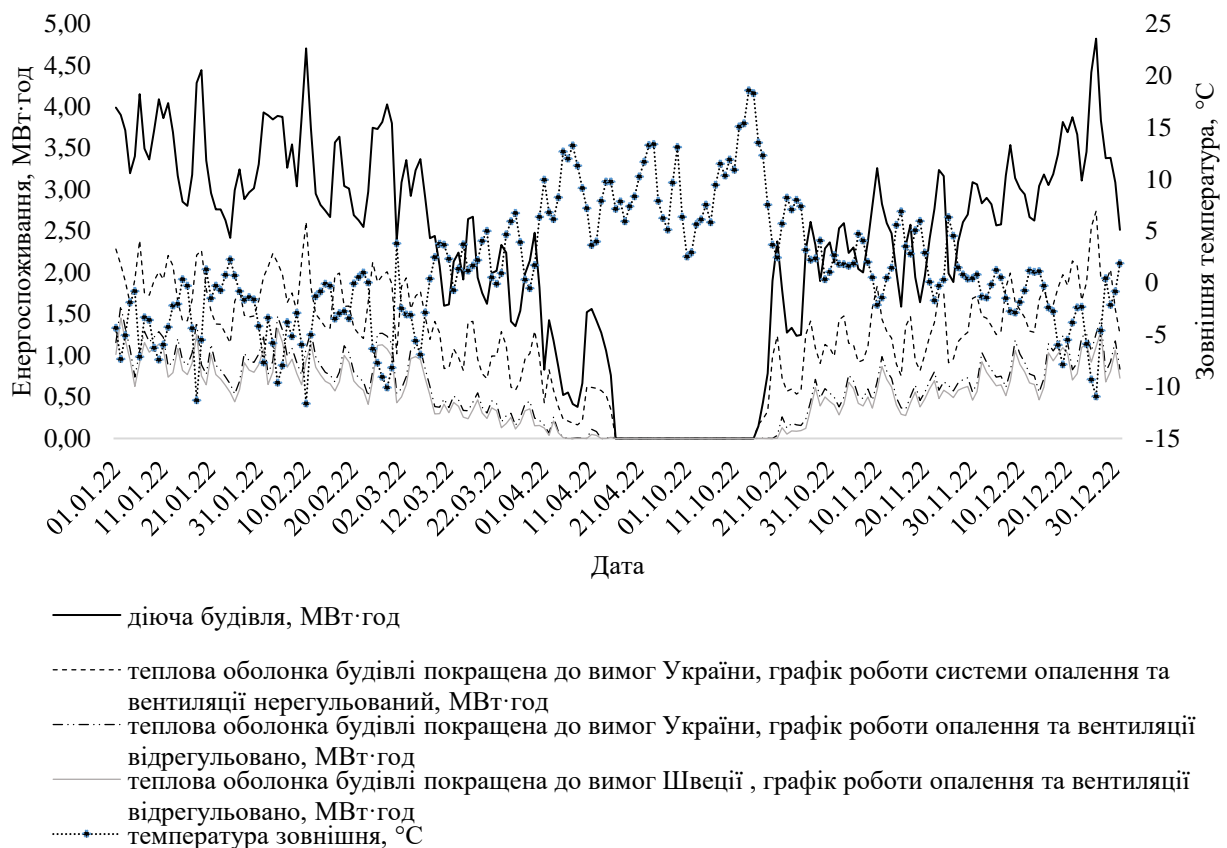


Рисунок 3 - Динаміка енергоспоживання при реалізації заходів покращення теплового захисту досліджуваної будівлі у програмному середовищі Design Builder

Порівняння подібних значень енергоспоживання на опалення показує, абсолютний ефект від збільшення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій більш суттєвий для холодного періоду за рахунок зменшення теплових втрат, які залежать від різниці температур внутрішнього та зовнішнього повітря. При зміні опору теплопередачі на рівні вище сучасних стандартів цей ефект більш рівномірний, тому що для перехідних періодів весни та осені в енергетичному балансі будівлі проявляється більш суттєвий вплив внутрішніх теплонадходжень, зокрема від сонця.

Варто зазначити, що головним поштовхом до покращення стану енергоефективності були та залишаються кошти, а точніше – величина їх економії при реалізації того чи іншого заходу. Тобто, жодна оцінка покращеного стану як конструктиву будівлі, так і умов мікроклімату не є вагомою для інвестора без представлення такого покращення у грошовому еквіваленті. А грошовий еквівалент, в свою чергу, є незмінно залежним від тарифів на енергоносії. Динаміка зміни тарифів у сторону збільшення є типовою

для всього світу, проте наскільки величина енергетичних тарифів України [14], [15], [16] є тотожною з енергетичними тарифами тієї ж Швеції [17], [18], показано на рисунку 4.

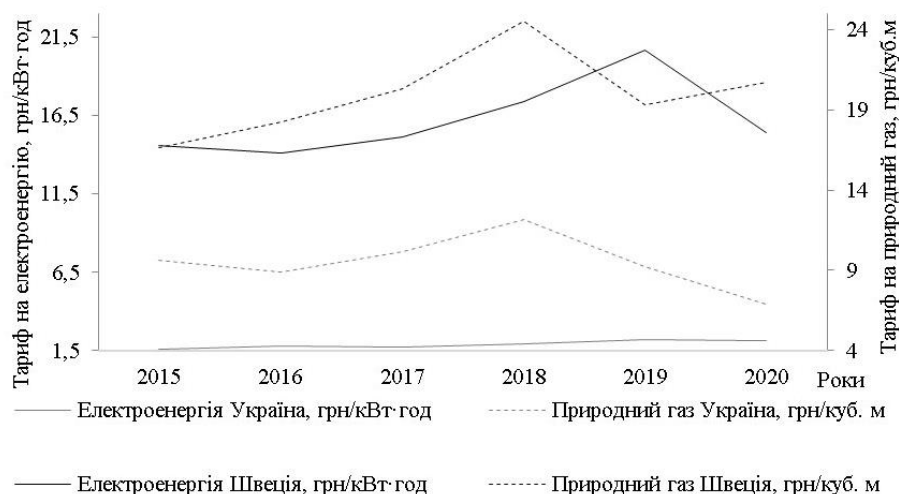


Рисунок 4 - Динаміка тарифів на енергетичні носії в Україні та Швеції

Як показує рисунок 4, темпи приросту тарифів в Україні та Швеції є подібними для природного газу, проте спостерігається суттєва різниця у кількісній величині тарифу. Не дивно, що за умов такої суттєвої вартості як на електричну енергію, так і на природний, існують згадані вище вимоги до зовнішньої оболонки будівлі.

Розглянемо випадок забезпечення розрахункової будівлі нормативними значеннями термічного опору зовнішньої оболонки для умов України та Швеції (таблиця 1). Розрахункові дані капітальних витрат та терміну окупності, як основних показників доцільності реалізації заходу енергоефективності, представимо, з урахуванням тарифів та цін на матеріали та виконання робіт, що діють у нашій державі [14] – [16] у таблиці 3. Варто зазначити типи модернізації для кожної огорожувальної конструкції:

1) Утеплення – зовнішні стіни (923,214 м<sup>2</sup>), суміщене перекриття (645,8 м<sup>2</sup>) перекриття над проїздами та неопалювальними підвалами (645,8 м<sup>2</sup>);

2) Заміна – вікна (металопластикові – 393,96 м<sup>2</sup>, склоблок – 30,63 м<sup>2</sup>), двері (9,528 м<sup>2</sup>).

Таблиця 3. Розрахунок терміну окупності при покращенні теплового захисту будівлі до вимог України та Швеції при середньому значенні тарифу на природний газ у Україні

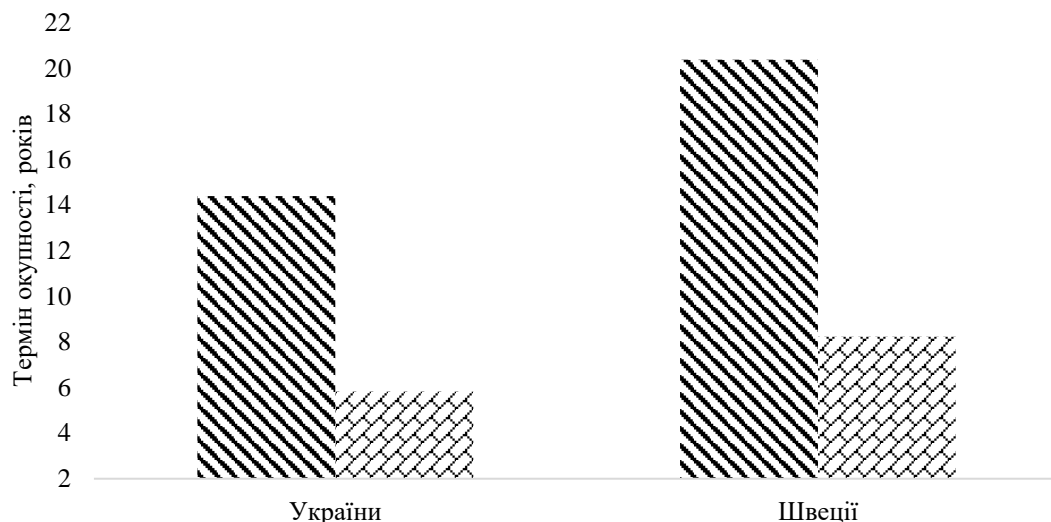
Тип огорожувальної конструкції	Капітальні витрати*, тис. грн		Економія теплової енергії**, МВт·год		Економія природного газу, тис. куб. м [8]		Простий термін окупності, років	
	Для вимог України [12]	Для вимог Швеції [13]	Для вимог України [12]	Для вимог Швеції [13]	Для вимог України [12]	Для вимог Швеції [13]	Для вимог України [12]	Для вимог Швеції [13]
Зовнішні стіни	502,043	963,651	304,266	327,514	32,556	35,044	14,4	20,38
Підлога	670,482	421,707						
Дах	523,020	713,331						
Вікна	1 592,073	2 904,751						
Двері	41,411	66,195						
Всього витрат, грн	3 329,031	5 069,636						

\*Капітальні витрати розраховано згідно даних прейскуранту на будівельні матеріали та будівельні роботи [19] – [25]

\*\*Економія природного газу розрахована згідно діаграми перерахунку енергетичних величин [26]

Для наглядного представлення залежності економічних показників від тарифів нижче проведемо порівняння терміну окупності при покращенні теплового захисту будівлі до вимог України та Швеції при середньому значенні тарифу на природний газ в Україні та у Швеції [17], [18]. Результати порівняння представимо на рисунку 5.





- ❖ З урахуванням тарифу на природний газ в Україні при модернізації згідно вимог
- ❖ З урахуванням тарифу на природний газ в Швеції при модернізації згідно вимог

Рисунок 5 - Порівняння термінів окупності при покращенні теплового захисту будівлі до вимог України та Швеції при середньому значенні тарифу на природний газ в Україні та Швеції

Хоча простий термін окупності і є основним індикатором впливу на рішення щодо доцільності реалізації того чи іншого проекту, необхідно також для довгострокових проектів враховувати динаміку зміни вартості на енергоносії. Обґрунтування доцільності застосування функції інтегральної вартості для комплексного вибору огорожувальних конструкцій будівлі [27] представлено формулою:

$$Bt = \sum_{t=0}^n \frac{V_{\text{експл}}}{(1+E)^n} + \sum_{t=0}^n V_{\text{енерг}} \cdot \frac{(1+l \cdot t)}{(1+E)^n} + I_0 + I_{\text{із}} + I_{\text{со}}$$

де  $V_{\text{енерг}}$  – річні затрати за спожиті енергоносії, грн;  $V_{\text{експл}}$  – інші затрати, грн;  $I_0$  – капітальні затрати на придбання та встановлення теплогенеруючого обладнання, грн;  $I_{\text{із}}$  – витрати, спрямовані на покращення теплового захисту будівлі, грн;  $I_{\text{со}}$  – витрати на придбання приладів опалення, покращення системи вентиляції, грн;  $l$  – коефіцієнт, що враховує приріст цін на енергоносії грн/рік;  $n$  – час, для якого визначаються інтегральні дисконтовані витрати, роки;  $E$  – ставка дисконтування.

В першому наближенні заміну джерела енергії, модернізацію систем опалення та вентиляції не розглядаємо. Представлення зміни інтегральної вартості виконуємо за умов підвищення теплового захисту будівлі при коригуванні графіку опалення та покращенні коефіцієнтів термічного опору до нормативних вимог України та Швеції з урахуванням середнього тарифу на природний газ для України, без урахування економічних показників ( $l$ ,  $E$ ). Зміну інтегральної вартості для вищевказаних умов представлено на рисунку 6. Результати розрахунку інтегральної вартості за тих же умов, але з урахуванням середнього тарифу на природний газ у Швеції, представлено на рисунку 7.

Ці результати демонструють економічну привабливість енергоефективних заходів, коли основні витрати стосуються утеплення будівлі. Показано доцільність у порівнянні з існуючим станом модернізації: до сучасних норм України, термін окупності 14,4 року, до вимог Швеції – 20,4 року. Цей показник ефективності сильно залежить від величини тарифу на природний газ. При збільшенні тарифу до рівня в Швеції термін окупності буде відповідно 5,82 і 8,23 років. Тобто тенденції підвищення ціни на природний газ роблять ці енергоефективні заходи більш привабливими в Україні. При цьому, утеплення будівлі від рівня діючих в Україні стандартів до рівня в Швеції є економічно недоцільним.

Разом з тим, іншим вагомим фактором впливу на економічну привабливість заходів з підвищення енергетичної ефективності будівель є показники економічної стабільності, це ставка дисконтування та зміна цін на енергоносії. Вони мають суттєву непередбачуваність для умов України і це надає великої невизначеності економічної оцінки проектів з великим життєвим циклом.

При урахуванні економічних показників (ставка дисконтування в Україні [28] та Швеції [29]) та при найоптимістичнішому сценарію приросту цін на енергоносії (Україна – 5%, Швеція – 3%), розрахунок інтегральної вартості за умов підвищення теплового захисту будівлі при коригуванні графіку опалення та покращенні коефіцієнтів термічного опору до нормативних вимог України та Швеції матиме вигляд, представлений на рисунку 8 та рисунку 9 (з урахуванням середнього тарифу на природний газ в Україні та Швеції відповідно).

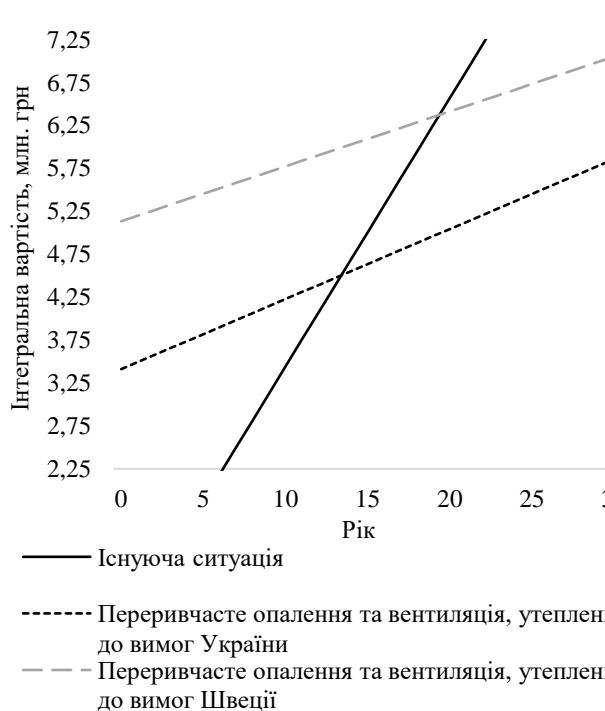


Рисунок 6. Інтегральна вартість для умов переривчастого опалення, підвищення теплового захисту будівлі до вимог України та Швеції (з урахуванням середнього тарифу на природний газ в Україні)



Рисунок 7. Інтегральна вартість для умов переривчастого опалення, підвищення теплового захисту будівлі до вимог України та Швеції (з урахуванням середнього тарифу на природний газ у Швеції)

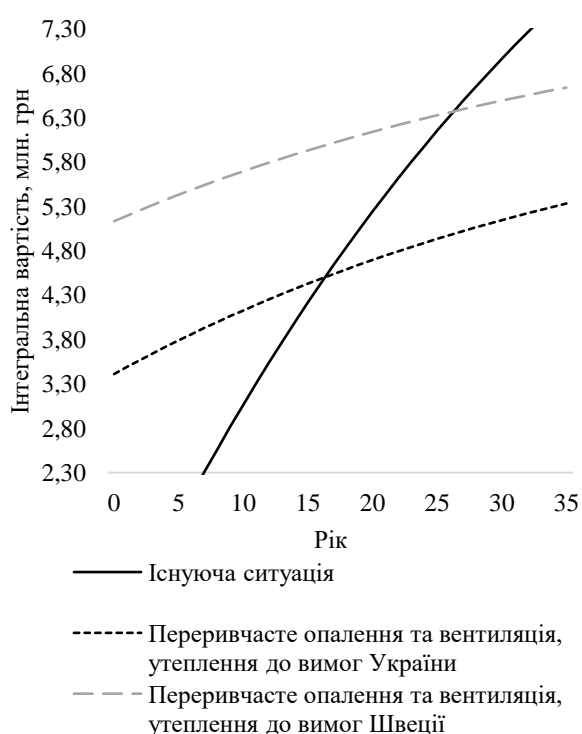


Рисунок 8. Інтегральна дисконтована вартість для умов переривчастого опалення, підвищення теплового захисту будівлі до вимог України та Швеції (з урахуванням середнього тарифу на природний газ в Україні)



Рисунок 9. Інтегральна дисконтована вартість для умов переривчастого опалення, підвищення теплового захисту будівлі до вимог України та Швеції (з урахуванням середнього тарифу на природний газ у Швеції)

Як видно з рисунку 8, дисконтований термін окупності заходу з утеплення огорожувальних конструкцій до нормативного показника України – 15,75 років, до нормативного показника Швеції – 25,7 років. Прогноз інтегрованої дисконтованої вартості з урахуванням економічних показників Швеції більш позитивний, проте розрахунок такої вартості виконано з урахуванням середнього тарифу на природний газ у Швеції, що є вищим практично у 3 рази, ніж в Україні (рисунок 9).

Тобто, при існуючій ставці дисконтування у 5,5% у Швеції, дисконтований термін окупності підвищення теплового захисту будівлі до вимог України і Швеції становить відповідно близько 5,1 та 8 років. Даний показник можна вважати мотиваційним для реалізації підвищення теплового захисту розглянутої будівлі за умов збільшення тарифів на енергоносії в Україні.

#### **Висновки**

Проведено розрахунок громадської будівлі в місті Київ згідно діючого стандарту України та у програмному середовищі DesignBuilder з метою встановлення доцільності реалізації заходів енергоефективності за діючих у нашій державі та європейській країні тарифах при отриманих техніко – економічних показниках:

1) Підвищення теплового захисту огорожувальних конструкцій будівлі шляхом їх утеплення до вимог України та коригування графіку опалення і вентиляції - економія теплової енергії 74% від початкової величини, простий термін окупності близько 14,4 років, дисконтований термін окупності за діючого тарифу на природний газ України та Швеції – 15,75 та 5,1 років відповідно;

2) Підвищення теплового захисту огорожувальних конструкцій будівлі шляхом їх утеплення до вимог Швеції та коригування графіку опалення і вентиляції - економія теплової енергії 80% від початкової величини, простий термін окупності близько 20,4 років, дисконтований термін окупності за діючого тарифу на природний газ України та Швеції – 25,7 та 8 років відповідно.

Отримані результати показують на необхідність балансування паритету відповідно до європейських показників між рівнем нормативних вимог до енергетичної ефективності будівель та цін на енергоносії. Продовження цих досліджень планується у напрямку економічних показників модернізації будівлі до рівня майже нульового споживання енергії (NZEB) при залученні відновлюваних джерел енергії.

#### **Список використаної літератури**

1. Будівельна галузь: стан та перспективи. URL: <http://budport.com.ua/news/12779-budivelnna-galuz-stan-ta-perspektivi> (дата звернення: 19.02.2019).

2. Обсяг площі: у 2019 році нежитлове будівництво в Україні зросло на 30%. URL: <https://gmk.center.ua/posts/obsyag-ploshhi-u-2019-roci-nezhitlove-budivnictvo-v-ukraini-zroslo-na-30/> (дата звернення: 12.03.2020).

3. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 12.10.2020 №260. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20#Text> (дата звернення: 4.01.2021).

4. Сертифікація енергетичної ефективності будівель. База даних сертифікатів. URL: <https://saee.gov.ua/uk/content/buildings-certification> (дата звернення: 1.12.2020).

5. European Commission.NZEB. URL: [https://energy.ec.europa.eu/index\\_en](https://energy.ec.europa.eu/index_en) (дата звернення: 18/06/2019)

6. Energy performance of buildings directive. URL: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en) (дата звернення: 2018)

7. Nearly Zero – Energy Building Strategy 2020. URL: <https://zebra2020.eu/>.

8. Grozījumi Ministru kabineta 2013. gada 9. jūlija noteikumos Nr. 383 "Noteikumi par ēku energosertifikāciju". *Likumi.lv - Latvijas Republikas tiesību akti*. URL: <https://likumi.lv/ta/id/277915-grozijumi-ministru-kabineta-2013-gada-9-julija-noteikumos-nr-383-noteikumi-par-eku-energocertifikaciju> (дата звернення: 10.11.2015).

9. Įsakymas dėl fizinių asmenų, siekiančių tapti Lietuvos respublikoje ekspertais, turinčiais teisę atlikti pastatų energinio naudingumo sertifikavimą, mokymo programos patvirtinimo. URL: <https://e-seimas.lrs.lt>.

10. EPBD implementation in the Czech Republic. *Ministerstvo průmyslu a obchodu*. URL: <https://epbd-ca.eu/wp-content/uploads/2019/05/CA-EPBD-IV-Czech-Republic-2018.pdf>.

11. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. [Чинний від 2015-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2015. 145 с.

12. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. [Чинний від 2017-05-01]. Вид. офіц. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово – комунального господарства України, 2017. 34 с.

13. BFS 2011:6 with amendments up to BFS 2018:4. Boverket's mandatory provisions and general recommendations, BBR. URL: <https://www.boverket.se/en/start/publications/publications/2019/boverkets-building-regulations--mandatory-provisions-and-general-recommendations-bbr/>.

14. Оперативний моніторинг ринку електричної енергії. *Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг*. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=56447> (дата звернення: 20.10.2021).
15. Динаміка цін на природний газ ресурсу НАК "Нафтогаз України" для промислових споживачів. *Національна компанія "Нафтогаз України"*. URL: <https://www.naftogaz.com/> (дата звернення: 17.12.2021).
16. Прейскурант на природний газ із ресурсів НАК «Нафтогаз України». URL: <http://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/486E117B34CF13EEC2257BCE0041B995?OpenDocument> (дата звернення: 16.12.2021).
17. Electricity prices and electricity contracts. *Statistics Sweden*. URL: <https://www.scb.se/en/finding-statistics/statistics-by-subject-area/energy/price-trends-in-the-energy-sector/electricity-prices-and-electricity-contracts/> (дата звернення: 09.12.2021).
18. Gas prices and gas contracts. *Statistics Sweden*. URL: <https://www.scb.se/en/finding-statistics/statistics-by-subject-area/energy/price-trends-in-the-energy-sector/gas-prices-and-gas-contracts/> (дата звернення: 09.12.2021).
19. Екструдований пінополістирол. *Тривіта*. URL: <https://trivita.ua/ua/istpleks-35v-1200h600h60-jekstrudirovannuj-penopolistirol> (дата звернення: 21.10.2021).
20. Утеплення фасадів в Києві. Вартість робіт. *Кабанчик. Сервіс замовлення послуг*. URL: <https://kiev.kabanchik.ua/ua/category/uteplenie-fasadov> (дата звернення: 21.10.2021).
21. Клей для теплоізоляції. *Інтернет - магазин "Конструктив"*. URL: <https://konstruktiv.kiev.ua/steklovata-profitep-150-plyus-150-610-1230-4-5m-kv/> (дата звернення: 21.10.2021).
22. Полімерна теплоізоляція PIR termPIR. *Інтернет - магазин "Наша стройка"*. URL: <https://nasha-stroyka.com.ua/stroitelstvo-i-remont/> (дата звернення: 21.10.2021).
23. Профіль Softline. *Veka*. URL: <https://veka.ua/production/special/profilnye-sistemy-veka/veka-softline/> (дата звернення: 20.10.2021).
24. Двері протипожежні металеві глухі. *ПожСоюз*. URL: <https://euroservis.com.ua/ua/dveri-protivopozharnye-metallicheskie-glukhie-dmp-ei60-1-2100kh900-prav.-samodovodyashchaya-petlya/> (дата звернення: 20.10.2021).
25. Вхідні двері. *Окна Калашикова*. URL: <http://okna-kalashnikova.com.ua/dveri/vhodnie/dver-vhodnaja-metalloplastikovaja-900h2050.html> (дата звернення: 02.10.2021).
26. Діаграма перерахунку енергетичних величин. *Асоціація інженерів енергетиків України*. URL: <https://aee-ua.business.site/> (дата звернення: 22.12.2021).
27. Буяк Н. А. Оцінювання ефективності енергетичної системи будівлі в умовах теплового комфорту : дис. канд.техн.наук :05.14.01. Київ, 2017. 214 с. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/21402/1/aref\\_Buiak.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/21402/1/aref_Buiak.pdf).
28. Облікова ставка Національного банку. *Національний банк України*. URL: <https://bank.gov.ua/ua/monetary/stages/archive-rish>.
29. Exchange rate and policy discount rate in Sweden. *Research Gate*. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Exchange-rate-and-policy-discount-rate-in-Sweden\\_fig4\\_46456927](https://www.researchgate.net/figure/Exchange-rate-and-policy-discount-rate-in-Sweden_fig4_46456927).
30. REHVA Journal 06/2019 - NZEB requirements in Nordic countries. *REHVA*. URL: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/nzeb-requirements-in-nordic-countries>.
31. ДСТУ Б EN 15251:2011. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики. Чинний від 2013-07-01. Вид. офіц. Київ, 2012. 71 с. URL: [http://www.mathcentre.com.ua/download/dstu\\_en\\_15251-2011.pdf](http://www.mathcentre.com.ua/download/dstu_en_15251-2011.pdf).

Deshko Valerii<sup>1,2</sup>, Dr. of Tech. Sc., prof., ORCID 0000-0002-8218-3933  
Buyak Nadiya<sup>1</sup>, Ph. D. of Tech. Sc., assistant, ORCID 0000-0003-0597-6945  
Bilous Inna<sup>1</sup>, Ph. D. of Tech. Sc., docent, ORCID 0000-0002-6640-103X  
Naumchuk Olena<sup>1</sup>, Ph. D. student, ORCID 0000-0002-7059-8867

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

<sup>2</sup>Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

#### ECONOMIC ASSESSMENT OF INCREASING THERMAL PROTECTION OF MUNICIPAL BUILDINGS TO MODERN EUROPEAN REQUIREMENTS

According to the plan to reduce carbon dioxide emissions in Ukraine, there is a need to replace traditional energy sources and, accordingly, types of fuel. The paper highlights the main differences between the current regulatory documents in the field of energy efficiency of buildings, analyzes the dynamics of the energy demand of a public building during its thermal modernization to the normative indicators in force in Ukraine and Europe,

and the regulation of the heating and ventilation schedule. The energy consumption assessment is based on the results of calculations in accordance with the current standard DSTU A.2.2 - 12:2015 and the building model in the DesignBuilder software environment. Using DesignBuilder helps evaluate new and existing building environmental performance, energy and comfort, HVAC, daylighting, cost, design optimization, CFD, BREEAM/LEED credits and reports that meet multiple national building codes and certification standards.

The influence of the economic indicators of Ukraine and Europe on the overall sensitivity of the project to increase the thermal protection of a public building is studied, taking into account the historical increase in energy prices in the countries under consideration. The work is the basis for further analysis and development of the concept of buildings with almost zero energy consumption in Ukraine.

### References

1. Budivel'na haluz': stan ta perspektyvy. [Online]. Available at: <http://budport.com.ua/news/12779-budivelna-galuz-stan-ta-perspektivi>. [Accessed: 19-Feb-2019].
2. Obsyah ploshchi: u 2019 rotsi nezhytlove budivnytstvo v Ukrayini zroslo na 30%. [Online]. Available at: <https://gmcenter.ua/posts/obsyag-ploshhi-u-2019-roci-nezhitlove-budivnictvo-v-ukraini-zroslo-na-30/>. [Accessed: 12-Mar-2020].
3. Pro zatverdzhennya Minimal'nykh vymoh do enerhetychnoyi efektyvnosti budivel': nakaz Ministerstva rozvytku hromad ta terytoriy Ukrayiny vid 12.10.2020 №260. [Online]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20#Text>. [Accessed: 04-Jan-2021].
4. Sertyfikatsiya enerhetychnoyi efektyvnosti budivel'. Baza danykh sertyfikatov. [Online]. Available at: <https://saee.gov.ua/uk/content/buildings-certification>. [Accessed: 01-Dec-2020].
5. European Commission.NZEB. [Online]. Available at: [https://energy.ec.europa.eu/index\\_en](https://energy.ec.europa.eu/index_en). [Accessed: 18-Jun-2019].
6. Energy performance of buildings directive. [Online]. Available at: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en). [Accessed: 2018].
7. Nearly Zero – Energy Building Strategy 2020. [Online]. Available at: <https://zebra2020.eu/>.
8. Grozījumi Ministru kabineta 2013. gada 9. jūlija noteikumos Nr. 383 "Noteikumi par ēku energosertifikāciju". *Likumi.lv - Latvijas Republikas tiesību akti*. [Online]. Available at: <https://likumi.lv/ta/id/277915-grozijumi-ministru-kabineta-2013-gada-9-julija-noteikumos-nr-383-noteikumi-par-eku-energosertifikaciju>. [Accessed: 10-Nov-2015].
9. Jsakymas dėl fizinių asmenų, siekiančių tapti lietuvos respublikoje ekspertais, turinčiais teisę atlikti pastatų energinio naudingumo sertifikavimą, mokymo programos patvirtinimo. [Online]. Available at: <https://e-seimas.lrs.lt>.
10. EPBD implementation in the Czech Republic. *Ministerstvo průmyslu a obchodu*. [Online]. Available at: <https://epbd-ca.eu/wp-content/uploads/2019/05/CA-EPBD-IV-Czech-Republic-2018.pdf>.
11. Minrehion Ukrayiny, 2015. *DSTU B A.2.2-12:2015. Enerhetychna efektyvnist' budivel'. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannya pry opalenni, okholodzhenni, ventilyatsiyi, osvittenni ta haryachomu vodopostachanni*. Kyiv.
12. Ministerstvo rehional'noho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo – komunal'noho hospodarstva Ukrayiny, 2017. *DBN V.2.6-31:2016. Teplova izolyatsiya budivel'*. Kyiv.
13. Boverket. 2022. *Boverket's building regulations – mandatory provisions and general recommendations*, BBR. [online] Available at: <https://www.boverket.se/en/start/publications/publications/2019/boverkets-building-regulations--mandatory-provisions-and-general-recommendations-bbr/>.
14. Natsional'na komisiya, shcho zabezpechuye derzhavne rehulyuvannya u sferi enerhetyky ta komunal'nykh posluh. 2022. *Operatyvnyy monitorynh rynku elektrychnoyi enerhiyi*. [online] Available at: <https://www.nerc.gov.ua/?id=56447> [Accessed 20 October 2021].
15. Natsional'na kompaniya "Naftohaz Ukrayiny." 2022. *Dynamika tsiny na pryrodnyy hazovyy resurs NAK "Naftohaz Ukrayiny" dlya promyslovykh spozhyvachiv*. [online] Available at: <https://www.naftogaz.com> [Accessed 17 December 2021].
16. *Preyskurant na pryrodnyy haz iz resursiv NAK «Naftohaz Ukrayiny»*. [online] Available at: <http://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/486E117B34CF13EEC2257BCE0041B995?OpenDocument> [Accessed 16 December 2021].
17. Statistics Sweden. *Electricity prices and electricity contracts*. [online] Available at: <https://www.scb.se/en/finding-statistics/statistics-by-subject-area/energy/price-trends-in-the-energy-sector/electricity-prices-and-electricity-contracts/> [Accessed 9 December 2021].
18. Statistics Sweden. *Gas prices and gas contracts*. [online] Available at: <https://www.scb.se/en/finding-statistics/statistics-by-subject-area/energy/price-trends-in-the-energy-sector/gas-prices-and-gas-contracts/> [Accessed 9 December 2021].

19. Tryvita. n.d. *Ekstrudovanny pinopolistyrol*. [online] Available at: <<https://trivita.ua/ua/istpleks-35v-1200h600h60-jekstrudirovannyj-penopolistirol>> [Accessed 21 October 2021].
20. Kabanchyk. Servis zamovlennya posluh. *Uteplennya fasadiv u Kyievi. Vartist' robit*. [online] Available at: <<https://kiev.kabanchik.ua/ua/category/uteplenie-fasadov>> [Accessed 21 October 2021].
21. Internet - mahazyn "Konstruktyv". *Kley dlya teploizolyatsiyi*. [online] Available at: <<https://konstruktyv.kiev.ua/steklovata-profitep-150-plyus-150-610-1230-4-5m-kv/>> [Accessed 21 October 2021].
22. Internet - mahazyn "Nasha stroyka". *Polimerna teploizolyatsiya PIR termPIR*. [online] Available at: <<https://nasha-stroyka.com.ua/stroitelstvo-i-remont/>> [Accessed 21 October 2021].
23. Veka. *Profil' Softline*. [online] Available at: <<https://veka.ua/production/special/profilnye-sistemy-veka/veka-softline/>> [Accessed 20 October 2021].
24. PozhSoyuz. *Dveri protypozhezhni metalevi hlukhi*. [online] Available at: <<https://euroservis.com.ua/ua/dveri-protivopozharnye-metallicheskie-glukhie-dmp-ei60-1-2100kh900-prav.-samodovodyashchaya-petlya/>> [Accessed 20 October 2021].
25. Okna Kalashnikova.. *Vkhidni dveri*. [online] Available at: <<http://okna-kalashnikova.com.ua/dveri/vhodnie/dver-vhodnaja-metalloplastikovaja-900h2050.html>> [Accessed 02 October 2021].
26. Asotsiatsiya inzheneriv enerhetykov Ukraini. *Diahrama pererakhunku enerhetychnykh velychyn*. [online] Available at: <<https://aee-ua.business.site/>> [Accessed 22 December 2021].
27. Buyak, N., 2017. *Otsinka efektyvnosti enerhetychnoyi systemy budivli v umovakh teplovoho komfortu*. Ph.D. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
28. Natsional'nyy bank Ukrainy. *Oblikova stavka Natsional'noho banku*. [online] Available at: <<https://bank.gov.ua/ua/monetary/stages/archive-rish>>.
29. Research Gate. *Exchange rate and policy discount rate in Sweden*. [online] Available at: <[https://www.researchgate.net/figure/Exchange-rate-and-policy-discount-rate-in-Sweden\\_fig4\\_46456927](https://www.researchgate.net/figure/Exchange-rate-and-policy-discount-rate-in-Sweden_fig4_46456927)>.
30. REHVA. 2022. *REHVA Journal 06/2019 - NZEB requirements in Nordic countries*. [online] Available at: <<https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/nzeb-requirements-in-nordic-countries>>.
31. Ministerstvo rehional'noho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo – komunal'noho hospodarstva Ukrainy, 2012. *DSTU B EN 15251:2015. Rozrakhunkovi parametry mikroklimatu prymishchen' dlya proektuvannya ta otsinky enerhetychnykh kharakterystyk budivel' po vidnoshennyu do yakosti povitrya, teplovoho komfortu, osviltennya ta akustyky*. Kyiv.

Надійшла 17.05.2022  
Received 17.05.2022

## АВТОНОМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУМИННОГО КОМПРЕСОРА ДЛЯ ВІДЦЕНТРОВОЇ СИСТЕМИ ДИСТИЛЯЦІЇ

*Стаття присвячена розробці та дослідженню енергозберігаючих технологій в промисловій теплоенергетиці, а саме використанню струминного компресора для підвищення енергоефективності дистиляційної установки на базі відцентрового дистилятора. Використання відцентрових сил в дистиляційній установці інтенсифікує в ній теплообмінні процеси, а значить зменшує матеріалоємність системи. Використання теплового насоса на базі струминного компресора утилізує теплоту конденсації вторинної пари при випаровуванні розчину, що забезпечує зменшення питомих витрат енергії на отримання дистиляту. В статті приведено результати автономних досліджень оригінального струминного компресора, в якому передбачено кріплення робочого сопла на нерухомому корпусі відцентрового дистилятора, а камери змішування і дифузора на роторі відцентрового дистилятора, що дозволяє розробити відцентровий дистилятор без використання уцілень між паровими порожнинами з різним тиском. Проведено порівняння експериментальних характеристик струминного компресора з розрахунковими.*

*Проведені експериментальні дослідження струминного компресора підтвердили його ефективність, показано задовільне співпадіння експериментальних і розрахункових залежностей. Показано, що зміщення осі робочого сопла струминного компресора відносно осі змішувальної камери на  $\pm 0,52$  мм зменшує коефіцієнт впорскування менше ніж на 10%. Робиться висновок, що осі робочого сопла і змішувальної камери можуть не збігатися абсолютно точно в реальних умовах експлуатації. Зміна довжини вхідного перерізу змішувальної камери в межах  $\pm 1$  мм і зміщення осі робочого сопла струминного компресора відносно осі змішувальної камери в межах  $\pm 0,2$  мм допускається при проектуванні та майбутніх експериментальних дослідженнях дистилятора зі струминним компресором.*

*Результати експериментального дослідження дають можливість в майбутньому розробити відцентровий дистилятор зі струминним компресором, в якому робоче сопло компресора буде закріплено на нерухомому корпусі, а дифузор і змішувальна камера – на роторі.*

**Ключові слова:** регенерація води, струминний компресор, дистилятор, ефективність.

**Вступ.** В системах регенерації води на пілотованих космічних об'єктах перспективними є відцентрові термічні дистилятори [1-2]. До таких систем висуваються жорсткі вимоги щодо габаритів, маси та енерговитрат. Тому при їх розробці актуальним є використання різних методів інтенсифікації процесів теплообміну (забезпечують зниження габаритів та маси), а також методів зниження питомого енергоспоживання (багатоступінчаста випарка, застосування теплових насосів). В якості теплового насоса можуть бути: термоелектрична батарея (ТТН), механічний або струминний компресор. Зокрема, на Міжнародній космічній станції (МКС) працює відцентровий дистилятор з механічним компресором [3-6]. На основі 15 років експлуатації дистилятора на МКС було зроблено висновок, що незважаючи на в цілому хороші показники, для майбутніх далеких космічних місій потрібна інша система. Застосування механічного компресора не дозволяє забезпечити достатню надійність системи через відсутність надійних промислових зразків.

Дистилятор з термоелектричним тепловим насосом було детально досліджено раніше, нині він доведений до пілотного зразку [7-16]. Він має високу ефективність, проте вимагає застосування такого складного у виготовленні та експлуатації елемента, як термоелектрична батарея.

Застосування в якості теплового насоса струминного компресора (парового ежектора) є перспективним внаслідок його простоти, малих габаритів та маси. У його конструкції немає вузлів і деталей, на роботу яких можуть впливати вібрація, ударні навантаження, а також елементів, які мають обмежений ресурс, що гарантує високу надійність пристрою. Слід зазначити, що створення дистилятора на будь-яку задану потужність, при використанні в ньому струменевого компресора, не призведе до труднощів технологічного плану.

**Мета та завдання.** Враховуючи необхідну малу продуктивність дистиляційної системи для пілотованих космічних апаратів (1...10 л/год) і, відповідно, мініатюрні розміри необхідного струменевого компресора, виникає питання придатності застосування відомих методик розрахунку струменевих

компресорів для нашого випадку. У зв'язку з цим у цій роботі було проведено експериментальні дослідження струменевого компресора продуктивністю по робочій парі (0,15...0,25) кг/годину і проведено зіставлення отриманих результатів з розрахунковими характеристиками за відомими методиками.

#### Опис схеми та методики дослідження.

Експериментальні дослідження характеристик струминного компресора були проведені на стенді, схема якого наведена на рис. 1.

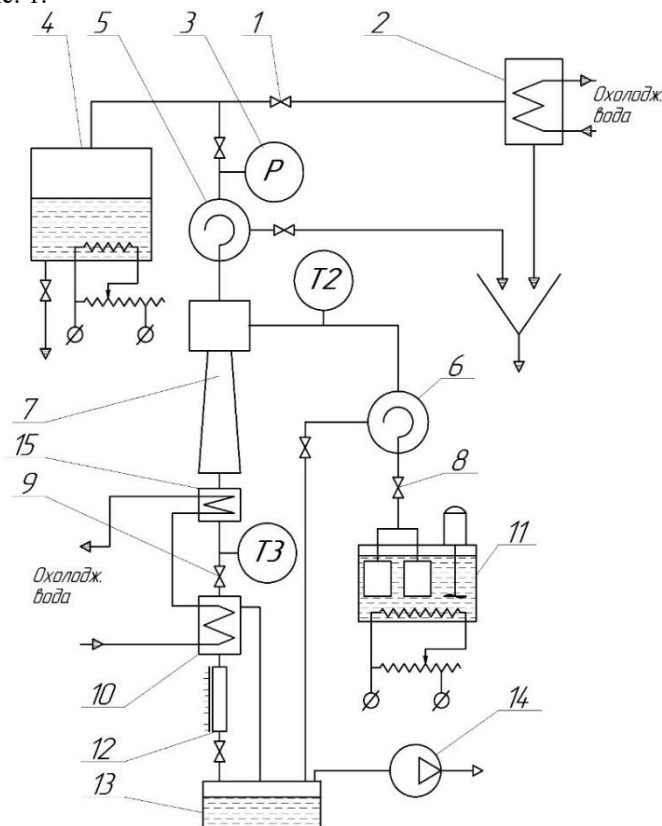


Рисунок 1 – Принципова схема експериментальної установки.

Експериментальна установка складається з струминного насоса 7, котла робочої пари 4, генератора пари для інжекції 11, краплеуловлювачів 5 і 6, основного конденсатора 10, допоміжного конденсатора 2, ємності збору конденсату 13, вакуум-насоса 14, регулюючої і запірної арматури 1, 8, 9, системи електроживлення, а також приладів та обладнання, призначених для проведення необхідних замірів.

Робота установки відбувається в такий спосіб. Робоча пара від котла 4 з тиском 1,5 ата надходить через краплеуловлювач 5 (призначений для відділення і відведення в дренаж конденсату) до сопла струминного насоса 7. Продуктивність котла робочої пари 4 регулюється зміною електричної потужності ТЕНів та зміною витрати пари через регулюючий вентиль 1 до допоміжного конденсатора 2. Пара від генератора пари для інжекції 11 через регулюючий вентиль 8, призначений для зміни тиску інжектуючої пари на вході в струминний насос 7, і краплеуловлювач 6 надходить у приймальну камеру струминного насоса 7. В якості генератора пари 11 використано рідинний термостат СЖМК-19/2,5 з зануреними в нього двома заповненими водою скляними посудинами.

Стиснута пара на виході з струминного насоса 7 через регулюючий вентиль 9 (призначений для зміни тиску змішаного потоку пари на виході з дифузора струминного насоса 7) надходить в основний конденсатор 10. Конденсат стисненої пари з конденсатора 11 через мірник 12 надходить у ємність для збору конденсату 13. Початкове розрідження і відсмоктування неконденсованих газів проводиться вакуум-насосом 14. Перегрів стисненої пари знімався охолоджувачем 15.

На пульті керування роботою установки розміщені всі вимірювальні та контрольні прилади, а також пристрої комутації.

На рис. 2 наведена принципова схема струминного компресора.

Конструкція дослідного зразка струминного компресора дозволяла змінювати відстань  $L1$  від зрізу робочого сопла до входу в циліндричну камеру змішування 1 в межах 7,4...10,4 мм. Була також передбачена можливість задавати ексцентриситет осі парового каналу робочого сопла 2 по відношенню до осі парового каналу камери змішування 1 в межах  $\pm 0,52$  мм (див. рис. 3) шляхом повертання несиметричного сопла 2 на певний кут в посадочному отворі корпуса 3.



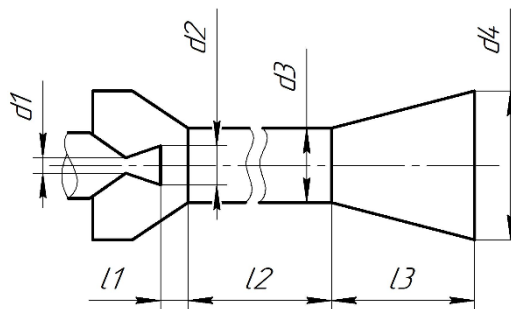
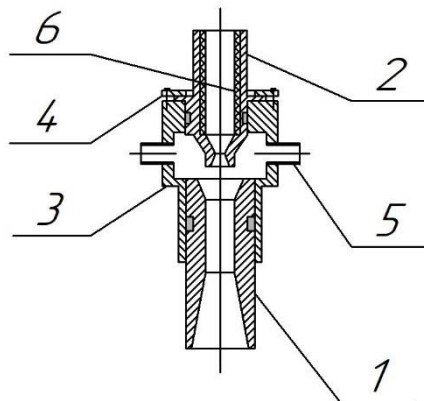


Рисунок 2 – Схема струминного компресора.



1 – камера змішування (дифузор), 2 – робоче сопло, 3 – корпус, 4 – прижимне кільце, 5 – трубки для підведення пари для інжекції, 6 – теплоізоляційна вставка

Рисунок 3 – Конструкція струминного компресора

У процесі проведення експериментів з дослідження характеристик струминного компресора при автономному режимі його роботи вимірювалися наступні величини: витрата конденсату стисненої пари на виході з струминного компресора, тиск робочої пари, температура насичення пари для інжекції та температура насичення стисненої пари виході з дифузора струминного компресора.

Вимірювання витрати конденсату стисненої пари на виході зі струминного компресора здійснювалося об'ємним методом, для чого служив мірник 12 (див. рис. 1). Надлишковий тиск робочої пари вимірювався манометром 3 (клас точності 0,4). Атмосферний тиск визначався барометром-анероїдом (клас точності 1,5).

Температура насичення інжектваної та стисненої пари на виході з дифузора струминного компресора вимірювалися хромель-копелевими термопарами, що були розташовані в паровому об'ємі інжектваної і стиснутої пари відповідно перед входом до приймальної камери і на виході з дифузора струминного компресора 7. ЕДС термопар вимірювалася електронним цифровим вольтметром (клас точності 1,5).

Для визначення коефіцієнтів інжекції при різних ступенях стиснення  $P_c/P_n$  (відношення тиску стиснутої пари  $P_c$  до початкового тиску пари  $P_n$ ) була отримана залежність витрати робочої пари від її тиску перед соплом  $P_p$  струминного компресора  $G_p = f(P_p)$  для сопла експериментального зразка струминного насоса. Експериментальні дані (рис. 3) підтвердили з точністю 1,5% розрахункову залежність.

Експерименти з дослідження характеристик струминного компресора проводилися при постійних тисках робочої пари (1,5 ата) і тиску пари, що ежектуються 0,11 ата. Тиск стисненої пари змінювався від 0,11 до 0,16 ата через кожні 0,01 ата. При цьому витрата робочої пари приймалася  $G_p = 0,2$  кг/год.

Вимірювання основних величин (тиск робочої пари перед апаратом, температури насичення обох потоків пари, витрата конденсату змішаної пари) проводилися при досягненні ними стаціонарних значень тобто таких значень, які не змінювалися протягом 3...5 хв. Для зменшення випадкової похибки після виходу на заданий режим роботи ежектора вимірювання проводилися по 3-6 разів для кожного режиму роботи струминного компресора.

Витрата інжектваної пари визначалася як різниця між витратою змішаного потоку пари, що вимірювався об'ємним методом, і витратою робочої пари. Витрата робочої пари визначалася по отриманій залежності її витрати від тиску перед соплом струминного компресора (рис. 4).

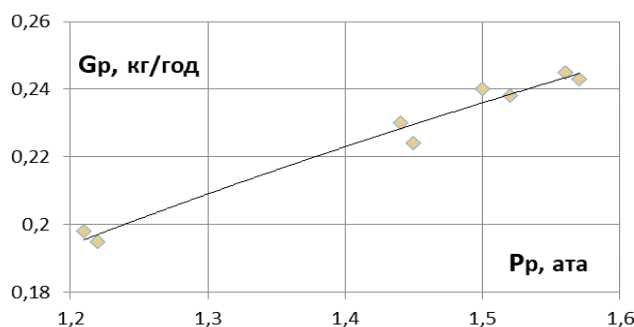


Рисунок 4 – Залежність витрати робочої пари  $G_p$  від її тиску перед соплом  $P_p$  струминного компресора при критичному діаметрі сопла  $d_{кр} = 0,61$  мм.

**Результати експериментальних досліджень.** Експериментально встановлено вплив на роботу компресора розташування сопла не на одній осі по відношенню до камери змішування. Як видно з рис. 5, зміщення осі сопла відносно осі камери змішування в межах  $\pm 0,5$  мм при всіх відношеннях тисків  $P_c/P_n$  призводить до зменшення коефіцієнту інжекції не більше, ніж на 10%.

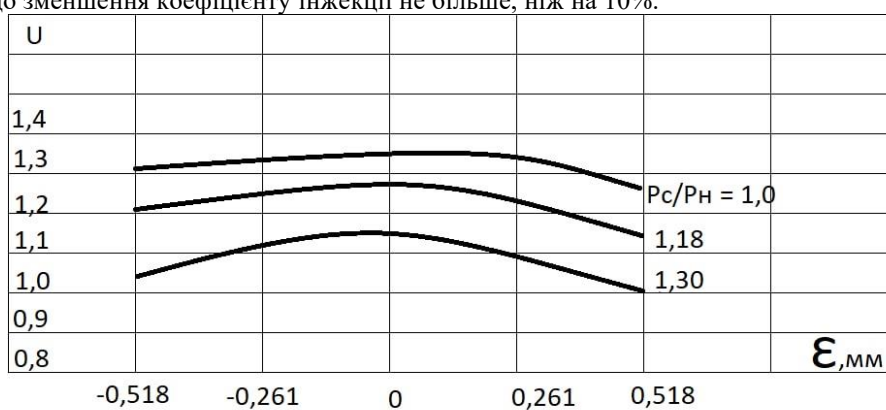


Рисунок 5 – Експериментальна залежність коефіцієнту інжекції  $U$  від ексцентриситету  $\epsilon$  при постійній довжині вхідної ділянки

На рис. 6 наведені результати дослідження впливу довжини вхідної ділянки  $L1$  камери змішування струминного компресора на його коефіцієнт інжекції  $U = G_w/G_p$ . Із рис.6 видно, що в діапазоні ступеня стиснення компресора  $P_c/P_n = 1,05 \dots 1,43$  оптимальним значенням довжини вхідної ділянки камери змішування є відстань  $L1 = 8,4$  мм, при діаметрі камери змішування  $d3 = 2,8$  мм та критичному діаметрі робочого сопла  $d_{кр} = 2,8$  мм.

На рис. 7 зіставлені експериментальні характеристики дослідного струминного компресора з розрахунковою залежністю за методикою, викладеною в роботі [17]. Як видно з рис.7 експериментальна залежність (1) для оптимального струменевого насоса розташовується нижче розрахункової на 5% (при великих  $P_c/P_n$ ) та близько 15% (при малих  $P_c/P_n$ ), що необхідно враховувати при проектуванні таких мініатюрних струминних компресорів.

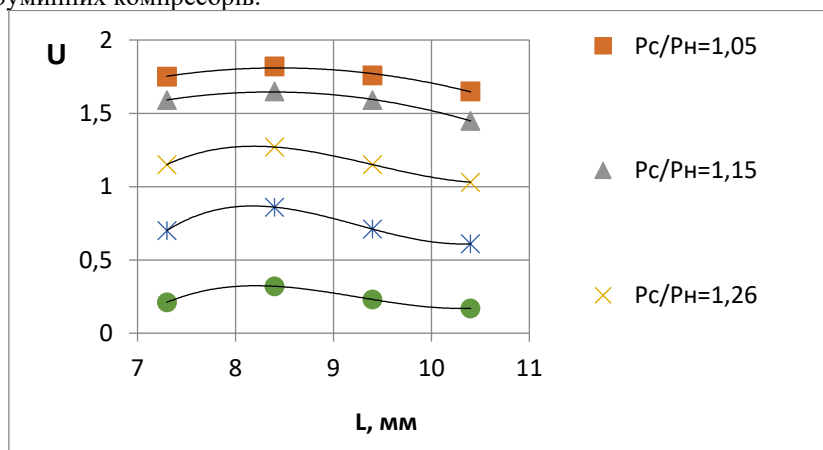


Рисунок 6 – Залежність коефіцієнту інжекції  $U$  від довжини вхідної ділянки камери змішування  $L$ .

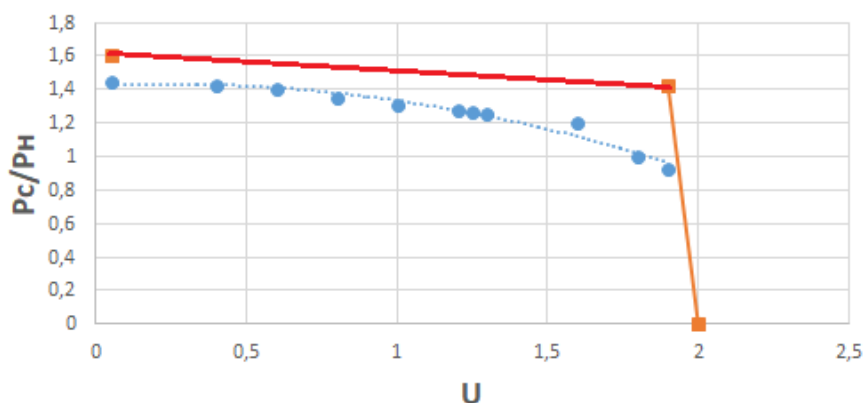


Рисунок 7 – Порівняння експериментальної залежності  $P_c/P_n=f(U)$  струминного компресора з розрахунковою: точки – експериментальні дані; суцільна лінія – розрахунок по [17].

### Висновки та рекомендації

1. Проведений цикл досліджень струминного компресора підтвердив його працездатність та достатню узгодженість розрахункових та експериментальних характеристик компресора.

2. Зміщення осі робочого сопла струминного компресора щодо осі камери змішування (ексцентриситет зазначених осей) на величину  $\pm 0,52$  мм дає зменшення коефіцієнта інжекції не більше ніж на 10%. Тому при складанні апарату цілком допустима неспівпадіння осей робочого сопла та камери змішування в межах  $\pm 0,2$  мм.

3. Зміна довжини вхідної ділянки камери змішування в межах  $\pm 1$  мм та зміщення осі робочого сопла струминного компресора щодо осі камери змішування в межах  $\pm 0,2$  мм є допустимі при конструюванні та складанні дистилятора з струминним тепловим насосом.

Отримані в результаті експериментального дослідження висновки дають можливість розробити відцентровий дистилятор із струминним компресором, в якому робоче сопло компресора буде закріплено на нерухомому корпусі, а дифузор і камера змішування будуть закріплені на роторі. Така конструкція дозволить відмовитись від ущільнення між робочим соплом і камерою змішування струминного компресора.

### Список використаної літератури

1. L. K. Kelsey, S. P. Boyce, G. Speight, P. Pasadilla, P. Tewes, E. Rabel, C. Meyer, Closing the water loop for exploration: 2020-2021 status of the brine processor assembly. 50th International Conference on Environmental Systems. 12-15 July 2021. ICES-2021-428. <https://ttu-ir.tdl.org/handle/2346/87310> (accessed 04 June 2022).
2. M. L. Hancock, S. J. Snyder, P. E. Hintze, An Environmental Control and Life Support System (ECLSS) for Deep Space and Commercial Habitats. 50th International Conference on Environmental Systems. 12-15 July 2021. ICES-2021-223. <https://ttu-ir.tdl.org/handle/2346/87157> (accessed 04 June 2022).
3. J. Lee Broyan, Jr., L. Shaw, M. McKinley, C. Meyer, M. K. Ewert, W. F. Schneider, M. Meyer, G. A. Ruff, A. C. Owens, R. L. Gatens. NASA Environmental Control and Life Support Technology Development for Exploration: 2020 to 2021 Overview. 50th International Conference on Environmental Systems. 12-15 July 2021. ICES-2021-384. [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210010866/downloads/ICES\\_384-FY2021%20ECLSS%20Overview-1676Review%20-%20Final.docx.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210010866/downloads/ICES_384-FY2021%20ECLSS%20Overview-1676Review%20-%20Final.docx.pdf) (accessed 04 June 2022).
4. Vapor compression distillation module. (Contracts NAS9-13714 \$ NAS9-14234. Prepared by P. P. Nuccio June 1975. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19750023674> (accessed 04 June 2022).
5. L. D. Noble, F. H. Schubert, R. J. Pudoka, J. H. Miernik. Phase Change Water Recovery for the Space Station Freedom and Future Exploration Missions. 20th Intersociety Conference on Environmental Systems. Williamsburg, Virginia, July 9-12, 1990. Paper no 901294. <https://www.jstor.org/stable/44472538> (accessed 04 June 2022).
6. P. Wieland, C. Hutchens, D. Long B. Salyer. Final Report on Life Testing of the Vapor Compression Distillation/Urine Processing Assembly (VCD/UPA) at the Marshall Space Flight Center (1993 to 1997). August 1998 <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19980211458/downloads/19980211458.pdf> (accessed 04 June 2022).
7. Rifert, V., V. Usenko, I. Zolotukhin, A. MacKnight and A. Lubman, "Design Optimisation of Cascade Rotary Distiller with the Heat Pump for Water Reclamation from Urine", SAE Paper 2001-01-2248, the 31st International Conference on Environmental Systems, Orlando, July 2001. <https://doi.org/10.4271/2001-01-2248>
8. V. G. Rifert, V. I. Usenko, I. V. Zolotukhin, A. MacKnight, A. Lubman, Cascaded Distillation Technology for Water Processing in Space, SAE Paper 2003-01-2625. 34th International Conference on Environmental Systems, Orlando, July 2003. <https://doi.org/10.4271/2003-01-2625>

9.A. Lubman, A. MacKnight, V. Rifert, I. Zolotukhin, K. Pickering, Wastewater Processing Cascade Distillation Subsystem. Design and Evaluation. SAE International, 2006-01-2273, July 2006. <https://doi.org/10.4271/2006-01-2273>

10.A. Lubman, A. MacKnight, V. Rifert, P. Barabash, Cascade Distillation Subsystem Hardware Development for Verification Testing. SAE International, 2007-01-3177, July 2007. <https://doi.org/10.4271/2007-01-3177>

11.A.S.Solomakha, L.I.Anatychuk, V.G.Rifert, P.A.Barabash, V.Usenko, V.Petrenko. Thermal distillation system for deep space missions: rationale for the choice. 71st International Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition, 12-14 October 2020. IAC-20- A1,VP,15,x61344. 7 pages.

12.V.G.Rifert, L.I.Anatychuk, P.A. Barabash, V.I.Usenko, A.P.Strikun, A.V. Prybyla, Improvement of the distillation methods by using centrifugal forces for water recovery in space flight applications (2017) Journal of Thermoelectricity, (1), pp. 71-83. [http://jt.inst.cv.ua/jt/jt\\_2017\\_01\\_en.pdf](http://jt.inst.cv.ua/jt/jt_2017_01_en.pdf)

13.V. G. Rifert, L. I. Anatychuk, A. S. Solomakha, P.A. Barabash, V. Usenko, A.V. Prybyla, M. Naymark, V. Petrenko. Upgrade the centrifugal multiple-effect distiller for deep space missions. 70th International Astronautical Congress (IAC), Washington D.C., United States, 21-25 October 2019. IAC-19-A1,IP,11,x54316.

14.V.G.Rifert, L.I.Anatychuk, P.O.Barabash, V.I.Usenko, A.P.Strikun, A. S. Solomakha, V.G.Petrenko, A.V. Prybyla, Evolution of centrifugal distillation system with a thermoelectric heat pump for space missions. Part 3. Analysis of local and integral characteristics of centrifugal distillation system with thermoelectric heat pump. Journal of Thermoelectricity, 2019, 3, pp. 5 – 19. [http://jt.inst.cv.ua/jt/jt\\_2019\\_03\\_en.pdf](http://jt.inst.cv.ua/jt/jt_2019_03_en.pdf)

15.V.G.Rifert, L.I.Anatychuk, P.O.Barabash, V.I.Usenko, A.P.Strikun, A. S. Solomakha, V.G.Petrenko, A.V.Prybyla (2019). Comparative analysis of thermal distillation methods with heat pumps for long space flights. Journal of Thermoelectricity, 2019, 4, pp. 5 – 17. [http://jt.inst.cv.ua/jt/jt\\_2019\\_04\\_en.pdf](http://jt.inst.cv.ua/jt/jt_2019_04_en.pdf)

16.A. S. Solomakha, V. G. Rifert, P. A. Barabash, V. Petrenko, M. Yaroshevich. Centrifugal flash distiller for life support system. 72th International Astronautical Congress (IAC), Dubai, United Arab Emirates, 25-29 October 2021. IAC-21,A1,IP,6,x66795

17.Sokolov Ya.E., Singer N.M. Inkjet devices. M.: Energy, 1970.

**P.O. Barabash**, Ph.D. tech. Sciences, Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-1252-494X

**A.S. Solomakha**, Ph.D. tech. Sciences, Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-1061-6277

**V.G. Petrenko**, Ph.D. tech. Sciences, S.Sc., ORCID 0000-0001-6591-9550

**V.Yu. Marakhovskaya**, master's student, ORCID 0000-0002-0039-2054

**National Technical University of Ukraine**

**Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute**

#### **AUTONOMOUS INVESTIGATIONS OF JET COMPRESSOR FOR CENTRIFUGAL DISTILLATION SYSTEM**

*The article is devoted to the development and research of energy-saving technologies in the industrial heat industry, namely the use of a jet compressor to increase the energy efficiency of a distillation unit based on a centrifugal distiller. The use of centrifugal forces in the distillation unit intensifies the heat transfer processes in it, and thus reduces the material consumption of the system. The use of a heat pump based on a jet compressor utilizes the heat of condensation of secondary steam during evaporation of the solution, which reduces the specific energy consumption for the distillate. The article presents the results of autonomous research of the original jet compressor, which provides mounting of the working nozzle on the stationary body of the centrifugal distiller, and the mixing chamber and diffuser on the rotor of the centrifugal distiller, which allows to develop a centrifugal distiller without The experimental characteristics of the jet compressor are compared with the calculated ones.*

*Studies of the jet compressor confirmed its efficiency and sufficient consistency of the calculated and experimental characteristics of the compressor. Shifting the axis of the working nozzle of the jet compressor relative to the axis of the mixing chamber (eccentricity of these axes) by  $\pm 0.52$  mm gives a reduction in the injection ratio of not less than 10%. Therefore, when assembling the apparatus, it is quite permissible that the axes of the working nozzle and the mixing chamber do not coincide within  $\pm 0.2$  mm. Changing the length of the inlet section of the mixing chamber within  $\pm 1$  mm and shifting the axis of the working nozzle of the jet compressor relative to the axis of the mixing chamber within  $\pm 0.2$  mm are allowed when designing and assembling a distiller with jet compressor.*

*The results of the experimental study make it possible to develop a centrifugal distiller with a jet compressor, in which the working nozzle of the compressor will be mounted on a fixed body, and the diffuser and mixing chamber will be mounted on the rotor. This design will eliminate the seal between the working nozzle and the mixing chamber of the jet compressor.*

**Key words:** water regeneration, jet compressor, distiller, efficiency.

Надійшла 9.06.2022

Received 9.06.2022

## ЕНЕРГЕТИЧНИЙ І ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТИПОВИХ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ

Викладено основні особливості енергетичного та ексергетичного методів аналізу ефективності енергетичних перетворень в типових системах опалення (котельні, електроопалення, теплові насоси з електроприводом). Складено рівняння енергетичних та ексергетичних балансів систем та їх елементів. На їх основі одержано вирази для обчислення показників ефективності. Приведено результати розрахунків і зіставлення коефіцієнтів перетворення енергії (COP - Coefficient of Performance) і ексергетичних ККД (Exergy Efficiency або Second Law Efficiency). Показано, що системи опалення на основі паливних котлів та електронагрівачів, характеризуються високими значеннями COP, що не орієнтує на вжиття заходів щодо їх удосконалення. В той же час, такі системи мають доволі низькі значення ексергетичного ККД. Показано, що ексергетичний ККД типової системи електроопалення досягає близько 3% а опалення на основі паливних котельних – близько 6,5%. Виконано аналіз основних причин термодинамічних необоротностей в означених системах. Наведено діаграму змін ексергетичної ефективності в послідовних елементах типової системи опалення на прикладі паливної котельні. Показано, що у паливному котлі основні необоротності виникають на стадіях горіння та теплопередачі за великої різниці температур. У системах електроопалення основні ексергетичні втрати виникають при виробництві електричної енергії на ТЕС та під час перетворення електричної енергії у теплоту в електронагрівачі. Розглянуто можливості та основні шляхи зниження термодинамічної необоротності системи опалення від парової котельні при її переобладнанні у міні – ТЕЦ. Виконано аналіз термодинамічних втрат в системах теплонасосного опалення. Визначені умови, за яких такі системи стають більш енергетично ефективними ніж системи на основі паливних котлів. Розкриті причини широкого практичного застосування котельних і електроопалення, не дивлячись на їх низьку термодинамічну досконалість.

**Ключові слова:** системи опалення, аналіз за Другим законом термодинаміки, котельня, електроопалення, тепловий насос, ексергетичний ККД.

**Вступ.** На сьогодні переважають два підходи до ефективного використання енергії – енергетичний та ексергетичний [1]. Енергетичний підхід базується на Першому законі термодинаміки – Законі збереження енергії, ексергетичний – на спільному застосуванні двох основних законів термодинаміки - Першого та Другого до технічних задач. Такі підходи пов'язані з використанням двох термодинамічних характеристик енергії – кількості і якості: кількості в енергетичному, обох – в ексергетичному [1-5].

За Першим законом можливе лише перетворення одних форм енергії в інші з додержанням балансу кількості енергії (енергетичного балансу). Розвиток науки і техніки змусив враховувати не лише кількість, а і якість енергії. Основна якісна характеристика енергії – це здатність до перетворень [6]. Для визначення кількісної міри якості енергії знадобились рівняння Першого закону – енергетичний баланс і Другого – ентропійний. В результаті їх спільного рішення було одержано загальну міру якості, яка одержала назву «ексергія» і врахувала як якісну характеристику енергії, так і кількісну.

Друга складова енергії – анергія до перетворень в інші форми енергії не здатна, це баласт що в необмеженій кількості є в навколишньому середовищі. Для одержання ексергії необхідні цінні природні ресурси. Затрати ексергії потребують всі технічні процеси для їх реалізації.

На понятті ексергії засновується ексергетичний баланс і ексергетичний метод аналізу енергоперетворюючих процесів. Всі застосування ексергетичного методу спираються на той незаперечний факт, що в енергоперетворюючих процесах енергія водночас і зберігається (Перший закон) і деградує, знижуючи свою якість внаслідок прояву необоротностей (Другий закон).

Всі реальні процеси є необоротними і кожна необоротність призводить до незворотних втрат ексергії. Кожна ексергетична втрата приводить до збільшення споживання приводної ексергії або до зменшення корисного ефекту процесу.

Отже значення має не стільки кількість енергії сама по собі, оскільки вона зберігається, а лише здатність даної кількості енергії змінювати свою якість в реальних процесах. Звідси випливає, що раціональне використання енергії зводиться у кінцевому рахунку до збереження ексергії, до боротьби проти необоротностей. Наше завдання – навчитись економічно розпоряджатись якістю енергії – ексергією

[7,8]. Введення поняття ексергії дозволило застосовувати до всіх форм енергії єдину якісну характеристику і ввести універсальне визначення коефіцієнта корисної дії (ККД) як відношення якісно однорідних величин – ексергій [1]. Такий ККД, змінюючись у межах 0-1, що цілком логічно, показує ступінь наближення до термодинамічно ідеального процесу і називається ексергетичним ККД (в англійській літературі – Exergy Efficiency або Second Law Efficiency). Коефіцієнти ефективності перетворення енергії, в яких якість енергії не враховується, почали називати в англійській літературі Coefficient of Performance, (скорочено – COP, дослівно – коефіцієнт виконання), у вітчизняній літературі – коефіцієнт перетворення енергії (КПЕ), раніше – енергетичний ККД. Загальний ексергетичний підхід до визначення ККД не виключає використання COP. Значення COP дає корисну для практики інформацію, показуючи кількісно, скільки корисної енергії одержується чи споживається на одиницю затраченої, тобто як система виконує своє призначення. Разом з тим, COP невірно відображає рівень досконалості енергоперетворюючих процесів, оскільки при визначенні COP якість енергії не береться до уваги. Ексергетичний ККД все в більшій мірі використовується як в теоретичних роботах, так і на практиці в енергетиці та інших пов'язаних з нею галузях.

**Мета та завдання досліджень.** В даній роботі використовується як ексергетичний підхід, так і енергетичний до аналізу перетворення енергії в типових системах опалення і відповідні показники ефективності – ексергетичний ККД і COP (КПЕ). Аналізуються три типові системи опалення: з використанням паливного котла; теплових насосів та електричної енергії в якості джерела теплоти.

#### Матеріал і результати досліджень.

##### 1. Паливні котельні

Принципову схему опалення від паливної котельні показано на рис. 1

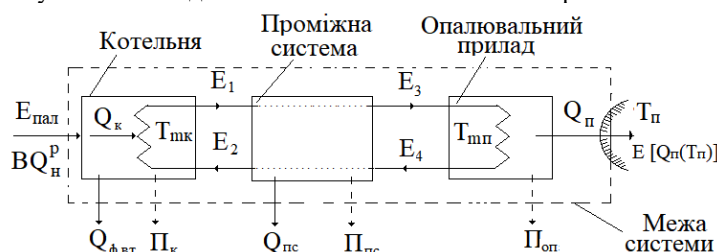


Рисунок 1 - Схема опалення від котельні.

На схемі прийняті такі позначення:  $T_{mk}$ ,  $T_{mp}$  – середні температури теплоносія, відповідно, при підведенні теплоти в котлі та відведення її в опалювальному приладі;  $Q_k$  – підведена до теплоносія теплота в котлі;  $Q_n$  – відведена теплота від теплоносія в опалювальному приладі;  $P_k$  – втрати ексергії в котлі, серед яких найважливіші – це необоротний процес спалювання палива і необоротний теплообмін між продуктами згоряння і теплоносієм;  $P_{pc}$  – необоротні втрати в проміжній системі (ПС);  $P_{op}$  – необоротність в опалювальному приладі, пов'язана з теплообміном між теплоносієм і повітрям в приміщенні;  $Q_{pc}$  – втрата теплоти в ПС;  $Q_{ф.вт}$  – фізичні втрати теплоти в котлі;  $E_{пал}$  – ексергія палива;  $E$  – ексергія потоків теплоносія.

Системи опалення від котельні складається з трьох елементів: котельні, проміжної підсистеми і опалювальних приладів приміщення. Проміжна підсистема (ПС) – це все, що знаходиться між котельною і опалювальними приладами (теплові мережі, теплові пункти, насоси, змішувальні вузли і т. ін.). В цій підсистемі приймаємо до уваги всі необоротності (теплообмін, змішування, тертя, втрати теплоти в навколишнє середовище. Втрати ексергії в процесі протікання теплоносіїв з тертям через котел (процес 1-2) і опалювальний прилад (процес 3-4) відносно малі на відміну від інших і тому не враховуються в аналізі. У цьому випадку (нехтування тертям) ексергетичні баланси для процесів 1-2 і 3-4 записуються так:

$$E_1 - E_2 = E[Q_k(T_{mk})] \quad (1)$$

$$E_3 - E_4 = E[Q_n(T_{np})] \quad (2)$$

#### Енергетичний аналіз

Рівняння всієї системи опалення від котельної, як впливає з рис.1, має вигляд:

$$BQ_n^p = Q_n + Q_{ф.вт} + Q_{pc} \quad (3)$$

Звідси загальний коефіцієнт перетворення енергії системи  $\eta_{ку}$  (енергетична ефективність) визначається співвідношенням:

$$\eta_{ку} = \frac{Q_n}{BQ_n^p} = \frac{Q_k}{BQ_n^p} \cdot \frac{Q_n}{Q_k} = \eta_{кот} \eta_{pc} \quad (4)$$

COP (енергетичний ККД  $\eta_{кот}$ ) сучасних опалювальних котлів наближається до 100%, а тому значення  $\eta_{кот}$  не орієнтує на покращення енергетичної ефективності системи опалення від котельної.

#### Ексергетичний аналіз

При нехтуванні втратами ексергії від тертя в процесах 1-2 та 3-4 схему ексергетичного балансу у відповідності з рис.2 можна подати у такій формі:



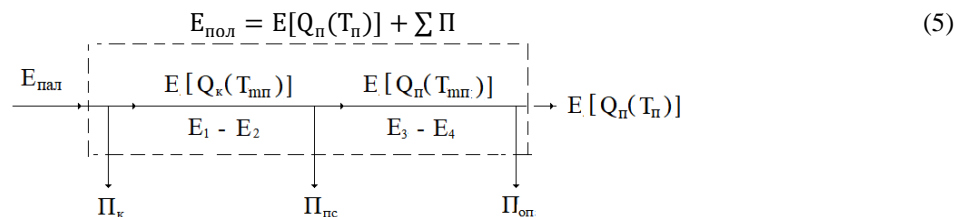


Рисунок 2 – Схема ексергетичного балансу системи опалення від котельні

Для ексергетичного ККД всієї системи маємо:

$$\eta_{\text{ку}}^{\text{ex}} = \frac{E[Q_n(T_n)]}{E_{\text{пал}}} = \frac{E[Q_k(T_k)]}{E_{\text{пал}}} \cdot \frac{E[Q_n(T_{\text{мп}})]}{E[Q_k(T_k)]} \cdot \frac{E[Q_n(T_n)]}{E[Q_n(T_{\text{мп}})]} = \eta_{\text{кот}}^{\text{ex}} \eta_{\text{пс}}^{\text{ex}} \eta_{\text{оп}}^{\text{ex}} \quad (6)$$

де  $\eta_{\text{кот}}^{\text{ex}}$  – ексергетичний ККД котла:

$$\eta_{\text{кот}}^{\text{ex}} = \frac{Q_k \tau_{\text{мк}}}{B e} = \frac{Q_k}{B Q_n^p} \tau_{\text{мк}} = \frac{Q_n^p}{e} \eta_{\text{кот}} \tau_{\text{мк}} \quad (7)$$

$\eta_{\text{пр}}^{\text{ex}}$  – ексергетичний ККД проміжної підсистеми (транспортування та розподілу):

$$\eta_{\text{пр}}^{\text{ex}} = \frac{E[Q_n(T_{\text{мп}})]}{E[Q_k(T_k)]} = \frac{Q_n}{Q_k} \tau_{\text{мп}} = \eta_{\text{пс}} \tau_{\text{к}} \quad (8)$$

$\eta_{\text{оп}}^{\text{ex}}$  – ексергетичний ККД опалювального приладу:

$$\eta_{\text{оп}}^{\text{ex}} = \frac{E[Q_n(T_n)]}{E[Q_n(T_{\text{мп}})]} = \frac{Q_n}{Q_n} \tau_{\text{п}} = \frac{\tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{мп}}} \quad (9)$$

В виразі (7) для ексергетичного ККД котла відношення  $\frac{Q_n^p}{e} < 1$ , оскільки хімічна ексергія органічного палива ( $e$ ) є більшою, ніж його нижча робоча теплота згоряння ( $Q_n^p$ ); по даним [8] відношення  $\frac{Q_n^p}{e}$  складає близько 0,93 для кам'яного вугілля і 0,97 для природного газу. В оціночних розрахунках часто приймають  $\frac{Q_n^p}{e} \approx 1$ .

Ексергетичний ККД котлів  $\eta_{\text{кот}}^{\text{ex}}$  залежить від параметрів мережної води  $\tau_{\text{мк}} = 1 - \frac{T_o}{T_{\text{мк}}}$ . Так, при температурі води, підведеної у теплову мережу від водогрійної котельні,  $t_2 = 80^\circ\text{C}$  і температурі у зворотній лінії  $t_1 = 35^\circ\text{C}$ , середня термодинамічна температура теплоносія  $T_{\text{мк}} = 330\text{K}$ , тоді при спалюванні природного газу ( $\eta_{\text{кот}} = 0,85$ ) маємо:  $\eta_{\text{кот}}^{\text{ex}} = \eta_{\text{кот}} \tau_{\text{мк}} = 0,85 \cdot (1 - 270/330) = 0,85 \cdot 0,18 = 0,15$  або 15%. Низькі значення ексергетичного ККД водогрійних котелів зумовлені: 1) необоротністю від згоряння палива і 2) необоротністю теплообміну між продуктами згоряння і мережною водою (процес 1-2). Хоча  $\eta_{\text{кот}}^{\text{ex}}$  залежить від параметрів теплоносія, загальний ексергетичний ККД системи опалення  $\eta_{\text{ку}}^{\text{ex}}$ , як буде показано нижче, від них не залежить. Для ексергетичного ККД опалювального приладу  $\eta_{\text{оп}}^{\text{ex}} = \frac{\tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{мп}}}$  при  $T_{\text{п}} = 293\text{K}$ ,  $T_{\text{мп}} = 330\text{K}$  і  $T_o = 270\text{K}$   $\tau_{\text{п}} = 1 - \frac{T_o}{T_{\text{п}}} = 1 - \frac{273}{293} = 0,08$ ;  $\tau_{\text{мп}} = 1 - \frac{T_o}{T_{\text{мп}}} = 1 - \frac{273}{330} = 0,18$ ;  $\eta_{\text{оп}}^{\text{ex}} = \frac{\tau_{\text{п}}}{\tau_{\text{мп}}} = \frac{0,08}{0,18} = 0,44$ . Загальний ексергетичний ККД системи опалення від котельні за рахунок значних необоротностей у котлі виходить дуже низьким. У нашому прикладі

$$\eta_{\text{ку}}^{\text{ex}} = \eta_{\text{кот}}^{\text{ex}} \eta_{\text{пс}}^{\text{ex}} \eta_{\text{оп}}^{\text{ex}} = 0,15 \cdot 0,98 \cdot 0,44 = 0,065 \text{ або } 6,5\%.$$

До передачі теплоти робочому тілу втрата ексергії визначається, в основному, втратою від згоряння палива. Ексергетичний ККД цієї стадії можемо оцінити за формулою:

$$\eta_{\text{згор}}^{\text{ex}} = \frac{E[Q(T_{\text{г}})]}{E} = \frac{Q_{\text{г}} \tau_{\text{г}}}{E} = \frac{B Q_n^p \eta_{\text{кот}} \tau_{\text{г}}}{B e} = \frac{Q_n^p}{e} \eta_{\text{кот}} \tau_{\text{г}} \quad (10)$$

Прийняв температуру горіння  $T_{\text{г}} = 1473\text{K}$  ( $t_{\text{г}} = 1200^\circ\text{C}$ ),  $T_o = 270\text{K}$ , СОР котла  $\eta_{\text{кот}} = 0,85$ , для природного газу маємо:  $\eta_{\text{згор}}^{\text{ex}} = 0,97 \cdot 0,85 \cdot 0,82 = 0,68$ . Діаграма потоків ексергії при опаленні від котельні показана на рис. 3.

Загальний ексергетичний ККД системи опалення, котра включає котельню, проміжну систему і опалювальний прилад, дорівнює:

$$\eta_{\text{ку}}^{\text{ex}} = \eta_{\text{кот}}^{\text{ex}} \eta_{\text{пс}}^{\text{ex}} \eta_{\text{оп}}^{\text{ex}} = \frac{Q_n^p}{e} \eta_{\text{кот}} < \eta_{\text{кот}} \tau_{\text{п}}(T_{\text{п}}) < \tau_{\text{п}}(T_{\text{п}}) \quad (11)$$

З цього виразу видно, що в явному вигляді  $\eta_{\text{оп}}^{\text{ex}}$  не впливає на загальний ККД системи. Опосередковано опалювальний прилад може, в принципі, впливати лише на  $\eta_{\text{кот}}$  через температуру зворотної води, яка поступає у мережу після ОП. В традиційних котлах (конденсація водяної пари продуктів згоряння відсутня) температура зворотної води майже не впливає на  $\eta_{\text{кот}}$  [8,9]. Тоді на основі (11) можна зробити висновок, що зменшення втрат ексергії в одній частині, наприклад в ОП, викликає у другій частині її відповідне збільшення. При цьому сумарна втрата ексергії в трьох підсистемах практично не змінюється, як і  $\eta_{\text{ку}}^{\text{ex}}$ . В конденсаційних котлах, навпаки, з пониженням температури зворотної води нижче температури точки роси  $\eta_{\text{кот}}$  зростає і може досягти 104-106% [9].



Рисунок 3 – Діаграма потоків ексергії при опаленні від котельні.

Отже, робота конденсаційного котла з низькоенергетичними опалювальними приладами, окрім підвищення комфорту в приміщенні, приводить до економії палива, а отже доцільна [10]. Для підтримання температури теплоносія у зворотному трубопроводі на заданому рівні в конденсаційних котлах доцільне кількісне регулювання корисної теплової потужності. В сучасних традиційних котлах вдається досягнути значень коефіцієнта перетворення (COP) до 95%. Однак низькі значення ексергетичного ККД ( $< \tau_n(T_n)$ ) цих котлів вказує на те, що дана опалювальна система неефективна.

## 2. Удосконалювання систем опалення на базі парових котельнь

Одним з шляхів підвищення економічної ефективності систем тепlopостачання є збільшення комбінованого виробництва теплоти та електроенергії в області невеликих теплових навантажень, які традиційно покриваються різними котельнями. Стан багатьох котельних характеризується значним фізичним спрацюванням устаткування і будівельних конструкцій, тому вони підлягають суттєвій реконструкції, яку можна провести з встановленням у них різних двигунів для комбінованого виробництва електроенергії і теплоти (міні – ТЕЦ).

В парових котельнях у якості двигунів можуть бути встановлені парові турбіни з протитиском, газотурбінні та дизельні установки. Парові турбіни можуть застосовуватися при наявності в котельнях парових котлів низького тиску (1,0- 1,4 МПа), працюючих на мережні підігрівачі. У випадку встановлення парової турбіни в котельні може бути застосована схема, наведена на рис. 4.

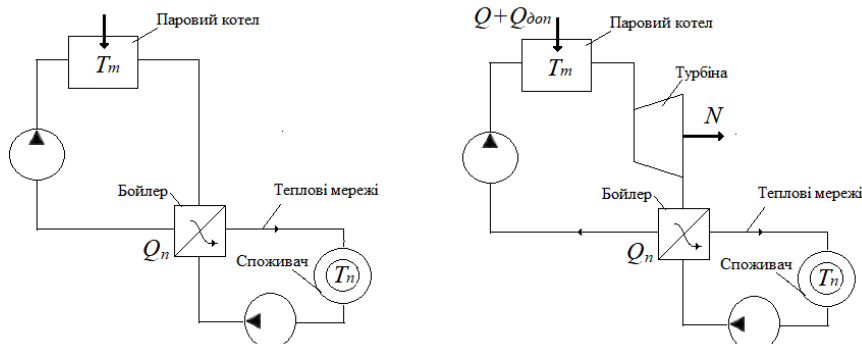


Рисунок 4 - Схеми тепlopостачання від КУ і міні - ТЕЦ на базі парової котельні.

Спробуємо оцінити за допомогою поняття ексергетичних втрат різницю між опаленням гострою парою (опалювальна парова котельня) і теплофікацією (міні-ТЕЦ на базі котельні) з використанням схем ексергетичного балансу, поданих на рис.5.

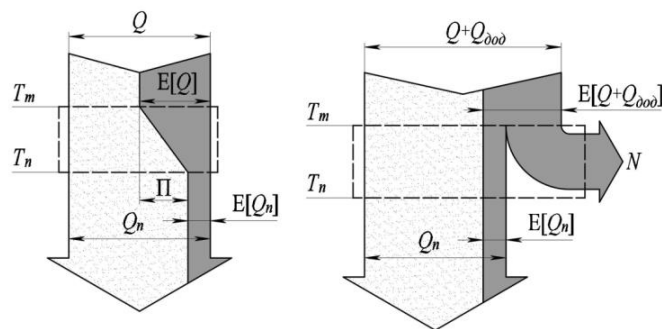


Рисунок 5 - Схеми ексергетичного балансу КУ та міні-ТЕЦ.



Енергетичні баланси при однакових  $Q_n$ :

$$KV \rightarrow Q = Q_n; \text{ міні - ТЕЦ} \rightarrow Q + Q_{\text{дод}} = N + Q_n \quad (12)$$

Ексергетичні баланси:

$$KV \rightarrow E[Q(T_m)] = E[Q_n(T_n)] + \Pi \quad (13)$$

$$\text{Міні - ТЕЦ} \rightarrow E[Q + Q_{\text{дод}}] = N + E[Q_n(T_n)] \quad (14)$$

З рівняння енергетичного балансу для КУ та міні - ТЕЦ витікає, що на виробництво теплофікаційним потоком пари потужності  $N$  додатково витрачається (у порівнянні з КУ) кількість теплоти, яка дорівнює:

$$Q_{\text{дод}} = N \quad (15)$$

Звідси можна зробити невірний висновок про те, що додатково витрачена теплота дає можливість одержати роботу з ефективністю 100% незалежно від досконалості процесів у турбіні. В дійсності, за якістю (ексергією) величини  $Q_{\text{дод}}$  та  $N$  різні, при цьому теплота  $Q$  також бере участь у перетворенні теплоти в роботу.

Відповідно до ексергетичних балансів КУ та міні - ТЕЦ, перехід від опалення гострою парою до опалення відпрацьованою парою дає додаткову роботу, рівну  $N$ , але для цього вимагає додаткової витрати ексергії, рівної:

$$E_{\text{доп}} = E[Q + Q_{\text{дод}}] - E[Q] = N - \Pi \quad (16)$$

Звідси витікає, що  $N$  більше додаткової витрати ексергії  $E_{\text{доп}}$  на величину  $\Pi$ . Іншими словами, виграш від теплофікації дорівнює  $\Pi$ . У чому ж причина зникнення  $\Pi$  при переході до теплофікації? При опаленні гострою парою існує кінцева різниця температур між гарячою парою (середня термодинамічна температура  $T_m$ ) та опалюваним приміщенням  $T_n$ , що обов'язково веде до виникнення ексергетичної втрати  $\Pi$ . Може виникнути питання, чому не можна одержати  $\Pi=0$  у котельні, якщо знизити параметри гострої пари так, щоб вона віддавала теплоту при температурі, близької до  $T_n$ . Тут варто врахувати, що зниження параметрів гострої пари, як було показано раніше, викликає збільшення втрат ексергії в котлі на величину  $\Pi$ . Отже, зазначені втрати ексергії не можна усунути в принципі (власні втрати системи тепlopостачання від КУ).

В ідеалізованій міні-ТЕЦ, якщо не брати до уваги втрати в проміжній системі та опалювальному приладі, температура відпрацьованої пари збігається з температурою у приміщенні, що опалюється, тому  $\Pi=0$ . Отже, енергетична сутність опалення шляхом теплофікації (відпрацьованою у турбіні парою) полягає у зменшенні (а в ідеальній міні-ТЕЦ – у знищенні) тих втрат ексергії, які в котельні проявляються при опаленні гострою парою внаслідок необоротності теплообміну між температурними рівнями  $T_m$  і  $T_n$ .

У міні-ТЕЦ енергетично вигідно, на відміну від КУ, підвищувати параметри гострої пари (зменшується необоротність теплообміну між продуктами згоряння та робочим тілом у котлі без помітної зміни внутрішніх необоротностей у силовому циклі).

У реальній ТЕЦ для зменшення необоротності між гріючою парою у мережевому підігрівачі (бойлері) та середовищем у приміщенні виправдане (а у випадку КУ – ні) застосування низькотемпературних опалювальних приладів (ОП), які мають більшу робочу поверхню. При цьому досягається зниження температури теплоносія в ОП за рахунок зменшення температурного напору, відповідно до рівняння  $Q_n = kF\Delta t$  ( $Q_n = \text{idem}, F \uparrow, \Delta t \downarrow$ ), що дозволяє знизити параметри пари, що відбирається з турбіни, і, як наслідок, збільшити виробництво  $N$ . Таким чином, чим вище параметри гострої пари і нижче - пари, що відбирається з турбіни при тому ж  $Q_n$ , тим менше втрати ексергії і більше виробництво  $N$  енергетично ефективним комбінованим способом.

### 3. Електроопалення

Відповідно до схеми перетворення енергії в системі електроопалення (ОП) (рис. 6) коефіцієнт перетворення енергії (COP) системи визначається за формулою:

$$\eta_{\text{ео}} = \frac{N_{\text{тес}}}{BQ_n^p} \cdot \frac{N_{\text{ел}}}{N_{\text{тес}}} \cdot \frac{Q_n}{N_{\text{ел}}} = \eta_{\text{тес}} \eta_{\text{леп}} \eta_{\text{оп}}$$

де  $\eta_{\text{тес}} = \frac{N_{\text{тес}}}{BQ_n^p}$  - енергетична ефективність (COP) виробництва електричної енергії на ТЕС,  $\eta_{\text{леп}}$  - COP лінії електропередачі (ЛЕП), ( $\eta_{\text{тес}} = 0,36 - 0,4$ ;  $\eta_{\text{леп}} = 0,95$  [5]); COP електронагрівача (опалювального приладу – ОП)  $\eta_{\text{оп}} = \frac{Q_n}{N_{\text{ел}}} = 1$ , або 100%, (загальний COP всієї системи  $\eta_{\text{ео}} = 0,38 \cdot 0,95 \cdot 1 = 0,35$ , або 35%).

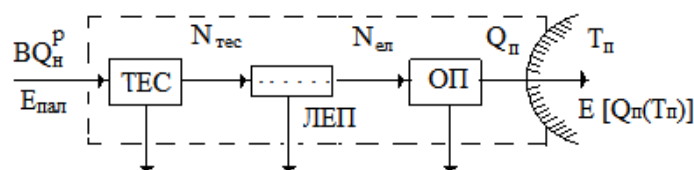


Рисунок 6 – Принципова схема системи електричного опалення.

Для загального ексергетичного ККД системи  $\eta_{\text{ео}}^{\text{екс}}$  можна одержати (рис.6):

$$\eta_{\text{ео}}^{\text{екс}} = \frac{E_{\text{п}}}{E_{\text{пал}}} = \frac{E[Q_{\text{п}}(T_{\text{п}})]}{E_{\text{пал}}} = \frac{N_{\text{тес}}}{E_{\text{пал}}} \cdot \frac{N_{\text{ел}}}{N_{\text{тес}}} \cdot \frac{E_{\text{п}}}{N_{\text{ел}}} = \eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} \eta_{\text{леп}}^{\text{екс}} \eta_{\text{оп}}^{\text{екс}} \quad (17)$$

Енергія палива на ТЕС перетворюється в електричну енергію з ексергетичним ККД

$$\eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} = \frac{N_{\text{тес}}}{E_{\text{пал}}} = \frac{N_{\text{тес}}}{BQ_{\text{н}}^{\text{р}}} \cdot \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{e}$$

Ексергетичний ККД виробництва й передачі електричної енергії становить

$\eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} \eta_{\text{леп}}^{\text{екс}} \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{e} = 0,38 \cdot 0,95 \cdot 0,97 = 0,35$ , або 35%. Таким чином, у нашому прикладі електроенергія, що підводиться до ОП, в ексергетичному балансі складає лише 35% ексергії палива, внаслідок досить значних втрат ексергії в джерелі електроенергії – ТЕС.

Споживачу (у приміщенні) надходить ексергія  $E[Q_{\text{п}}(T_{\text{п}})] = E_{\text{п}} = Q_{\text{п}} \tau_{\text{п}}$ . Оскільки  $Q_{\text{п}} = N_{\text{ел}}$ , то для ексергетичного ККД опалювального приладу маємо:

$$\eta_{\text{оп}}^{\text{екс}} = \frac{E_{\text{п}}}{N_{\text{ел}}} = \frac{Q_{\text{п}} \tau_{\text{п}}}{Q_{\text{п}}} = \tau_{\text{п}} \quad (18)$$

У нашому прикладі при  $T_{\text{п}} = 293\text{K}$  і  $T_0 = 270\text{K}$ ,  $\eta_{\text{оп}}^{\text{екс}} = \tau_{\text{п}} = 0,08$ , або 8%.

Електронагрівач служить типовим прикладом реалізації необоротного нагріву. При цьому використовується чиста ексергія, з якої виробляється в необоротному процесі енергія. COP електронагрівача ( $\eta_{\text{оп}} = 100\%$ ) не розкриває термодинамічну недосконалість цього способу опалення.

Загальний ексергетичний ККД розглядаємої системи опалення, що включає джерело електропостачання (у нашому випадку ТЕС), буде дорівнювати:

$$\eta_{\text{ео}}^{\text{екс}} = \eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} \eta_{\text{леп}}^{\text{екс}} \eta_{\text{оп}}^{\text{екс}} = \eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} \eta_{\text{леп}}^{\text{екс}} \tau_{\text{п}} = \eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} \eta_{\text{леп}}^{\text{екс}} \tau_{\text{п}} = \eta_{\text{ео}}^{\text{екс}} \tau_{\text{п}} < \tau_{\text{п}}, \quad (19)$$

оскільки  $\eta_{\text{леп}}^{\text{екс}} = \eta_{\text{леп}}$  і при  $E_{\text{пал}} = BQ_{\text{н}}^{\text{р}}$   $\eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} = \eta_{\text{тес}}$ . У нашому прикладі  $\eta_{\text{ео}}^{\text{екс}} = \eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} \eta_{\text{леп}}^{\text{екс}} \eta_{\text{оп}}^{\text{екс}} = 0,38 \cdot 0,92 \cdot 0,08 = 0,028$ , або 2,8%, тоді як при теплопостачанні від паливної опалювальної котельні -  $\eta_{\text{ок}}^{\text{екс}} = 6,5\%$ . Тобто за прийнятих умов ОК витрачає палива у 2,3 рази менше (6,5/2,8) у порівнянні з опаленням від КЕС.

Системи теплопостачання від опалювальних котелень (ОК) на органічному паливі і від електронагрівачів, що споживають електроенергію від ТЕС, мають малий ексергетичний ККД ( $\eta_{\text{екс}} < \tau_{\text{п}}$ ). Такі системи неефективно використовують ексергію первинних енергоресурсів внаслідок значних втрат ексергії, пов'язаних із процесом горіння, теплопередачі при великій різниці температур тощо. Втрати ексергії в зазначених системах опалення пов'язані з явищами органічно їм властивими (власні втрати ексергії), вони не можуть бути усунуті або знижені без заміни системи або її частини на інші, призначені для тих же цілей.

Проведений аналіз системи електроопалення стосується лише ефективності використання палива на виробництво корисної продукції. Заключне рішення по практичному впровадженню системи приймається на основі техніко-економічних розрахунків, в яких враховуються не лише витрати палива, а й інші економічні показники (вартість установки, надійність, простота обслуговування та інш.). Отже, хоча система електричного опалення погано використовує первинну енергію, при певних умовах її застосування може бути доцільним [11].

#### 4. Теплонасосна система опалення

Теплові насоси являють собою цікаву альтернативу по відношенню до традиційних систем опалення у зв'язку з можливістю покривати потребу в енергії в опалювальній теплоті з допомогою теплоти навколишнього середовища. Цей спосіб опалення здається досить привабливим (COP системи  $>1$ ) у порівнянні з традиційними системами (COP  $<1$ ).

Принципова схема системи опалення з тепловим насосом, компресор якого приводиться в дію електромотором, показана на рис. 7.

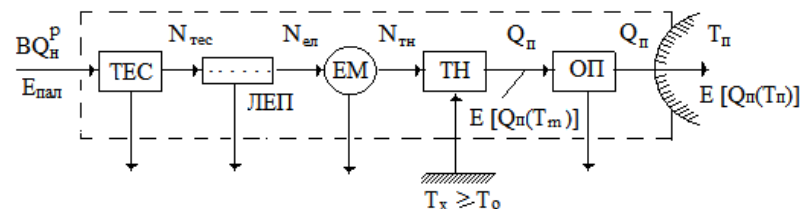


Рисунок 7 - Схема системи опалення з тепловим насосом

В схемі прийнято, що механічні втрати компресора використовуються в самому тепловому насосі, а теплота від електричного мотору відводиться в навколишнє середовище.

**Енергетичний аналіз**

На основі аналізу енергетичного балансу цієї схеми можна записати вираз для коефіцієнта перетворення енергії (коефіцієнта використання первинної енергії) всієї теплонасосної системи опалення:

$$\eta_{\text{ТНУ}} = \frac{Q_{\text{п}}}{BQ_{\text{н}}^{\text{п}}} = \frac{N_{\text{Тес}}}{BQ_{\text{н}}^{\text{п}}} \cdot \frac{N_{\text{ел}}}{N_{\text{Тес}}} \cdot \frac{N_{\text{ТН}}}{N_{\text{ел}}} \cdot \frac{Q_{\text{п}}}{N_{\text{ТН}}} = \eta_{\text{Тес}} \eta_{\text{Леп}} \eta_{\text{ем}} \eta_{\text{ТН}} \quad (20)$$

де  $\eta_{\text{Тес}}$  – енергетична ефективність виробництва електричної енергії на ТЕС (COP);  $\eta_{\text{Леп}}$  – ККД ліній електропередачі (ЛЕП);  $\eta_{\text{ем}}$  – ККД електромотора;  $\eta_{\text{ТН}}$  – коефіцієнт перетворення енергії власне теплового насосу. В енергетичному аналізі при визначенні  $\eta_{\text{ТНУ}}$  затраченою прийнято вважати не всю енергію, що підводиться до ТН, а лише ту її частину, яка пов'язана з добуванням і спалюванням палива, тобто ту частину, яка одержується ціною значних затрат. Отже,  $\eta_{\text{ТНУ}}$  оцінює ефективність використання енергії природних енергетичних ресурсів (ПЕР) в опалювальній системі. Для середніх значень  $\eta_{\text{Тес}} = 0,38$ ,  $\eta_{\text{Леп}} = 0,95$ ,  $\eta_{\text{ем}} = 0,92$  маємо:

$$\eta_{\text{ТНУ}} = 0,874 \eta_{\text{Тес}} \eta_{\text{ТН}} \quad (21)$$

Зв'язок між цими величинами показано на рис. 8.

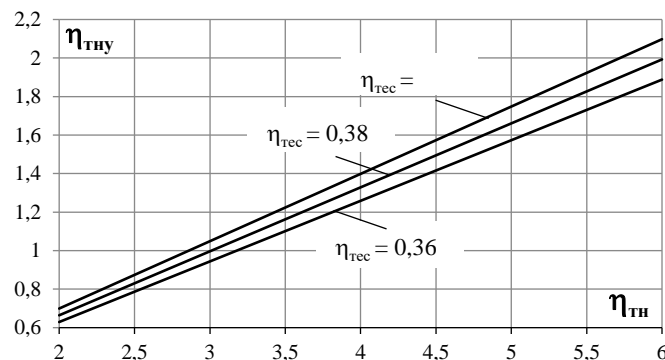


Рисунок 8 – Залежність коефіцієнта перетворення енергії  $\eta_{\text{ТНУ}}$  від коефіцієнту перетворення ТН  $\eta_{\text{ТН}}$  за різних значень ККД ТЕС.

Для попередньої оцінки коефіцієнта перетворення енергії всієї теплонасосної системи опалення  $\eta_{\text{ТНУ}}$  за відомим значенням  $\eta_{\text{ТН}}$  на підставі (21) можна скористатися залежністю:

$$\eta_{\text{ТНУ}} = \eta_{\text{ТН}} / 3 \quad (22)$$

Отже, якщо система опалення досягає  $\eta_{\text{ТНУ}} > 1$  ( $Q_{\text{п}} > BQ_{\text{н}}^{\text{п}}$ ), то  $\eta_{\text{ТН}}$  має бути більше, ніж 3; тобто, лише значний коефіцієнт перетворення  $\eta_{\text{ТН}}$  може призвести до прийнятних значень  $\eta_{\text{ТНУ}}$ . Для того, щоб система з ТНУ була більш вигідною в енергетичному відношенні (економія палива), ніж система з опалювальною котельнею, необхідно мати  $\eta_{\text{ТНУ}} > \eta_{\text{ку}}$ . При  $\eta_{\text{ку}} = 0,85$  коефіцієнт  $\eta_{\text{ТН}}$  повинен бути  $\eta_{\text{ТН}} > \eta_{\text{ТН min}} = 2,6$ . Інакше ТЕС буде споживати більше первинної енергії, ніж котельня.

Економія палива в системі опалення з ТНУ порівняно з котельнею при  $\eta_{\text{ТНУ}} > \eta_{\text{ку}}$  визначається як:

$$\frac{\Delta B}{B_{\text{ку}}} = \frac{B_{\text{ку}} - B_{\text{ТНУ}}}{B_{\text{ку}}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon} \quad (23)$$

де  $\varepsilon = \frac{B_{\text{ку}}}{B_{\text{ТНУ}}} = \frac{\eta_{\text{ТНУ}}}{\eta_{\text{ку}}}$  – коефіцієнт економії палива [12].

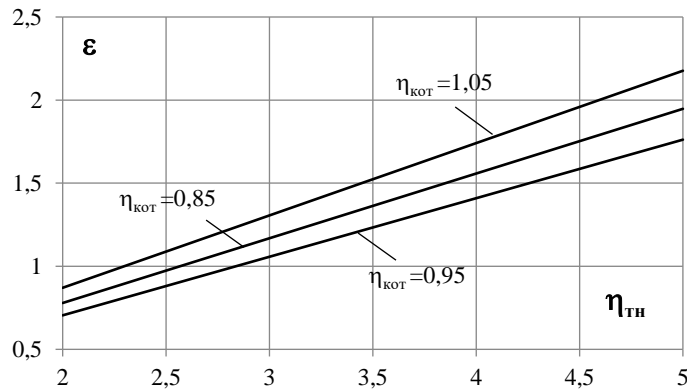
З виразів (4) та (20) слідує:

$$\varepsilon = \frac{\eta_{\text{Тес}} \eta_{\text{Леп}} \eta_{\text{ем}} \eta_{\text{ТН}}}{\eta_{\text{кот}} \eta_{\text{ТН}}} \quad (24)$$

При прийнятих нами значеннях  $\eta_{\text{Тес}} = 0,38$ ;  $\eta_{\text{Леп}} = 0,95$ ;  $\eta_{\text{ТН}} = 0,9$  маємо  $\varepsilon = 0,37 \frac{\eta_{\text{ТН}}}{\eta_{\text{кот}}}$  і

$\eta_{\text{ТН}} > \eta_{\text{кот}} / \eta_{\text{Тес}}$ . Економія палива має місце при  $\varepsilon > 1$ , при цьому виконується нерівність  $\eta_{\text{ТНУ}} > \eta_{\text{ку}}$ . Залежність  $\varepsilon = \varepsilon(\eta_{\text{ТН}}, \eta_{\text{кот}})$  показана на рис. 9.

Звернемо ще раз увагу, що мова йде лише про економію палива. У дійсності доцільність застосування ТНУ замість опалювальної котельні визначається техніко-економічними розрахунками, в яких враховується, зокрема, вартість ТНУ та ОК, різниця цін на паливо та електричну енергію для них, тощо. При меншій вартості ОК економія первинної енергії в ТНУ повинна бути більш помітною. Наприклад, економія палива  $\frac{\Delta B}{B_{\text{кот}}} = 0,4$ , або 40% вимагає, щоб коефіцієнт економії палива дорівнював  $\varepsilon = 1,66$ . При цьому за залежністю (21), коли  $\eta_{\text{кот}} = 0,85$ , то  $\eta_{\text{ТН}} = 3,8$ , а коефіцієнт перетворення енергії всієї теплонасосної системи опалення дорівнює  $\eta_{\text{ТНУ}} = 1,27$ .

Рисунок 9 - Залежність коефіцієнту економії палива від  $\eta_{\text{ТН}}$  та  $\eta_{\text{кот}}$ .**Ексергетичний аналіз**

Згідно рис. 7, для ексергетичного ККД системи теплонасосного опалення при середній температурі теплоносія  $T_m$  можна записати:

$$\eta_{\text{ТНУ}}^{\text{екс}} = \frac{E[Q_p(T_p)]}{E_{\text{пал}}} = \frac{N_{\text{тес}}}{E_{\text{пал}}} \cdot \frac{N_{\text{ел}}}{N_{\text{тес}}} \cdot \frac{N_{\text{ТН}}}{N_{\text{ел}}} \cdot \frac{E[Q_p(T_m)]}{N_{\text{ТН}}} \cdot \frac{E[Q_p(T_p)]}{E[Q_p(T_m)]} = \eta_{\text{тес}}^{\text{екс}} \eta_{\text{леп}}^{\text{екс}} \eta_{\text{ем}}^{\text{екс}} \eta_{\text{ТН}}^{\text{екс}} \eta_{\text{оп}}^{\text{екс}} \quad (26)$$

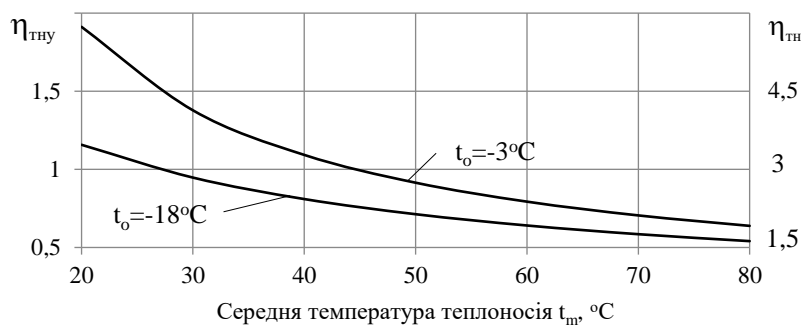
Звідси ексергетичний ККД теплового насосу:

$$\eta_{\text{ТН}}^{\text{екс}} = \frac{E[Q_p(T_m)]}{N_{\text{ТН}}} = \frac{Q_p}{N_{\text{ТН}}} \tau_m = \eta_{\text{ТН}} \cdot \tau_m \quad (27)$$

В цій формулі ексергетичний ККД  $\eta_{\text{ТН}}^{\text{екс}}$  враховує втрати ексергії в циклі (необоротності в дроселі і компресорі та від необоротного теплообміну в випарнику і конденсаторі). Коефіцієнт  $\eta_{\text{ТН}}^{\text{екс}}$  – відносно малозмінна величина для даного класу ТН. Згідно [5] для орієнтовних розрахунків можна прийняти  $\eta_{\text{ТН}}^{\text{екс}} = 0,45$ . Крупні сучасні теплові насоси з корисною тепловою потужністю кілька МВт, які обладнані гвинтовими компресорами, досягають значення  $\eta_{\text{ТН}}^{\text{екс}} = 0,6$ . З виразу  $\text{COP}(\text{ТН}) \cdot \tau_m$  випливає, що коефіцієнт перетворення енергії теплового насосу  $\eta_{\text{ТН}} = \eta_{\text{ТН}}^{\text{екс}} / \tau_m$  залежить від термодинамічної досконалості процесів в ТН ( $\eta_{\text{ТН}}^{\text{екс}}$ ) і температурного рівня теплоносіїв ( $T_m, T_o$ ):

$$\eta_{\text{ТН}} = \eta_{\text{ТН}}^{\text{екс}} \frac{T_m}{T_m - T_o} \quad (29)$$

На рис. 10 наведені графіки залежності  $\eta_{\text{ТН}}$  та  $\eta_{\text{ТНУ}}$  від температур ( $T_m, T_o$ ) з урахуванням рівнянь (22) та (29).

Рисунок 10 - Коефіцієнти перетворення енергії ТНУ і ТН системи опалення у залежності від середньої температури теплоносія  $T_m$  за сталого значення ексергетичного ККД ТН  $\eta_{\text{ТН}}^{\text{екс}} = 0,45$ .

Як видно з цих даних, зниження температури нагріваемого в ТН теплоносія  $T_m$  значно підвищує ефективність роботи ТН і всієї теплонасосної системи опалення. Температура теплоносія  $t_m < 40^\circ\text{C}$  характерна для низькоенергетичних опалювальних систем [13,14]. При роботі традиційних опалювальних систем з  $t_m > 70^\circ\text{C}$  коефіцієнти перетворення  $\eta_{\text{ТНУ}}$  в 1,5 – 2 рази нижчі. Оскільки підвищення температури  $T_m$  знижує ефективність роботи ТН, то якісне регулювання ( $T_m \updownarrow$ ) не придатне в низькоенергетичних (Low-Ex) опалювальних системах. Регулювання відпускної теплоти шляхом зміни витрати мережної води (кількісне регулювання) буде більш раціональним. Крім електродвигунів для підвищення енергоефективності ТНУ можуть використовуватись і інші приводи, зокрема, двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ). Якщо в якості нижнього джерела теплоти буде використовуватись не атмосферне повітря,

а джерело з більш високою температурою, (наприклад, грант або ґрунтові води, температура яких мало знижується навіть взимку), то ефективність теплового насосу  $\eta_{\text{тн}}$  буде більш високою, що приведе до збільшення  $\eta_{\text{тну}}$  і коефіцієнта економії палива  $\epsilon$ .

### **Висновки**

Розрахунки і аналіз результатів роботи дають підстави відмітити наступне. В сучасних опалювальних котлах досягнуто досить високих показників коефіцієнту перетворення енергії (COP) (по старому – енергетичний ККД), до 95%. Проте, низьке значення ексергетичного ККД цих котлів, як і ККД електроопалення, свідчить про те, що такі системи неефективно використовують ексергію первинної енергії внаслідок прояву необоротностей (котли – згоряння палива, передача теплоти від продуктів згоряння до теплоносія; електроопалення – в джерелі електроенергії, при перетворенні електроенергії у теплоту). Вказані необоротності, як і відповідні втрати ексергії органічно властиві цим системам і не можуть бути усунені чи істотно знижені без зміни структури системи або її частин. Не дивлячись на термодинамічну недосконалість, котельні, як і системи електроопалення, внаслідок своєї надійності і низьких неенергетичних витрат широко поширені. Втрати ексергії в теплових насосах залежать, в основному, від недосконалості устаткування – технічні втрати. Ці втрати в принципі можуть бути знижені до нуля без змін структури системи. Реальні системи опалення від теплових насосів більш вигідні за витратою палива у порівнянні з котельними за умови  $\eta_{\text{тн}} > \frac{\eta_{\text{кот}}}{\eta_{\text{теп}}}$ . Котельня витрачає палива майже в 2,5 рази менше, ніж система з електроопаленням.

Обговорено переваги систем опалення з конденсаційними котлами і низькоенергетичним опалювальним приладдям порівняно з традиційними котельнями.

### **Список використаної літератури**

1. Куделя П.П., Дубовський С.В. Енергетичний та ексергетичний підходи до проблем раціонального використання енергії // Енергетика: економіка, технологія, екологія. – 2021. - №2.-с. 7-16.
2. Kotas T.J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Krieger publishing company, Malabar, Florida, 1995 – 328 p.
3. Szargut J. Exergy method: technical and ecological application . Wit press, Southampton, Boston, 2005.- 160 p.
4. Куделя П.П. Методи термодинамічного аналізу установок та систем. [електронний ресурс] : Навчальний посібник/ П.П. Куделя, Г.Б. Варламов. – Київ.-НТУУ «КПІ». Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/453>
5. Baehr H.D. Thermodynamik Grundlagen und technische Anwendungen.-Berlin: Springer, 2005 – 651 S.
6. Эксергетические расчеты технических систем. Справочное пособие. — Под ред. А.А. Долинского и В.М. Бродянского. — Киев : Наукова думка, 1991. — 360 с.
7. Brodyanskiy W.M., Sorin M.V. and Le Goff P. The efficiency of industrial processes. Amsterdam, Elsevier, 1994 – 487 p.
8. Бродянский В.М. Классическая термодинамика на рубеже XXI века: состояние и перспективы развития // Изв. РАН. Энергетика. – № 5. – 2001. – С. 17–43
9. Куделя П.П. Барабаш П.А. Тепловой баланс конденсационных котлов // Енергетика: економіка, технологія, екологія. – 2014. - №1.-с. 51-58.
10. Low exergy systems for high-performance buildings and communities. Annex 49 Summary report ECBCS. – Fraunhofer IBP. – 2011. Режим доступу: [www.ecbcs.org](http://www.ecbcs.org). <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/74-85.pdf>
11. Пирков В.В. Электрические кабельные системы отопления. Энергетическое сопоставление.-К.: ООО «Издательский дом Дмитрия Бурого», 2004. – 98 с.
12. Холодильные машины. Справочник. М.: «Легкая и пищевая промышленность».-1982.-222 с.
13. Куделя П.П. Низькоенергетичні опалювальні системи/ П.П. Куделя, А.С. Соломаха. – К.-НТУУ «КПІ».-2015.- 15 с.
14. Szargut J. Low energy heating systems – when can they be profitable. IEA Energy conservation in building and community systems program // Executive committee meeting/ Technical day presentation –Krakow – Nov/ 7-2001.

P. Kudelya<sup>(1)</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-4941-5795S. Dubovskiy<sup>(2)</sup>, Dr. Eng. Sc., SRF, ORCID 0000-0001-9418-2092<sup>(1)</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"<sup>(2)</sup>Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine

## ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF TYPICAL HEATING SYSTEMS

The main features of energy and exergy methods of analysis the energy transformations efficiency in typical heating systems (boilers, electric heating, heat pumps with electric drive) are presented. The equations of energy and exergy balances of systems and their elements are made. Based on them, expressions for calculating efficiency indicators are obtained. The results of calculations and comparison of energy conversion coefficients (COP - Coefficient of Performance) and exergy efficiencies (Exergy Efficiency or Second Law Efficiency) are presented. It is shown that heating systems based on fuel boilers and electric heaters are characterized by high COP values, which does not focus on taking measures to improve them. At the same time, such systems have rather low values of exergetic efficiency. It is shown that exergy efficiency of a typical electric heating system reaches about 3%, and heating based on fuel boilers - about 6,5 %. The analysis of the main reasons of thermodynamic irreversibility in the specified systems is executed. The diagram of changes exergetic efficiency in consecutive elements of a typical heating system on the example of a fuel boiler room is given. It is shown that in a fuel boiler the main irreversibilities occur at the stages of combustion and heat transfer at a large temperature difference. In electric heating systems, the main exergy losses occur during the production of electricity at thermal power plants and during the conversion of electricity into heat in electric heaters. Possibilities and main ways to reduce the thermodynamic irreversibility of the heating system from the steam boiler house during its conversion into a mini - CHP are considered. The analysis of thermodynamic losses in heat pump heating systems is performed. The conditions under which such systems become more energy efficient than systems based on fuel boilers are defined. The reasons for the wide practical application of boilers and electric heating are revealed, despite their low thermodynamic perfection.

**Key words:** heating systems, Second Law analysis, boiler room, electric heating, heat pump, exergy efficiency.

## References

1. Kudelia P.P., Dubovskiy S.V. Enerhetychnyi ta ekserhetychnyi pidkhody do problem ratsionalnoho vykorystannia enerhii // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiia, ekolohiia. – 2021. - №2.-s. 7-16.
2. Kotas T.J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Krieger publishing company, Malabar, Florida, 1995 – 328 p.
3. Szargut J. Exergy method: technical and ecological application . Wit press, Southampton, Boston, 2005.- 160 p.
4. Kudelia P.P. Metody termodynamichnoho analizu ustanovok ta system. [elektronnyi resurs] : Navchalnyi posibnyk/ P.P. Kudelia, H.B. Barabashov. – Kyiv.-NTUU «KPI». Rezhyim dostupu: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/453>
5. Baehr H.D. Thermodynamik Grundlagen und technische Anwendungen.-Berlin: Springer, 2005 – 651 S.
6. Ekserhetycheskye raschety tekhnicheskikh system. Spravochnoe posobie. — Pod red. A.A. Dolynskoho y V.M. Brodianskoho. — Kyev : Naukova dumka, 1991. — 360 s.
7. Brodyanskiy W.M., Sorin M.V. and Le Goff P. The efficiency of industrial processes. Amsterdam, Elsevier, 1994 – 487 p.
8. Brodianskyi V.M. Klassycheskaia termodynamika na rubezhe XXI veka: sostoianye y perspektyvy razvytiya // Yzv. RAN. Enerhetyka. – № 5. – 2001. – S. 17–43
9. Kudelia P.P. Barabash P.A. Teplovoi balans kondensatsyonnykh kotlov // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiia, ekolohiia. – 2014. - №1.-s. 51-58.
10. Low exergy systems for high-performance buildings and communities. Annex 49 Summary report ECBCS. – Fraunhofer IBP. – 2011. URL: [www.ecbcs.org](http://www.ecbcs.org). <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/74-85.pdf>
11. Pyrkov V.V. Elektricheskye kabelnye systemy otopleniya. Enerhetycheskoe sopostavlenye.-K.: OOO «Yzdatelskyi dom Dmytryia Buraho», 2004. – 98 s.
12. Kholodynye mashyny. Spravochnik. M.: «Lehkaia y pyshchevaia promyshlennost».-1982.-222 s.
13. Kudelia P.P. Nyzkoenerhetychni opaliuvalni systemy/ P.P. Kudelia, A.S. Solomakha. – K.-NTUU «KPI».-2015.- 15 s.
14. Szargut J. Low energy heating systems – when can they be profitable. IEA Energy conservation in building and community systems program // Executive committee meeting/ Technical day presentation –Krakow – Nov/ 7-2001.

Надійшла 26.05.2022

Received 26.05.2022

## АНАЛІЗ ФАКТИЧНИХ, ТИПОВИХ ТА НОРМАТИВНИХ КЛІМАТИЧНИХ ДАНИХ В КОНТЕКСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬ

В даній статті проводиться аналіз фактичних та типових деталізованих кліматичних даних для м. Києва. Фактичні температури зовнішнього повітря протягом 2014-2021 рр. порівнювалися з нормативним показником відповідно до нормативних документів та найбільш поширених типових погодинних кліматичних файлів, що використовуються для енергетичного моделювання. Дані порівнювалися в помісячному розрізі та з використанням числа годин стояння зовнішньої температури, так як останній підхід дозволяє більш точно оцінювати показники ефективності енергоспоживання теплових насосів. Оскільки на енергопотребу та енергоспоживання будівель на опалення в значній мірі впливають теплонаходження за рахунок сонячної радіації, було також проведено порівняння нормативної величини загальної радіації на горизонтальну поверхню зі значенням з найбільш поширених типових кліматичних даних. Враховуючи сукупність проаналізованих факторів, в подальшому рекомендується для динамічного енергетичного моделювання використовувати погодинні дані Meteoront для м. Києва. Також, з використанням програмного продукту DesignBuilder/EnergyPlus оцінювалися можливі відхилення у значеннях енергопотреби будівлі на опалення при використанні різних кліматичних даних.

**Ключові слова:** енергетичне моделювання, кліматичні дані, типовий метеорологічний рік, число годин стояння температур, енергопотреба.

**Вступ.** Останнім часом Україна робить значні кроки з імплементації директиви ЄС щодо енергоефективності будівель [1]. В рамках цього прийняті ряд законів та нормативних актів, що регулюють питання щодо мінімальних вимог до енергоефективності будівель [2, 3]. Також прийнятий національний план щодо збільшення кількості будівель з близьким до нульового енергоспоживанням – Nearly zero-energy buildings (NZEB) [4]. Енергоспоживання будівель залежить від великої кількості факторів: від площі проекрованої будівлі, її будівельного об'єму, компактності, ступеня скління фасадів та їх орієнтації за сторонами світу, рівня теплоізоляції зовнішніх конструкцій та інших факторів і, звичайно, від кліматичних характеристик району розташування. Для оцінки енергоспоживання будівель та роботи систем тепло- та холодопостачання використовуються як програмні продукти для динамічного енергетичного моделювання, такі як EnergyPlus/DesignBuilder, TRNSYS, eQuest, DOE-2, IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE), IESVE тощо, так і більш спрощені програмні продукти, такі як RETScreen (для розрахунку заходів з енергозбереження та систем теплопостачання) та GeoT\*SOL (для розрахунку систем теплопостачання на базі теплових насосів).

Для дослідження показників енергоефективності будівель наразі регламентується використання помісячного квазістаціонарного розрахунку енергопотреби та енергоспоживання на опалення та охолодження [5, 6]. Однак, для аналізу складних інженерних систем з використанням відновлюваних джерел енергії часто застосовують більш деталізовані методи розрахунку. При цьому для проведення динамічного енергетичного моделювання будівель в спеціалізованих програмних продуктах необхідно використовувати погодинні кліматичні дані, що включають значний перелік показників. Також, результати енергетичного моделювання будуть в значній мірі залежати від того, які саме кліматичні дані будуть використані для розрахунку або моделювання.

Нормативні кліматичні дані наведені у стандарті з будівельної кліматології [7] та національному методі розрахунку енергопотреби та енергоспоживання на опалення та охолодження [6]. Такі кліматичні дані включають помісячні дані щодо температури навколишнього повітря, сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню та вертикальні поверхні з різною орієнтацією, напрямку та швидкості вітру, відносної вологості, опадів тощо. Існує також ряд типових кліматичних файлів для України, що включають погодинні показники щодо температури сухого та вологого термометра / температури точки роси навколишнього повітря, прямої радіації на поверхню, перпендикулярну до кута падіння, розсіяної радіації на горизонтальну поверхню, напрямку та швидкості вітру, тиску тощо. В подальшому спеціалізована програма розраховує сумарну сонячну радіацію на горизонтальну поверхню та вертикальні поверхні з різною орієнтацією. Серед таких погодних файлів можна виділити наступні: International Weather for Energy Calculation – IWEC, що доступні для завантаження з офіційного веб-сайту програмного

забезпечення EnergyPlus [8], Meteonorm – файли можуть бути завантажені тільки маючи ліцензію на програму [9], Typical Meteorological Year (TMY) – доступний для завантаження на офіційному сайті JRC для Photovoltaic Geographical Information System tool [10], TMY Onebuilding – доступний на веб-сайті, де зібрані типові метеорологічні файли для багатьох країн світу [11].

Однак, жоден з цих кліматичних файлів не затверджений офіційно в Україні для енергетичного моделювання будівель, тому кожен з спеціалістів з енергетичного моделювання сам обирає кліматичний файл для використання в тому чи іншому програмному забезпеченні, що може бути прийнятно для аналізу різних сценаріїв або варіантів моделей.

Серед робіт присвячених питанню порівняння кліматичних даних для енергетичних розрахунків можна відмітити роботу [12], в якій проаналізовано вплив вибору кліматичної бази даних на розрахунок енергопотреб на опалення будівлі, а саме використання міжнародної бази даних IWEC, проте не враховано число годин стояння температур в певній місцевості. Останній аналіз є дуже необхідним для аналізу систем теплопостачання на базі теплових насосів.

**Мета та завдання.** Метою дослідження є порівняння різних кліматичних баз даних для умов України в контексті динамічного енергетичного моделювання будівлі з фокусом на системи теплозабезпечення на базі теплових насосів.

Для досягнення мети дослідження були поставлені наступні завдання:

- 1) Збір даних та аналіз фактичних температур зовнішнього повітря для м. Києва за 2014-2021 рр.;
- 2) Порівняння кліматичних даних (температура зовнішнього повітря та показники сонячної радіації) відповідно до нормативних документів та різних типових метеорологічних років, що використовуються для енергетичного моделювання будівлі;
- 3) Аналіз фактичних, нормативних та типових даних щодо числа годин стояння зовнішніх температур за опалювальний період;
- 4) Аналіз впливу використання кліматичних даних на показники енергопотреб на опалення житлової будівлі в м. Києві;
- 5) Висновок щодо подальшого використання кліматичних даних для аналізу систем теплопостачання на базі теплових насосів.

**Матеріал і результати досліджень.** Для проведення аналізу була обрана існуюча будівля, що розташована в м. Києві, тому кліматичні дані також аналізувалися саме для цього міста. В якості фактичних даних щодо зовнішньої температури були використані деталізовані (через кожні 3 години) дані спостережень за погодою на території Києва (аеропорт Жуляни) на сайті RP5 [13] протягом 2014-2021 років. Ці дані були використані як для розрахунку середньомісячних показників, так і для розрахунку числа годин стояння зовнішніх температур за опалювальний період.

Нормативні кліматичні показники, а саме середньомісячні дані щодо температури зовнішнього повітря та сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню, обиралися відповідно до стандарту по будівельній кліматології [7] та національному методу розрахунку енергопотреб та енергоспоживання на опалення та охолодження [6]. В контексті помісячних кліматичних даних також проведений аналіз даних з програми RETScreen, що також може використовуватися при аналізі теплопостачання будівель на базі теплових насосів.

Також аналізувалися наступні типові метеорологічні роки: IWEC, Meteonorm, JRC TMY, TMY Onebuilding. Такі ж позначення використовуються в подальшому на рисунках та графіках при проведенні аналізу.

Дані порівняння середньомісячних температур зовнішнього повітря в м. Києві для різних джерел наведені на рис. 1. В якості «еталонного» значення для розрахунку середньоквадратичного відхилення приймалися нормативні дані. Найбільш близькими до нормативних значень для місяців опалювального періоду виявилися наступні кліматичні дані: RETScreen, IWEC, Meteonorm.

Але з огляду на те, що сонячні теплонадходження в значній мірі можуть впливати на показники енергоспоживання будівель, приймати рішення щодо використання тих чи інших кліматичних даних тільки на основі зовнішньої температури не є доцільним.

Дані порівняння середньомісячних значень сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню в м. Києві для різних джерел наведені на рис. 2. Аналогічно в якості «еталонного» значення для розрахунку середньоквадратичного відхилення приймалися нормативні дані. Найбільш близькими до нормативних значень для місяців опалювального періоду виявилися наступні кліматичні дані: Meteonorm, RETScreen. Решта кліматичних даних показали значне відхилення в значеннях для сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню.

Виходячи з аналізу помісячних даних щодо температури зовнішнього повітря та значень сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню найбільш близькими до нормативних значень є детальні погодинні значення з файлу Meteonorm та помісячні дані з програми RETScreen.

Але для аналізу систем теплопостачання будівель на базі теплового насосу не раціонально використовувати середньомісячні показники, оскільки це не дозволяє врахувати залежність ефективності



теплого насоса від температури зовнішнього повітря або температури теплоносія в ґрунтовому контурі та використання резервного джерела теплопостачання при низьких температурах повітря. Саме тому додатково проведений аналіз числа годин стояння температур зовнішнього повітря, що дозволяє більш детально аналізувати режими роботи систем теплопостачання будівель (рис. 3).

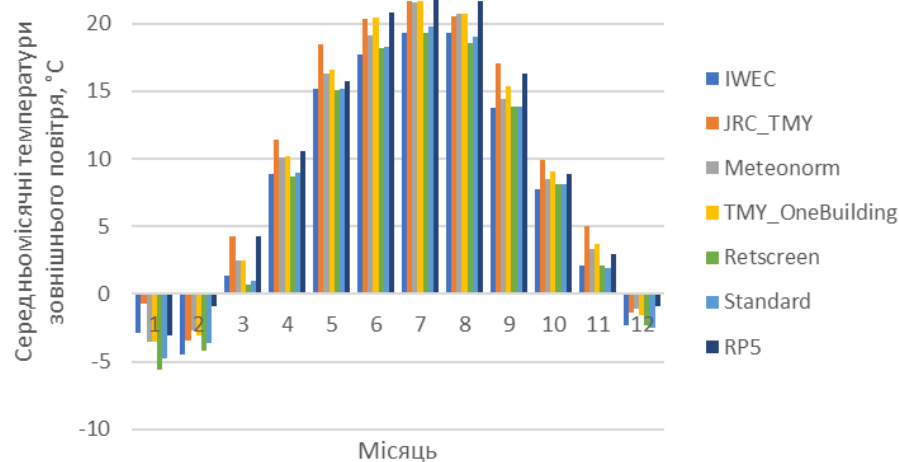


Рисунок 1 – Середньомісячні температури зовнішнього повітря за різними джерелами

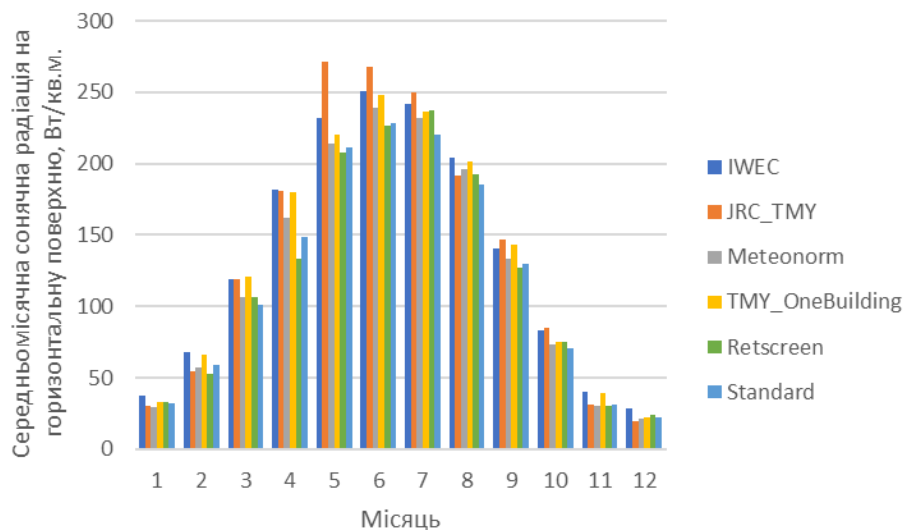


Рисунок 2 – Середньомісячні значення сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню за різними джерелами

Стандартні значень для тривалості стояння температур зовнішнього повітря регламентувалися стандартом [14]. Оновлені стандартні дані для м. Києва відсутні, тому в якості «еталонних» показників для розрахунку середньоквадратичного відхилення використовувалися фактичні дані з сайту RP5. Найбільш близькими до еталонних значень для місяців опалювального періоду виявилися наступні кліматичні дані: TMY Onebuilding, Meteonorm.

Виходячи з аналізу як помісячних даних щодо температури зовнішнього повітря та значень сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню найбільш, так і тривалості стояння зовнішньої температури для проведення енергетичного моделювання будівлі з тепловими насосами буде використовуватися кліматичний файл Meteonorm для м. Києва.

Для оцінки впливу різних кліматичних даних на показники енергопотреб на опалення була побудована енергетична модель 2-поверхової житлової будівлі в м. Києві з використанням програмного забезпечення DesignBuilder/EnergyPlus.

Опалювальна площа будівлі складає 216 м<sup>2</sup>, опалювальний об'єм – 648 м<sup>3</sup>. Загальний вигляд геометрії моделі можна побачити на рис. 4. Коефіцієнти теплопередачі огорожувальних конструкцій (ОК): зовнішня стіна – 0,264 Вт/м<sup>2</sup>·К, перекриття неопалювального горища – 0,235 Вт/м<sup>2</sup>·К, світлопрозорі ОК – 1,333 Вт/м<sup>2</sup>·К, підлога по ґрунту – 0,35 Вт/м<sup>2</sup>·К. В моделі враховувалися внутрішні теплові надходження: 4 мешканця, 2 Вт/м<sup>2</sup> для освітлення та 2 Вт/м<sup>2</sup> для обладнання, графік використання – 112 год/тиждень. Природна вентиляція задавалася на рівні 0,5 год<sup>-1</sup>, задана температура опалення – 20°C.

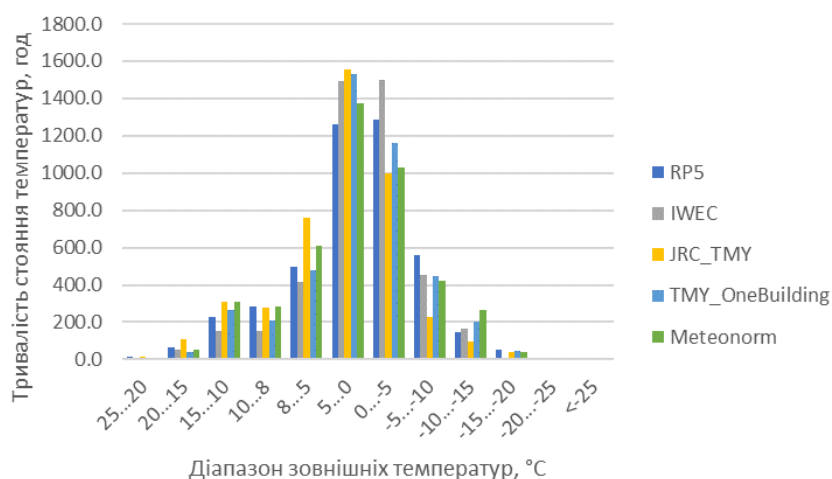


Рисунок 3 – Тривалість стояння зовнішніх температур

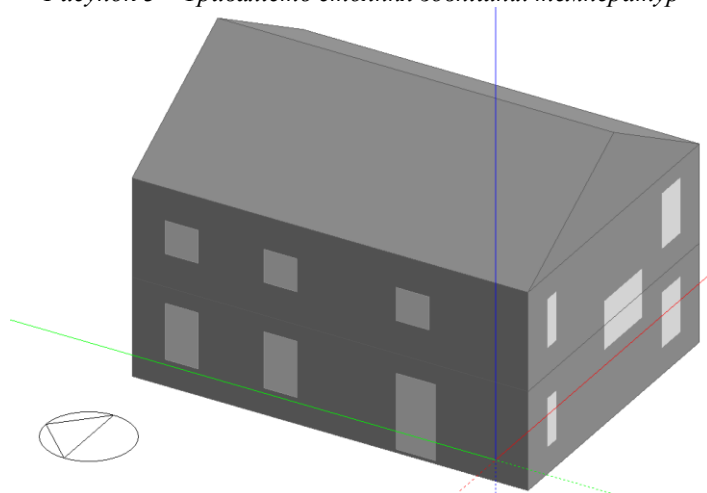


Рисунок 4 – 3-D геометрія моделі житлової будівлі

В залежності від використаних кліматичних даних енергопотреба на опалення житлової будівлі знаходиться в межах 13000...15000 кВт·год (рис. 5). Найменший показник енергопотреби характерний для кліматичних даних JRC TMY, найбільший – IWEC, а Meteonorm та TMY Onebuilding – дають схожі результати.

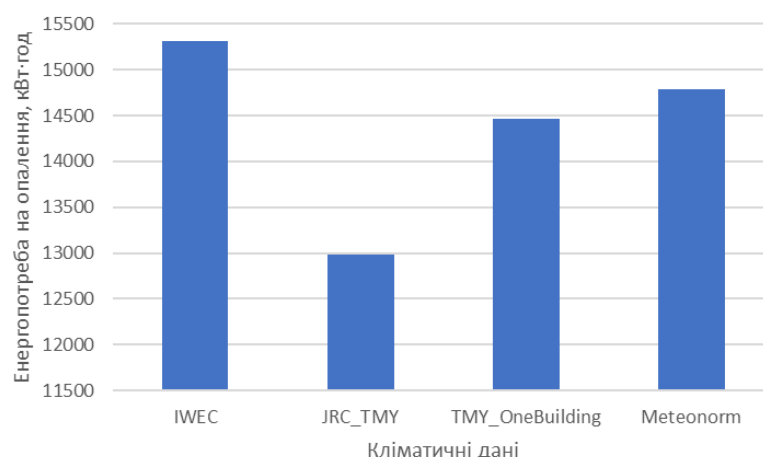


Рисунок 5 – Енергопотреба на опалення житлової будівлі

Для порівняння більш детализованих даних щодо температур зовнішнього повітря та енергопотреби на опалення були обрані добові інтервали. Результати аналізу для січня наведені на рис. 6 та 7. В межах місяця можуть бути значні відмінності як для температури зовнішнього повітря, так і для енергопотреби на опалення. Це обумовлено різними джерелами даних щодо кліматичних параметрів та підходів до створення типових метеорологічних файлів від різних розробників.

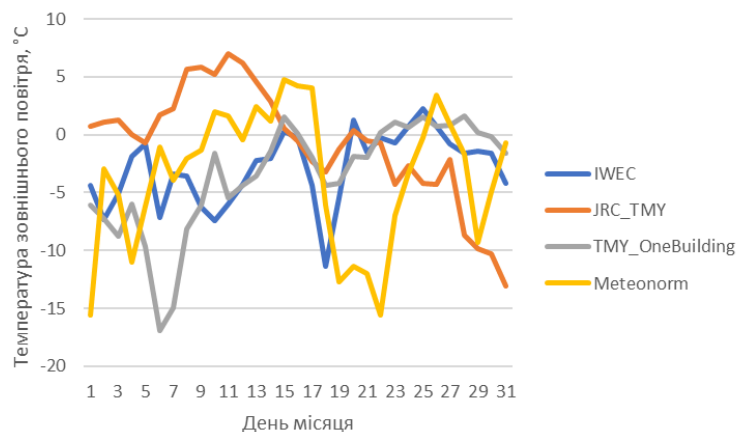


Рисунок 6 – Середньодобові значення температури зовнішнього повітря для січня

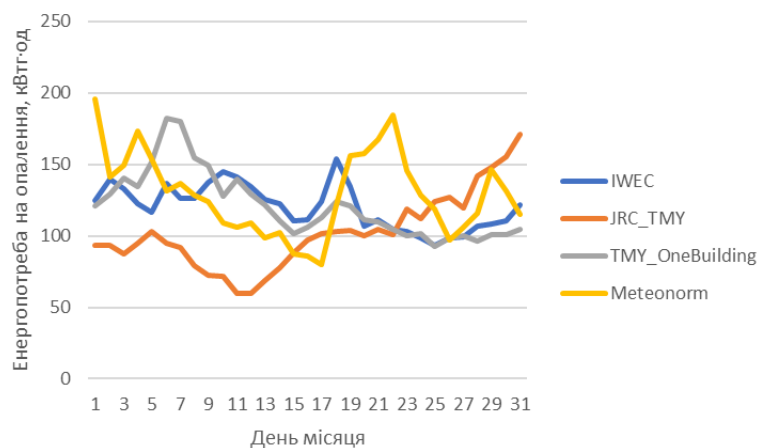


Рисунок 7 – Середньодобові значення енергопотреб на опалення для січня

**Висновки.** Результати енергетичного моделювання будівель з тепlopостачанням на базі теплового насоса в значній мірі будуть залежати від кліматичних даних, які будуть використовуватися. Особливо це стосується теплових насосів, у яких в якості низькопотенційного джерела теплоти виступає зовнішнє повітря. Проведений аналіз кліматичних даних з різних джерел дозволяє обрати погодинні кліматичні дані, що є найближчими до середньомісячних нормативних даних по температурі зовнішнього повітря та сонячній радіації, для подальшого використання при енергетичному моделюванні. А для теплових насосів вибір кліматичних даних також може базуватися на основі порівняння з фактичною тривалістю стояння зовнішніх температур (2014-2021 рр.). Для подальшого аналізу систем тепlopостачання на базі теплових насосів планується використання програмного продукту RETScreen та GeoT\*SOL, а також DesignBuilder/EnergyPlus з використанням кліматичних даних Meteonorm для м. Києва.

#### Список використаної літератури

1. Директива Європейського Парламенту і Ради 2010/31/ЄС від 19 травня 2010 року про енергетичні характеристики будівель. Режим доступу: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011-10#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011-10#Text)
2. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» №2118-VIII від 22.06.2017. Голос України. 22.07.2017. №134. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19>
3. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. К.: Мінбуд України, 2017. 37 с.
4. Національний план збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/88-2020-%D1%80#Text>
5. ДСТУ Б EN ISO 13790:2011. Енергоефективність будівель. Розрахунок енергоспоживання при опаленні та охолодженні. К: НДІБК, 2011. 229 с.
6. 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.
7. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. К. 2011. 135 с.
8. Кліматичні дані IWEC для України. Режим доступу: [https://energyplus.net/weather-location/europe\\_wmo\\_region\\_6/UKR/UKR\\_Kiev.333450\\_IWEC](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR/UKR_Kiev.333450_IWEC)
9. Кліматичні дані Meteonorm. Режим доступу: <https://meteonorm.com/en/>
10. Кліматичні дані TMY JRC. Режим доступу: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)

11. Кліматичні дані TMY Onebuilding. Режим доступу: <https://climate.onebuilding.org/>
12. В.І. Дешко, І.Ю. Білоус, Г.О. Гетманчук. Базис кліматології для визначення енергетичних характеристик будівель. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017. № 4, с.67-73.
13. Архів фактичних кліматичних даних. Режим доступу: <http://rp5.ua/>
14. СНиП 2 01 01 82 Строительная климатология и геофизика/Госстрой СССР. М.: Стройиздат, 1983. 136 с.

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

**V.I. Shklyar**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-6879-7501

**V.V. Dubrovskaya**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-4765-0484

**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

#### **ANALYSIS OF ACTUAL, TYPICAL AND NORMATIVE CLIMATE DATA IN THE CONTEXT OF BUILDINGS ENERGY MODELING**

*This article analyses the actual, normative monthly and typical detailed climatic data for the city of Kyiv. Data on actual outdoor air temperatures during 2014-2021 were compared with indicators in accordance with Ukrainian regulations and the most common typical hourly climate files used for building energy modeling: International Weather for Energy Calculations (IWEC), Meteonorm, Typical Meteorological Year (TMY) from PVGIS tool and Onebuilding web-site. The values for outside air temperatures were compared on an average monthly basis and using the number of hours of outside air temperature duration. The latter approach allows to more accurately assess the energy efficiency indicators and energy consumption of heat supply systems with heat pumps. As the buildings energy need and energy consumption for heating values are significantly affected by heat gains due to solar radiation, a comparison of the normative value of global radiation on the horizontal surface with the values from the most common typical climatic data was also performed based on an average monthly basis. Taking into account the set of analysed climatic factors using monthly indicators for outside air temperatures and number of hours of outside air temperature duration, it is decided to use Meteonorm hourly data for Kyiv for further dynamic energy modeling of building with heat supply system based on different types of heat pumps, including the air-to-water and water(brine)-to-water ones. Also, climatic data used in RETScreen program show similar figures as normative values and therefore this program will be used for further technical and economic analysis as well and the results will be compared to the specialised program for heat pumps calculations GeoT\*SOL, which also provides the detailed calculation of heat pumps system technical performance and economic calculations. In addition, possible deviations in the values of energy need for heating of the building when using different climatic data were estimated using the DesignBuilder / EnergyPlus software product. The potential deviation of energy need for heating results can be around -10...+6.5%.*

**Key words:** energy modelling, climatic data, typical meteorological year, number of hours of air temperature duration, energy need.

1. DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011-10#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011-10#Text)
2. On the energy efficiency of buildings: Law of Ukraine № 2118-VIII, 22.06.2017. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19>
3. DBN B.2.6-31:2016. Thermal insulation of buildings. K.: Ministry of Construction of Ukraine, 2017. 37 p.
4. National plan to increase the number of nearly zero-energy buildings. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/88-2020-%D1%80#Text>
5. DSTU B EN ISO 13790: 2011. Energy efficiency of buildings. Calculation of energy consumption for heating and cooling. K: NDIBK, 2011. 229 p.
6. 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.
7. DSTU-N B B.1.1-27: 2010. Protection against dangerous geological processes, harmful operational influences, from fire. Construction climatology. K. 2011. 135 p.
8. IWEC climatic data for Ukraine. URL: [https://energyplus.net/weather-location/europe\\_wmo\\_region\\_6/UKR/UKR\\_Kiev.333450\\_IWEC](https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR/UKR_Kiev.333450_IWEC)
9. Meteonorm climatic data. URL: <https://meteonorm.com/en/>
10. TMY JRC climatic data. URL: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)
11. TMY Onebuilding climatic data. URL: <https://climate.onebuilding.org/>
12. Deshko V., Bilous I., Hetmanchuk H. Bases of climatic for buildings energy performance determination. Power Engineering: Economics, Technique, Ecology. 2017. No 4, p.67-73.
13. Archive of actual climatic data. URL: <http://rp5.ua/>
14. СНиП 2 01 01 82 Building climatology and geophysics / Gosstroy USSR. M.: Stroyizdat, 1983. 136 p.

Надійшла 3.06.2022

Received 3.06.2022

## ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ГРОМАДСЬКИХ І ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ В УКРАЇНІ

У даній статті проведено аналіз потенціалу використання ВДЕ на потреби теплопостачання громадських і житлових будівель в Україні та світі. Визначено, що Україна має один з найбільших у Європі потенціал по використанню ВДЕ. Проведено аналіз «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» та зроблено висновок, що спостерігається тенденція до децентралізації енергопостачання та збільшення частки використання технологій ВДЕ для генерації теплової енергії. Проаналізовано загальне постачання первинної енергії за типами джерел та обсягами генерування. На основі співставного аналізу фактичних та прогнозованих даних по генеруванню енергії ВДЕ зроблено висновок, що є тренд на поступове зменшення генерації теплової енергії котельнями на вугіллі, газі та нафтопродуктах, та збільшення генерації за допомогою котлів на біомасі, сонячних колекторів та теплових насосів. На основі аналізу стратегії Net Zero зроблено висновок, що Україна та світ поступово будуть зменшувати використання традиційної генерації та впроваджувати сучасні технології не тільки на потреби електропостачання, а й на потреби теплопостачання.

**Ключові слова:** Теплопостачання будівель, відновлювальні джерела енергії, тепла енергія, сонячна енергія, біопаливо, біогаз.

### Вступ.

В Європі впроваджується 4-ий енергетичний пакет «Чиста енергія для всіх європейців», мета якого пов'язана із полегшенням переходу від викопного палива до більш екологічно чистої енергії та виконання зобов'язання Паризької угоди ЄС щодо скорочення викидів парникових газів». Основними цілями нового енергетичного пакету є: досягнення статусу кліматично-нейтральної Європи до 2050 року; спрощення умов інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергетичну систему України; формування енергоефективного суспільства; розширене застосування ІТ-технологій в енергетиці у відповідності з концепцією Smart Grid. На рисунку 1 показано частку ВДЕ у світовому енергетичному балансі в порівнянні з традиційними джерелами енергії.

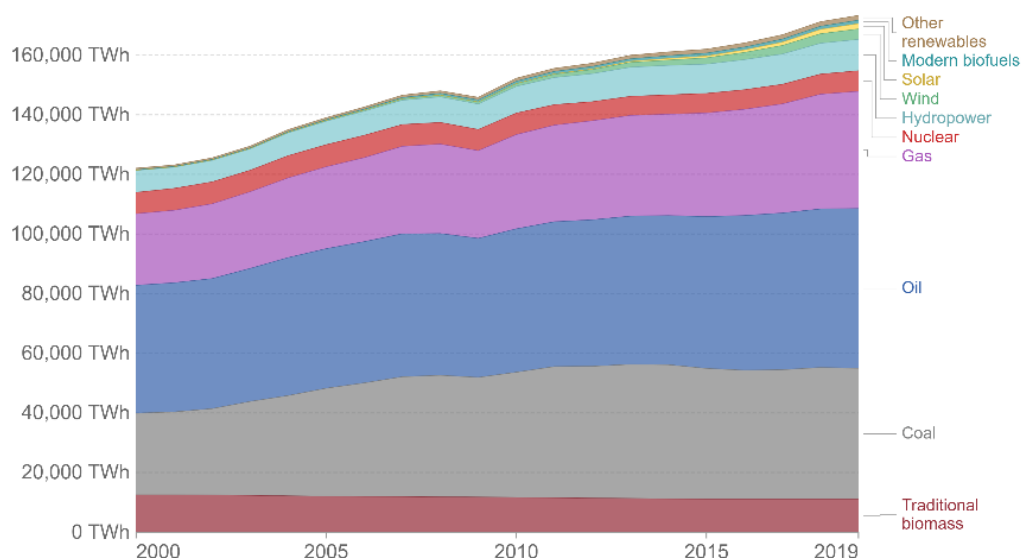


Рисунок 1 – Розвиток ВДЕ за останні 20 років

Не зважаючи на зростання встановлених потужностей відновлювальних джерел енергії (див. рис. 1), складна економічна ситуація в Україні не сприяє досягненню рівня споживання енергії з ВДЕ на рівні 27% та забезпеченню збалансованого розвитку ВДЕ, прийнятих у «Національному плані дій з відновлювальної енергетики». Найбільшу частку серед ВДЕ в Україні становлять вітрові, сонячні електростанції та ТЕЦ на біомасі. Серед країн Південно-Східної Європи технічний потенціал використання ВДЕ України є один з найбільших [1], тому потрібно розвивати відновлювальні джерела для декарбонізації енергетики, заміщення традиційних джерел енергії, через виведення з експлуатації атомних електростанцій, вугільних та газових ТЕЦ та ТЕС.

Системи централізованого теплопостачання (СЦТ) можуть скласти значну частину у декарбонізації енергетичного сектора, оскільки вони дозволяють інтегрувати ВДЕ в енергетичний комплекс, що є складним завданням на рівні окремої будівлі в міських густонаселених районах. Багато міст активно впроваджують технології ВДЕ у системі централізованого теплопостачання, але сьогодні близько 90% глобального виробництва централізованого тепла все ще залежить від викопного палива [2].

У зв'язку з цим необхідно проаналізувати потенціал використання відновлювальних джерел енергії для теплопостачання громадських та житлових будівель. Також необхідно проаналізувати шляхи зменшення негативного впливу на навколишнє середовище у сфері відновлювальної енергетики в Україні.

#### **Мета дослідження.**

Метою дослідження є аналіз сучасного стану відновлюваної енергетики в Україні, та визначення загальних тенденцій використання відновлюваних джерел енергії у галузі теплопостачання будівель для більш інтенсивного їх подальшого використання.

**Матеріал і результати досліджень.** Згідно «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», схваленої розпорядженням Кабінету міністрів України № 605-р від 18 серпня 2017 р. за п. 3.2. «Оптимізація та інноваційний розвиток енергетичної інфраструктури до 2025 року» щодо відновлюваних джерел енергії передбачено:

- забезпечення реалізації проєктів з децентралізації енергопостачання на місцевому рівні (на основі використання відновлюваної енергетики, «розумних мереж», підвищення енергоефективності);
- збільшення використання гео- та гідротермальної енергії при генерації теплоенергії;
- вивчення можливості та, за доцільністю, впровадження використання систем акумулювання для балансування енергетичної системи.

Різні види відновлюваних джерел енергії мають принципові відмінності, тому їх ефективне використання у приватному секторі повинно ґрунтуватись на науково розроблених принципах перетворення енергії ВДЕ у види, потрібні споживачам. У процесі впровадження заходів відновлюваної енергетики для енергозабезпечення споруд громадського призначення необхідно орієнтуватись на місцеві енергоресурси, вибираючи найбільш ефективні з них. Важливим заходом ефективного використання ВДЕ є комплексний підхід у плануванні енергетичних проєктів на основі ВДЕ для житлових і комунальних будівель. Використання ВДЕ повинне бути багатоваріантним і комплексним, що дозволить отримати оптимальний енергетичний та економічний ефект [3, 12].

Перед тим як створювати систему теплопостачання на основі ВДЕ для споруд громадського та житлового призначення, потрібно визначити енергетичний потенціал в місцевості де розташовуються споруди та провести аналіз параметрів цих джерел. Необхідно оцінити потік енергії, а потім визначити частину, яка може бути використана в енергоустановках для житлових і громадських будівель.

Основними завданнями при створенні комплексних енергосистем на основі відновлюваних джерел енергії житлових і комунальних будівель є забезпечення їх надійними акумуляторами енергії та створення ефективного допоміжного обладнання для зниження флуктуацій параметрів енергосистем і підтримання необхідних робочих параметрів, а також створення обладнання для автоматичного управління режимами їх роботи [4, 5].

Використання обладнання яке використовує сонячну енергію є позитивним з точки зору екології, дозволяє зменшити викиди шкідливих речовин та значно зменшити використання органічного палива. У сучасних низькотемпературних системах теплопостачання (до 100 °C), які застосовуються для перетворення сонячної енергії у низькопотенційну теплоту для гарячого водопостачання, опалення та інших теплових процесів, як правило використовують так званий плоский сонячний колектор, що являє собою геліоприймаючий абсорбер, по якому циркулює теплоносіє. Сонячні колектори теплоізолювані з тильної та закриті з лицевої сторони. Експлуатаційні витрати на роботу системи гарячого водопостачання на базі СК мінімальні, адже електрична енергія витрачається тільки на роботу циркуляційного насоса. Наприклад, за потреби громадського закладу в 650 л/добу гарячої води, річний виробіток теплової енергії плоскими сонячними колекторами становить 8,7 МВт·год (7,5 Гкал) [6].

В областях південніше 50° північної широти витрати теплоти на гаряче водопостачання в громадських та житлових будівлях складає приблизно 60%, тому завдяки застосуванню сонячних установок для ГВП можна буде отримати значну економію при відносно невеликих витратах.



Одна з таких найпростіших термосифонних систем дозволяє організувати ефективне гаряче водопостачання у стаціонарних і автономних умовах дачних та житлових будинків, таборах відпочинку, фермах, пасовищах тощо[4]. Також перспективно застосовувати пасивні системи сонячного опалення, в них не використовується спеціальне обладнання, а самі конструкційні елементи будівель та споруджень є приймачами та акумуляторами сонячної енергії. Системи дозволяють у різних кліматичних зонах заощаджувати від 20 до 60 % традиційного палива, що витрачається на опалення. Необхідне підвищення зацікавленості виробників для впровадження і отримання економії паливно-енергетичних ресурсів.

Досить ефективним є також комплексне використання різних джерел енергії – як традиційних, так і нетрадиційних. При врахуванні всіх техніко-економічних аспектів можна досягти помітного зменшення капіталовкладень та заощадження органічного палива. Застосування сонячно-теплопомпової системи теплопостачання індивідуальних житлових будинків з вакуумними сонячними колекторами забезпечує до 65% енергоспоживання.

На початку 2022 року встановлена потужність об'єктів ВДЕ в Україні досягла 9,5 ГВт (6,4 ГВт – промислові СЕС, 1,2 ГВт – СЕС приватних домогосподарств, 1,5 ГВт – вітроелектростанцій, 0,3 ГВт – об'єкти біоенергетики, 0,1 ГВт – мала гідроенергетика).

Сектор відновлювальної енергетики розвивається з кожним роком все більше, це можливо пов'язати з переоцінкою пріоритетів країн світу. Нажаль світові інвестиції в енергетичні потужності що працюють на ВДЕ, залишаються на недостатньому рівні для суттєвого зростання частки ВДЕ. Рекордно високі ціни на природний газ і вугілля призвели до зростання цін на електроенергію і тепло. Сьогодні при нових цінах на традиційні енергоносії енергія з ВДЕ стає ще більш конкурентною на ринку генерувальних технологій. З'являється необхідність стрімкого розвитку сонячної, вітрової та іншої генерації для підвищення конкурентоспроможності сектору енергетики.

На рисунку 2 зображено світові тенденції застосування ВДЕ для теплопостачання житлових і громадських будівель, зокрема, в Україні [2].

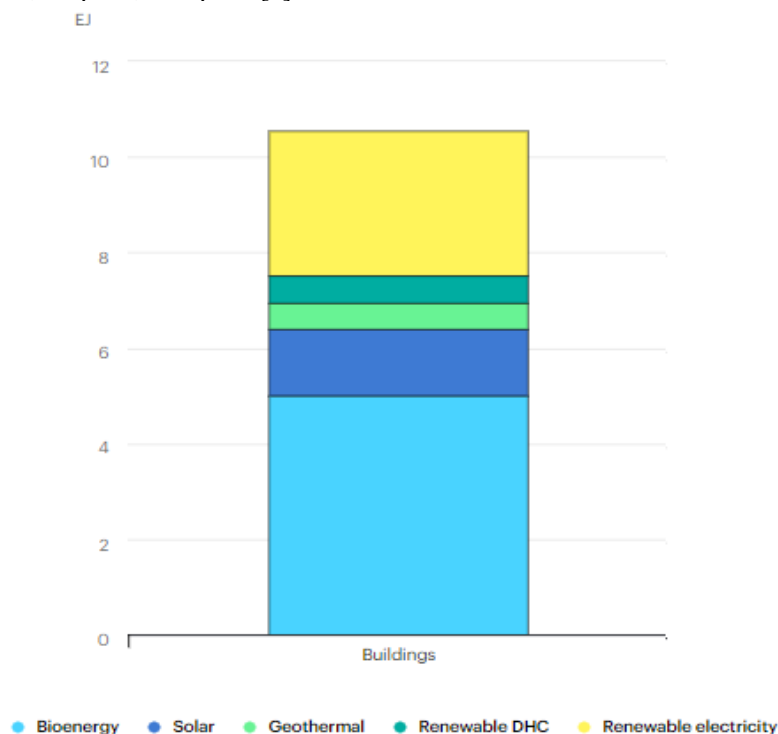


Рисунок 2 - Частка різних типів ВДЕ у загальному споживанні теплової енергії будівлями

З рисунку 2 видно що найпопулярнішим видом ВДЕ для теплопостачання будівель є біопаливо. Електрична енергія генерована ВДЕ є другою за величиною складовою теплогенерації після біопалива. Використання сонячної енергії займає третє місце та зазвичай використовується для ГВП.

Біоенергетика є лідером серед ВДЕ з генерування тепла споживаного в будівлях. Біопаливо використовується в основному в печах і твердопаливних котлах (на дровах та пелетах), а також в мережах централізованого теплопостачання. Слід зазначити, що для останніх, побутові відходи та біомаса становлять найбільшу частку ВДЕ. Близько 11% світового виробництва електроенергії використовується на опалення будівель електричними обігрівачами, котлами та тепловими насосами. Електрична енергія генерована ВДЕ є другою за величиною складовою ВДТ, котра використовується на опалення в будівлях після біопалива.

На сьогодні у світовій практиці використовується велике розмаїття теплових насосів, що відрізняються за принципом роботи. Тепловий насос можна вважати «мультиплікатором тепла», який збирає та концентрує теплову енергію, перетворюючи низькопотенційне тепло навколишнього середовища на високопотенційне тепло системи опалення будинку. Тепловий насос завжди має зовнішнє джерело тепла. Ним може бути атмосферне та витяжне повітря, ґрунт і ґрунтові води, водойми та стічні води. Показники ефективності теплових насосів відрізняються залежно від конкретних умов, у яких діє пристрій. Так, якщо використовується тепловий насос, і на ділянці глинистий ґрунт, то ефективність теплового насоса буде приблизно вдвічі вищою, ніж якби труби теплового насоса лежали в піщаному ґрунті. У зоні з м'яким кліматом можна встановити тепловий насос типу «повітря–вода», який не вимагає надмірних капітальних витрат і особливо ефективний в місцевості, де сезонні коливання температур порівняно невеликі.

Виробництво відновлюваної теплової енергії також доцільно нарощувати за рахунок впровадження геліоколекторів, особливо у південних областях України, де кількість сумарної сонячної радіації складає 1300-1400 кВт·год/м<sup>2</sup>. Технічно-досяжний потенціал сонячної енергії для виробництва тепла становить, за різними оцінками, 14,5-17 млрд кВт·год/рік порахували в Держенергоефективності [7]. Теплова енергія сонячної радіації може ефективно використовуватись для гарячого водопостачання і опалення. Що стосується сонячних колекторів, то в зимовий період в більшості регіонів України вони не зможуть повною мірою забезпечити тепловою енергією на потреби опалення. Тому для наших кліматичних зон найбільш прийнятним є застосування теплових насосів.

За даними Міжнародної енергетичної агенції ВДЕ становлять значну частину в загальному постачанні первинної енергії у світі[2]. У таблиці 1 представлено загальне постачання первинної енергії в Європі[2].

Таблиця 1 - Загальне постачання первинної енергії в Європі

Країна	Разом	Вугілля	Природний газ	Ядерна енергетика	Гідро-енергетика	Вітрова, сонячна	Біопаливо, відходи	Нафта
Кілотон нафтового еквіваленту (ктне)								
Уся Європа	1998105	321869	514120	244092	49751	67442	174284	635011
Німеччина	311245	71414	75341	19887	1733	13407	31012	102965
Франція	247086	9891	38492	103796	4297	3579	17912	72568
Великобританія	175883	9564	67839	18327	510	5344	12414	60616
Італія	153445	9344	61549	-	3113	9331	14861	52001
Туреччина	146797	40089	44232	-	5006	10170	3032	44318
Іспанія	126014	12649	272661	15123	1615	7594	7540	53438
Польща	103845	49421	15445	-	220	1373	8145	29028
Україна	89462	25757	24554	22449	769	149	2989	12696

Згідно даних ІЕА [2] у 2019 році виробництво енергії на гідроелектростанціях становило 23430 ТДж, на вітро- сонячних електростанціях - 17831 ТДж, на біостанціях – 158 530 ТДж. Вироблена енергія з біостанцій була використана для теплопостачання громадських та житлових будівель в об'ємі 77807 ТДж, для власних потреб ТЕЦ та теплових установок – 6460 ТДж та 33064 ТДж відповідно. За даними Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, встановлена потужність відновлювальних джерел енергії в країні в 2010-2019 рр. представлено в таблиці 2[7].

Таблиця 2 – Потужність відновлювальних джерел енергії в Україні за 2010-2019 роки.

Джерела	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Потужність, МВт										
Вітрова енергія	87	151	194	334	426	427	438	465	533	1170
Сонячна енергія	3	191	326	616	411	432	531	742	1388	4925
СЕС домогосподарств	-	-	-	-	0,1	2	17	51	157	400
Малі ГЕС	68	71	73	75	80	87	90	95	99	114
Біомаса	-	-	6	17	35	35	39	39	52	55,9
Біогаз	-	-	-	7	14	17	20	34	46	70,3
Великі ГЕС та ГАЕС	5400	5400	5400	5724	5724	6048	6048	6048	6048	6048



Як видно з таблиці 2, у 2019 р. найбільший обсяг встановленої потужності серед ВДЕ мають: ГЕС та ГАЕС – 6 048,2 МВт, сонячні електростанції – 4 925 МВт та вітрові електростанції – 1 170 МВт. За даними Української асоціації відновлюваної енергетики, починаючи з 2010 р. в розвиток ВДЕ в Україні було залучено 12,3 млрд дол. США. Рекордними за розмірами інвестицій стали 2018 та 2019 рр.: у будівництво нових об'єктів було залучено 2,4 та 4,1 млрд дол відповідно[8]. У 2020 р. у нові об'єкти ВДЕ інвестували 1,4 млрд дол. У 2020 році у 13 регіонах спостерігалось збільшення частки обсягу теплової енергії, виробленої з альтернативних видів палива або відновлюваних джерел енергії (до загального обсягу виробленої теплової енергії в регіоні за звітний період) до відповідних показників попереднього року, що призвело до збільшення загальноукраїнського показника з 15,8 до 15,9%. За підсумками 2020 року лідерами за зазначеним показником стали Рівненська (41,8 %), Кіровоградська (40,4 %), Волинська (34,6%), Дніпропетровська (32,7%) та Херсонська (26,5%), області [9].

У січні 2020 року Міненергодовкілля України оприлюднило проект Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року, де для електроенергетичної галузі України задекларовані паралельні процеси модернізації, скорочення викидів парникових газів та поступового скорочення вугільної генерації. Згідно з проектом цієї Концепції повне заміщення вугільних теплових електростанцій (ТЕС) до 2050 року відбуватиметься за рахунок розвитку сонячної і вітрової генерації та ТЕЦ на біомасі у поєднанні з новими високоманевровими генеруючими потужностями на газі, технологіями акумулювання та зберігання електроенергії для балансування енергосистеми. У 2020 році продаж теплових насосів та обладнання на ВДЕ становили понад 20% від загального обсягу установок. Тим не менш, у сценарії Net Zero по зменшенню викидів до 2050 року частка теплових насосів, низьковуглецевого централізованого опалення буде сягати 80%. На рисунку 3 зображені обладнання ВДЕ для теплопостачання, продані в світі для житлових і громадських будівель за сценарієм Net Zero у відсотках, 2010-2030 рр. [2].

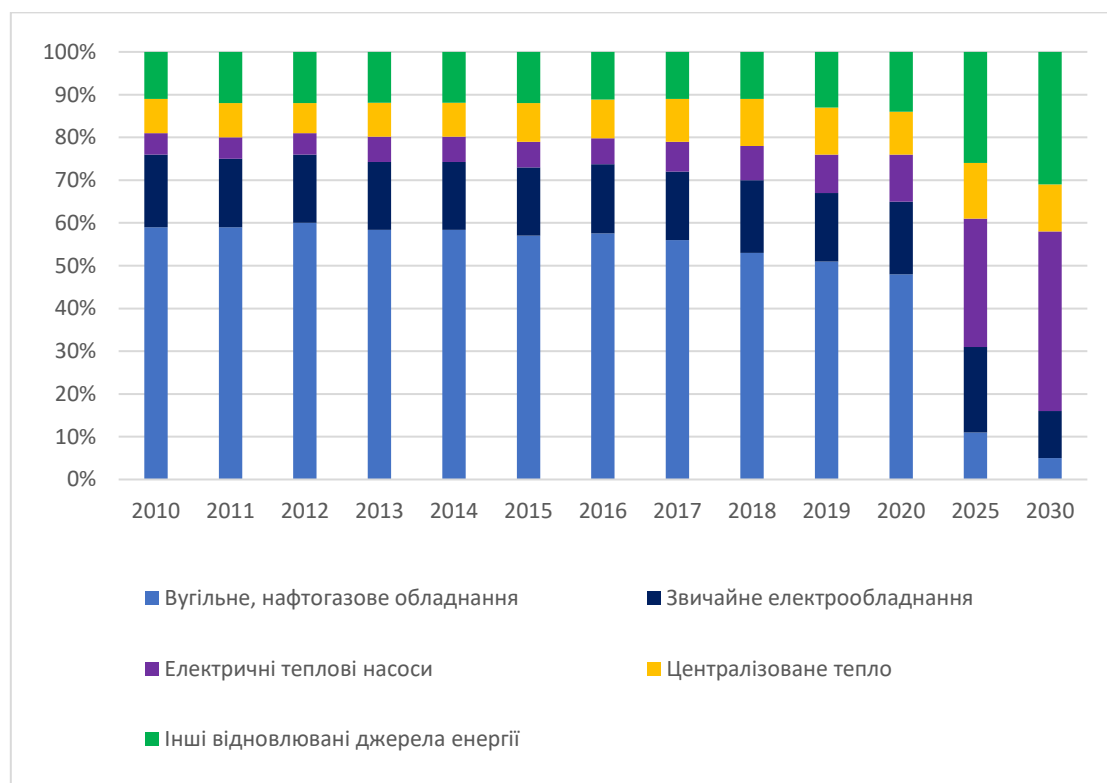


Рисунок 3 - Технології опалення, продані в світі для житлових і службових будівель за сценарієм Net Zero, 2010-2030 рр.

Як видно з рисунку 3 прогнозується поступове зменшення використання вугільного та нафтогазового обладнання та зростання використання електричних теплових насосів та інших відновлювальних джерел енергії на потреби теплопостачання.

Зміна структури паливного балансу СЦТ України призвела до зміни структури генерації теплової енергії СЦТ, яка наведена в таблиці 3.

Таблиця 3 – Прогнозна структура генерації теплової енергії (млн Гкал/рік)

Теплове джерело/Рік	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Котельні, ТЕС на вугіллі	11,27	10,3	8,47	6,92	5,48	3,74	3,17
Котельні, ТЕЦ на газі	45,14	43,23	36,07	29,40	24,89	21,30	16,70
Котли на біомасі	3,79	4,67	4,63	4,57	4,74	4,62	4,74
Котли на нафтопродуктах	0,53	0,42	0,27	0,15	0,04	0,00	0,00
Сонячні колектори	0,06	0,25	0,54	0,86	1,49	2,12	2,84
Теплові насоси	1,09	2,14	3,28	4,23	5,57	7,57	10,50
Електрокотли	0,28	0,44	0,54	0,48	0,48	0,65	0,90
<b>Всього</b>	<b>62,2</b>	<b>61,4</b>	<b>53,8</b>	<b>46,6</b>	<b>42,7</b>	<b>40,0</b>	<b>38,8</b>

У табл. 3 наведено річні обсяги генерації теплової енергії, які враховують її виробництво як в опалювальний, так і в неопалювальний періоди [10]. Дані з таблиці 3 свідчать про поступове зменшення генерації теплової енергії котельнями на вугіллі, газі та нафтопродуктах, а також про збільшення генерації за допомогою котлів на біомасі, сонячних колекторів та теплових насосів. У теплових джерелах у переважній більшості випадків кількість теплової енергії, яка використовується для приготування гарячої води протягом року, приблизно дорівнює кількості теплової енергії, яка іде на опалення протягом опалювального періоду. Завдяки стимулюванню заходів з утеплення, переведення існуючого опалення на використання біомаси та встановлення теплових насосів і сонячних колекторів для нагріву води в житлових та бюджетних будівлях в Чехії при теплопостачанні можлива економія споживання енергії на 1750 ГВт-год та збільшення її виробництва із відновлюваних джерел на 1027,8 ГВт-год. У результаті зменшення споживання палива в Чехії при виробництві енергії завдяки енергозбереження населенням відбувається скорочення 1 % щорічних викидів CO<sub>2</sub> в атмосферу та зменшення забруднення пилом [11].

#### Висновки.

Згідно проведеного аналізу можна зробити висновок, що в Україні один з найбільших у Європі потенціал використання ВДЕ. Згідно «Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» передбачено реалізацію проєктів з децентралізації енергопостачання та збільшення частки використання технологій ВДЕ для генерації теплової енергії.

Проаналізувавши загальне постачання первинної енергії можна зробити висновок, що Україні необхідно і надалі розвивати технології ВДЕ у галузі теплопостачання будівель і споруд. Порівнявши представлені фактичні та прогнозовані дані по генерації енергії ВДЕ можна зробити висновок, що є тренд на поступове зменшення генерації теплової енергії котельнями на вугіллі, газі та нафтопродуктах, та збільшення генерації за допомогою котлів на біомасі, сонячних колекторів та теплових насосів.

Проведений аналіз свідчить, що найпопулярнішим видом ВДЕ для теплопостачання є біопаливо та біогаз. Електрична енергія генерована ВДЕ є другою за величиною складовою теплогенерації після біопалива. Використання сонячної енергії займає третє місце та зазвичай використовується для ГВП. Згідно даних стратегії Net Zero можна зробити висновок що Україна та світ поступово будуть зменшувати використання традиційної генерації та впроваджувати сучасні технології не тільки на потреби електропостачання, а й на потреби теплопостачання.

#### Список використаної літератури

1. International Renewable Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/>
2. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org>
3. Відновлювані джерела енергії [Електронний ресурс] : монографія / А.А. Баріло та ін. ; за заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с. – режим доступу: <http://elibrary.chdtdtu.edu.ua/e-books/4164>
4. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії / Кудря С.О. – Підручник. – Київ: Національний технічний університет України («КПІ»), 2012. – 495 с
5. Яценко Л.В. Визначення ефективності застосування комбінованих енергосистем на основі відновлюваних джерел енергії. // Технічна електродинаміка, ч. 1, Київ, 1999
6. Енергія сонця [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <http://saee.gov.ua/uk/ae/sunenergy>
7. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <https://saee.gov.ua/uk/activity/plany-rozvytku>

8. Української асоціації відновлюваної енергетики URL: <https://uare.com.ua/>
9. Міністерство розвитку громад та територій України (Мінрегіон України) URL: <https://www.minregion.gov.ua/about/>
10. Тенденції розвитку системи централізованого теплопостачання України URL: [http://pge.org.ua/index.php?option=com\\_docman&task=art\\_details&mid=20211&gid=600&lang=ua](http://pge.org.ua/index.php?option=com_docman&task=art_details&mid=20211&gid=600&lang=ua)
11. Железний А. Огляд державного механізму стимулювання енергозбереження в муніципальних та житлово-комунальних будівлях Чехії. Національний екологічний центр України, [www.nescu.org.ua](http://www.nescu.org.ua). Київ. – 2012
12. Дерев'яно Д.Г. Методи оцінювання доцільності впровадження заходів з підвищення енергетичної ефективності і будівель комунальної сфери. / Дерев'яно Д.Г., Зайченко С.В., Беспала Н.Г. // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2022. – № 1. – С. 38–45. – ISSN 1813-5420.

D. Derevinko<sup>1,2</sup>, Ph. D, Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-4877-5601

N. Bospala<sup>2</sup>, ORCID 0000-0002-4466-6491

I. Bohoiko<sup>1</sup>, student, ORCID 0000-0002-6816-6352

A. Kolodiazna<sup>1</sup>, student, ORCID 0000-0001-6840-6988

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

<sup>2</sup>Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

### PROSPECTS FOR USING RENEWABLE ENERGY SOURCES FOR HEAT SUPPLY OF PUBLIC AND RESIDENTIAL BUILDINGS IN UKRAINE

*In this paper, an analysis of the potential of using RES for the heat supply needs of public and residential buildings in Ukraine and the world is carried out. It was determined that Ukraine has one of the largest potentials in Europe for the use of RES. An analysis of the "Energy Strategy of Ukraine for the period until 2035 "Security, energy efficiency, competitiveness" was carried out and it was concluded that there is a trend towards decentralization of energy supply and an increase in the use of RES technologies for thermal energy generation. The total primary energy supply was analyzed by types of sources and volumes of generation. On the basis of a comparative analysis of actual and projected data on RES energy generation, it was concluded that there is a trend towards a gradual decrease in thermal energy generation by coal, gas, and oil-fired boilers, and an increase in generation using biomass boilers, solar collectors, and heat pumps. Based on the analysis of the Net Zero strategy, it was concluded that Ukraine and the world will gradually reduce the use of traditional generation and introduce modern technologies not only for the needs of electricity supply, but also for the needs of heat supply.*

**Key words:** Heat supply of buildings, renewable energy sources, thermal energy, solar energy, biofuel, biogas.

### References

1. International Renewable Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/>
2. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org>
3. Vidnovliuvani dzherela enerhii [Elektronnyi resurs] : monohrafiia / A.A. Barylo ta in. ; za zah. red. S.O. Kudri. – Kyiv: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU, 2020. – 392 s. – rezhyom dostupu: <http://elib.chdtu.edu.ua/e-books/4164>
4. Netradytsiini ta vidnovliuvani dzherela enerhii / Kudria S.O. – Pidruchnyk. – Kyiv: Natsionalnyi tekhnichniy universytet Ukrainy («KPI»), 2012. – 495 s
5. Iatsenko L.V. Vyznachennia efektyvnosti zastosuvannia kombinovanykh enerhosystem na osnovi vidnovliuvanykh dzherel enerhii. // Tekhnichna elektrodynamika, ch. 1, Kyiv, 1999
6. Enerhiia sentsia [Elektronnyi resurs] // – Rezhyom dostupu: <http://saee.gov.ua/uk/ae/sunenergy>
7. Derzhavne ahentstvo z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia Ukrainy. URL: <https://saee.gov.ua/uk/activity/plany-rozvytku>
8. Ukrainskoi asotsiatsii vidnovliuvanoi ener-hetyky URL: <https://uare.com.ua/>
9. Ministertsvo rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy (Minrehion Ukrainy) URL: <https://www.minregion.gov.ua/about/>
10. Tendentsii rozvytku systemy tsentralizovanoho teplopostachannia Ukrainy URL: [http://pge.org.ua/index.php?option=com\\_docman&task=art\\_details&mid=20211&gid=600&lang=ua](http://pge.org.ua/index.php?option=com_docman&task=art_details&mid=20211&gid=600&lang=ua)
11. Zhelieznyi A. Ohliad derzhavnogo mekhanizmu stymuliuvannia enerhozberezhennia v munitsypalnykh ta zhytlovo-komunalnykh budivliakh Chexii. Natsionalnyi ekolohichniy tsentr Ukrainy, [www.nescu.org.ua](http://www.nescu.org.ua). Kyiv. – 2012
12. Derevianko D.H. Metody otsiniuvannia dotsilnosti vprovadzhennia zakhodiv z pidvyshchennia enerhetychnoi efektyvnosti i budivel komunalnoi sfery. / Derevianko D.H., Zaichenko S.V., Bospala N.H. // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. – 2022. – № 1. – С. 38–45. – ISSN 1813-5420.

Надійшла 18.05.2022

Received 18.05.2022

## ФОРМУВАННЯ СТРАТЕГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ ЯК ЗАПОРУКИ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ

*Металургійне виробництво є надзвичайно енергоємним. На нього припадає друга за величиною частка енергоспоживання та найбільша частка викидів CO<sub>2</sub>. Крім цього, металургійна галузь України в воєнний час стикнулася і з іншими труднощами. Тому, щоб бути конкурентноздатними на міжнародному ринку металургійні підприємства України мають сфокусувати свою увагу на енергоефективності та декарбонізації виробництва. Щоб ця діяльність мала цілеспрямований характер, окремі підприємства та галузь в цілому мають розробити відповідну стратегію. Один з можливих підходів до вирішення цього питання присвячена ця стаття. Поряд з описом математичної моделі формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв в статті наведено структуру витрат енергоресурсів, а також суттєві споживачі енергоресурсів на металургійних підприємствах. Крім того, окреме місце в статті приділено питанню побудови базового рівня енергоспоживання з урахуванням положень найсучасніших міжнародних стандартів у сфері енергоменеджменту, а також наведено основні чинники, що впливають на енергоспоживання. В роботі також наведено основні заходи з підвищення енергоефективності для кожної групи суттєвих споживачів енергоресурсів.*

**Ключові слова:** базовий рівень енергоспоживання, декарбонізація, енергоефективність, металургійне підприємство, оптимальна стратегія, підвищення енергоефективності, система енергоменеджменту.

### Вступ

На сучасному етапі розвитку цивілізації прогрес науки і технологій у базових галузях економіки відіграє ключову роль у забезпеченні національної безпеки країни. Для України однією з таких базових галузей є чорна металургія, що забезпечує 27 % обсягу товарного виробництва промисловості та 40 % валютних надходжень [1]. Україна має унікальні можливості для розвитку чорної металургії, володіючи одними з найбільших у світі запасами залізної руди.

За даними Офісу з розвитку підприємства та експорту [2] у 2021 році найвищий обсяг експорту України має продукція металургії. За результатами року об'єм експорту недорогоцінних металів та виробів з них склав 15,98 млрд доларів США, що на 77% більше, ніж у 2020 році. При цьому, за даними World Steel Association [3] Україна посіла 14-те місце у глобальному рейтингу виробників сталі виробивши протягом 2021 року 21,4 млн т сталі, 21,2 млн т чавуну та 19 млн т прокату.

Такі тенденції зберігались і у довоєнний період. Так за перші два місяці 2022 року обсяг експорту металургійних підприємств збільшилась майже на 35%, у порівнянні з аналогічним періодом 2021 року. Наразі спостерігається значне скорочення виробництва у металургійному секторі. За даними [4] перші півроку 2022 виробництво металургійних підприємств становить близько 50% від аналогічного періоду 2021 року. Експорт залізної руди скоротився на 33%, до аналогічного періоду 2021 року, експорт чавуну на 50%, а експорт напівфабрикатів на 45%. Значна частина підприємств через близьке розташування до бойових дій тимчасово зупинили свою роботу з огляду на безпеку або припинили повністю роботу через окупацію та значні пошкодження («Азовсталь» та «ММК ім. Ілліча»). За даними компаній «Азовсталь» в 2021 році випустив 4,1 млн т загального прокату, 4,34 млн т сталі, 3,8 млн т чавуну, а «ММК ім. Ілліча» – 4,1 млн т, 4,26 млн т та 5,06 млн т, відповідно.

Слід зазначити, що у світі виробництво чавуну та сталі є надзвичайно енергоємним процесом, що спричиняє 7-9% прямих викидів CO<sub>2</sub> від глобального використання викопного палива. За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) [5] серед галузей важкої промисловості на виробництво чавуну та сталі припадає друга за величиною частка споживання енергії та найбільше джерело викидів CO<sub>2</sub>. Використання енергії на виробництво 1 т сталі хоч і знизилось за останні 50 років на 60%, але не може бути повністю припинене внаслідок того, що метал - матеріальна субстанція, він не виробляється «з повітря» і «за допомогою повітря». Тому необхідні цілеспрямовані заходи щодо підвищення енергоефективності та забезпечення вищої ефективності технологічного обладнання для стримування зростання споживання енергії та викидів CO<sub>2</sub> у цій галузі.

Однак, згідно з [6], World Steel Association звернула увагу не тільки на обсяги викидів CO<sub>2</sub> та споживання енергії, але і на здатність металу бути постійним матеріалом у циркулярній економіці та можливість металургії підтримувати циркулярну економіку шляхом просування 4R-підходу (Reduce - Reuse - Remanufacture - Recycle). Як відомо, сталь може повністю перероблятися з одного виробу в інший. Переробка економить як природні ресурси, так і енергію, і чим більше сталі переробляється, тим більше зберігається довкілля. Також виробництво металу з брухту потребує лише близько третини енергії, необхідної для виробництва сталі із залізної руди.

Тому, одним з актуальних напрямків можливого забезпечення українських металургійних підприємств сировиною може стати використання знищеної військової техніки, якої наразі вдосталь розкидано по полях України. Наразі Українська асоціація вторинних металів («УАВтормет») вивчає світового досвіду для переробки військової техніки на металобрухт [7]. Експерти металургійної сфери підрахували, що вся знищена техніка збройних сил Росії важить понад 75 тис. т, проте переплавити на метал можна далеко не все. Через вигоряння метал може стати некондиційним та непридатним для переплавлення. Окрім цього, частину техніки беруть на деталі або передають до складу української армії.

Тому, зважаючи на актуальність питання екологічності та енергоефективності металургійних виробництв, слід приділити увагу розроблення методичного підходу до формування оптимальної стратегії підвищення рівня їх енергоефективності та декарбонізації, оскільки це безпосередньо впливає на собівартість продукції та обсяг викидів CO<sub>2</sub>.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є розроблення методичного підходу до формування оптимальної стратегії підвищення рівня енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв. Для досягнення цієї мети в роботі поставлено та вирішено такі задачі:

1. Оцінити структуру витрат енергоресурсів в енергетичному балансі металургійних підприємств, а також визначити суттєві напрямки енерговикористання.
2. Встановити показники енергоефективності як на рівні окремих суттєвих напрямків енерговикористання, так і на рівні всього металургійного підприємства, а також визначити чинники, що впливають на ці показники з урахуванням положень сучасних міжнародних стандартів у сфері системи енергетичного менеджменту (ISO 50001, ISO 50006, ISO 50047).
3. Навести перелік типових заходів щодо підвищення рівня енергоефективності металургійних підприємств для кожного суттєвого напрямку енерговикористання.
4. Розробити математичну модель формування оптимальної стратегії підвищення рівня енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв з урахуванням рівня суттєвості енерговикористання.

**Аналіз літературних джерел.** Результати досліджень, викладених в [8], показали, що збільшення виробництва сирової сталі є найважливішим фактором, який призводить до суттєвого збільшення загального споживання енергії та викидів в навколишнє середовище в металургійній промисловості. На противагу цьому, підвищення рівня енергоефективності є найбільш керованим чинником, який може впливати як на енергоспоживання, так і на викиди CO<sub>2</sub> в металургійному виробництві, а зміна клімату та зростання цін на енергоносії ще більше підвищують їх значення.

Для боротьби з викидами CO<sub>2</sub> в металургійному виробництві, а також для підвищення рівня його енергоефективності, за ініціативи Комісії ЄС із залученням Європейського бюро з комплексного запобігання та контролю забруднення та Інституту перспективних технологічних досліджень було розроблено Довідковий документ з найкращих доступних технологій (НТД) для виробництва чавуну та сталі [9]. В даному документі, окрім іншого, визначено ключові проблеми довкілля для галузі, вивчено методи, які є найбільш відповідними для вирішення цих ключових питань. Крім того, в документі визначено найкращі рівні екологічної ефективності на основі наявних даних у Європейському Союзі та в усьому світі, а також вивчено умови, за яких може бути досягнуто цих рівнів екологічної ефективності.

Протягом останніх десятиліть металургійна промисловість значно скоротила викиди парникових газів, підвищивши рівень енергоефективності та впровадивши нові технології та заходи, що принесли користь навколишньому середовищу та економіці. Тому, Міжнародна асоціація сталі [10] вважає, що зменшення викидів парникових газів є глобальним викликом, який потребує глобального вирішення.

Задля цього в публікаціях [11 - 14] розглянуто з різним рівнем деталізації заходи з енергоефективності, які можуть застосовуватись на металургійних підприємствах а також ті заходи, що пов'язані з реалізацією НТД металургійних виробництв.

Поряд з цим, у жовтні 2020 року МЕА оприлюднило дорожню карту щодо пріоритетних технологій виробництва чавуну та сталі [15]. У цьому звіті наводяться технології та стратегії, необхідні для металургійної галузі, щоб рухатися по шляху, сумісному з більш ширшим баченням МЕА щодо сталого енергетичного розвитку галузі. Під час формування пріоритетних технологій враховувались як виклики, так і можливості, а також ключові технології та процеси, які дозволять суттєво скоротити викиди CO<sub>2</sub> у металургійній галузі. Також, у звіті приділено увагу оцінці потенціалу енергоефективності, включаючи збільшення використання вторинних енергоресурсів, а також скорочення попиту на енергію. У цьому

документі аналізуються впливи та компроміси різних технологічних рішень та політичних цілей для галузі, щоб відповідати цілям Паризької угоди. МЕА стверджує, що сталь є життєво важливою для сучасної економіки, і зазначає, що підтримання прогнозованого зростання попиту на сталь при одночасному зменшенні викидів CO<sub>2</sub> створює величезні проблеми. Хоча підвищення енергоефективності допоможе галузі, однак існує потреба в подальшому розвитку та розгортанні широкого портфеля проривних технологічних варіантів та інфраструктури, що дозволяє досягти довгострокового глибокого скорочення викидів CO<sub>2</sub>.

Одним з таких напрямків розвитку галузі може бути запровадження смарт-технологій на підприємствах галузі. Незважаючи на стратегічний характер даної галузі для національної економіки цей процес в Україні перебуває на початковому етапі. Тому, автори роботи [6] впевнені, що майбутній розвиток галузі в контексті Industrie 4.0 має великий потенціал у частині оптимізації виробничого процесу і передбачає самостійний обмін даними між «розумними» машинами, складськими системами і технологічним обладнанням.

Все описане вище вказує на необхідність розроблення методичного підходу до формування оптимальної стратегії підвищення рівня енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв.

#### **Матеріал і результати досліджень**

Для вирішення завдання формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв пропонується скористатись рекомендаціями, викладеними в ДСТУ ISO 50006 [16] та ДСТУ ISO 50047 [17].

Перш за все треба визначитись який підхід буде обрано для формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації. Це може бути підхід на основі цілей підприємства, або на основі запланованих заходів з енергоефективності. В першому випадку підприємство має встановити на певний період часу собі конкретну мету щодо підвищення енергоефективності та декарбонізації, яку планується досягти на завершення цього періоду. При цьому мета має встановлюватись з урахуванням критеріїв SMART (Specific (конкретна) – Measurable (вимірювана) – Achievable (досяжна) – Realistic (реалістична) – Timed (обмежена в часі)). Тобто має бути встановлено певні числові значення показників підвищення рівня енергоефективності та зниження рівня декарбонізації. В якості таких показників можуть застосовуватись: вимірне абсолютне значення енергоспоживання, питома значення енергоспоживання, статистична та проектна моделі енергоспоживання [16]. Більш детально з особливостями застосування тих чи інших показників енергоефективності можна ознайомитись в [18 - 20].

Для другого підходу підприємство має сформулювати набір заходів з енергоефективності, які будуть вважатись доцільними для реалізації в існуючих умовах діяльності підприємства. В якості таких заходів з підвищення енергоефективності можуть бути, наприклад [11]:

-*Виробництво чавуну в доменних печах*: вдування пилувугільного палива (середнього та високого рівня), застосування пароводяної конверсії природного газу в доменному виробництві, автоматика печі гарячого дуття, рекуператор на дуття.

-*Виробництво сталі*: застосування конвертерного газу і рекуперація тепла, регулятори швидкості приводів вентиляторів, виплавка сталі завдяки продувці рідкого чавуну киснем в конвертерах (хімічні реакції при цьому супроводжуються виділенням тепла) або за допомогою електричної дуги в дугових печах.

-*Загальні заходи*: профілактичне технічне обслуговування, системи енергетичного моніторингу та управління, частотні електроприводи регулювання швидкості димових газів, насоси та вентилятори, когенерація.

Крім заходів з енергоефективності, перелічених вище, на металургійних підприємствах також можуть застосовуватись і інші заходи, пов'язані з реалізацією НТД металургійних виробництв. Більш детально з характеристикою цих заходів можна ознайомитись, наприклад, в публікаціях [12 - 15].

В цьому випадку завдання формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв по суті можна розглядати як забезпечення мінімального (економічно обґрунтованого) енергоспоживання металургійним підприємством задля підвищення рівня енергоефективності підприємства та скорочення викидів CO<sub>2</sub> з урахуванням існуючих обмежень на фінансові, матеріально-технічні та трудові ресурси. У формальній математичній постановці це завдання може бути представлене наступною математичною моделлю:

цільова функція

$$Z = f(x_{ij}) = \sum_{j=1}^k (E_{\text{баз}j} - \sum_{i=1}^m e_{ij} \cdot x_{ij}) \rightarrow \min, (i = \overline{1, m}, j = \overline{1, k}) \quad (1)$$

обмеження на фінансові ресурси

$$\phi_1(x_{ij}) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m s_{ij} \cdot x_{ij} \leq S_0 \quad (2)$$

обмеження на матеріально-технічні ресурси

$$\phi_2(x_{ij}) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m r_{ij} \cdot x_{ij} \leq R_0 \quad (3)$$

обмеження на трудові ресурси

$$\phi_3(x_{ij}) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m t_{ij} \cdot x_{ij} \leq T_0 \quad (4)$$

обмеження на змінні

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (5)$$

обмеження на коефіцієнти

$$0 \leq s_{ij} \leq S_0, \quad 0 \leq t_{ij} \leq T_0, \quad 0 \leq r_{ij} \leq R_0, \quad (6)$$

де  $Z$  - цільова функція, що визначає величину енергоспоживання металургійним підприємством при реалізації певної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації;

$E_{\text{баз}j}$  - базовий рівень енергоспоживання на  $j$ -му об'єкті енергоспоживання металургійного підприємства;

$i$  - номер заходу з енергоефективності, який планується до реалізації в певній стратегії,  $i = \overline{1, m}$ ;

$j$  - номер об'єкта енергоспоживання, де планується до реалізації певний  $i$ -ий захід,  $j = \overline{1, k}$ ;

$x_{ij}$  - двійкова змінна, що приймає значення «1» у разі, якщо певний  $i$ -ий захід приймається до впровадження, і «0» - в іншому випадку;

$e_{ij}$  - обсяг енергозбереження, який планується отримувати від реалізації  $i$ -го заходу на  $j$ -му об'єкті енергоспоживання;

$s_{ij}$  - витрати фінансових ресурсів на реалізацію  $i$ -го заходу на  $j$ -му об'єкті енергоспоживання;

$r_{ij}$  - витрати матеріально-технічних та енергетичних ресурсів всіх видів на реалізацію  $i$ -го заходу на  $j$ -му об'єкті енергоспоживання;

$t_{ij}$  - трудовитрати на реалізацію  $i$ -го заходу на  $j$ -му об'єкті енергоспоживання.

За основу наведеної вище математичної моделі, було обрано математичну модель, запропоновано в [21]. Однак, в неї було внесено відповідні зміни з урахуванням положень стандарту ДСТУ ISO 50047 [17].

Завдання формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв (1)-(6) зводиться до прямого перебору всіх можливих комбінацій заходів, що технічно реалізуються, запропонованих за результатами проведення внутрішнього або зовнішнього енергоаудиту підприємства.

При прямому переборі різних комбінацій запропонованих для впровадження заходів можуть виникнути технічно несумісні заходи. Тому математичну модель (1)-(6) необхідно доповнити системою обмежень на допустимі поєднання заходів:

$$\sum_{i \in R_q}^m x_{ij} \leq 1, \quad q = \overline{1, Q}, \quad (7)$$

де  $R_q$  - безліч індексів заходів, що становлять  $q$  неприпустиме поєднання;

$Q$  - загальна кількість неприпустимих поєднань заходів.

Завдання формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв полягає у відшуванні невідомих  $x_{ij}$  ( $i = \overline{1, m}, j = \overline{1, k}$ ), таких, щоб значення цільової функції (1) було мінімальним при виконанні обмежень (2)-(7).

Описана модель відноситься до класу завдань лінійного програмування зі змінними, частина яких є булевими. У реальних ситуаціях, коли кількість заходів коливається в межах 10-20, при формуванні оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв вирішення цієї задачі можна здійснити за допомогою методу повного (прямого) перебору варіантів з використанням ЕОМ. При цьому кількість комбінацій заходів перебуватиме в межах 100000-150000, перебір яких не становить труднощів для сучасних ЕОМ.

Під час формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв на основі наведеної вище моделі слід враховувати вплив непрямих енергетичних ефектів, які можуть виникнути, якщо зменшення енергоспоживання внаслідок реалізації  $i$ -го заходу на  $j$ -му об'єкті енергоспоживання призводить до збільшення енергоспоживання енергії на інших об'єктах енергоспоживання.

Також, слід уникати ефектів подвійного підрахунку обсягу енергозбереження, які можуть виникати, якщо заходи з енергоефективності в одній частині системи енерговикористання зменшує загальну енергопотребу від інших заходів, вжитих в іншій частині системи. У таких випадках загальний очікуваний обсяг енергозбереження буде меншим, ніж сума обсягів енергозбереження, яка мала б бути, якщо б кожний захід було вжито окремо. Щоб уникнути подвійного підрахунку, можна зробити такі кроки, як це описано в ДСТУ ISO 50047 [19].

Якщо не існує адекватного способу уникнути подвійного підрахунку, то підсумовування неминучого подвійного підрахунку слід віднімати після підсумовування обсягів енергозбереження від всіх заходів.

Також, не завжди є економічно доцільним визначення обсягу енергозбереження від кожного  $i$ -го заходу на  $j$ -му об'єкті енергоспоживання (наприклад, якщо ці об'єкти подібні або їх частка енергоспоживання в загальному енергобалансі підприємства є несуттєвою). У таких випадках обсяг енергозбереження можна визначати на основі репрезентативної вибірки. Якщо дані з отриманої вибірки є



репрезентативними, то обсяг енергозбереження може бути екстрапольовано для отримання загального обсягу енергозбереження.

Для застосування наведених вище підходів необхідно обрати період часу, за який буде визначатись обсяг енергозбереження, встановити базовий рівень енергоспоживання, а також визначити обсяг енергозбереження.

Що стосується періоду часу, то доцільно його приймати рівним періоду дії базового рівня енергоспоживання. Цей період має відображати всі режими роботи об'єкта енергоспоживання і повинен охоплювати повний робочий або виробничий цикл від максимального споживання енергії до мінімуму на основі спостережуваних даних.

Для металургійних підприємств зазвичай доцільно використовувати тривалість такого періоду один рік. Однак, в окремих випадках, відповідно до рекомендацій ДСТУ ISO 50047 [19], цей період може бути:

- а) **менше одного року**, якщо споживання енергії носить сезонний характер;
- б) **більше одного року**: більш тривалі періоди часу, що перевищують один рік, можуть бути придатними, якщо не існує жодного року, який вважається типовим.

Далі треба вирішити питання визначення базового рівня енергоспоживання.

Якщо застосовано підхід на основі цілей підприємства, то можна використовувати єдиний базовий рівень енергоспоживання, що вимірює споживання енергії на рівні всього підприємства. Це дає змогу визначати обсяг енергозбереження від всієї сукупності заходів з енергоефективності разом. Якщо підприємство розділено на декілька виробничих майданчиків, то доцільно визначати базовий рівень енергоспоживання окремо для кожного виробничого майданчика.

Якщо підприємство під час формування своєї стратегії буде базуватись на основі запропонованих до реалізації заходів з енергоефективності, тоді необхідно встановлювати базовий рівень енергоспоживання окремо на кожному  $j$ -му об'єкті енергоспоживання металургійного підприємства, де планується реалізація  $i$ -го заходу. При цьому, базовий рівень енергоспоживання можна визначити використовуючи або фіксований період часу (зазвичай репрезентативний рік) або середнє значення за декілька періодів (якщо окремих періодів не є репрезентативним).

Протягом базового періоду на енергоспоживання можуть впливати визначальні змінні та статичні чинники. Для врахування змін у визначальних змінних застосовують унормування. Унормування застосовують так, щоб вплив аномальних значень визначальних змінних можна було вилучити з енергоспоживання для порівняння між базовим періодом та звітними періодами реалізації заходів з енергоефективності.

Для встановлення базового рівня енергоспоживання пропонується використовувати математичну модель лінійної регресії, яка має вигляд:

$$E = E_{b0} + b_1 v_1 + \dots + b_n v_n, \quad (8)$$

де  $v_1, v_2 \dots v_n$  – визначальні змінні;

$E_{b0}$  – енергоспоживання в базисній частині графіка навантаження або енергоспоживання, яке не пов'язане з визначальною змінною.

Розроблення моделі часто вимагає статистичного тестування (наприклад, за критерієм  $p$ -значення) і скринінгу для визначення того, які змінні треба враховувати.

Детально опис порядку визначення чинників, що впливають на енергоспоживання, описано в ДСТУ ISO 50047 [19] та в роботах [22, 23].

Для того, щоб модель відповідала споживанню енергії, мають використовуватися дані передісторії, які відображають типовий режим роботи підприємства. У більшості випадків в моделі застосовують помісячні дані (за 12 місяців), щоб забезпечити відображення сезонних коливань.

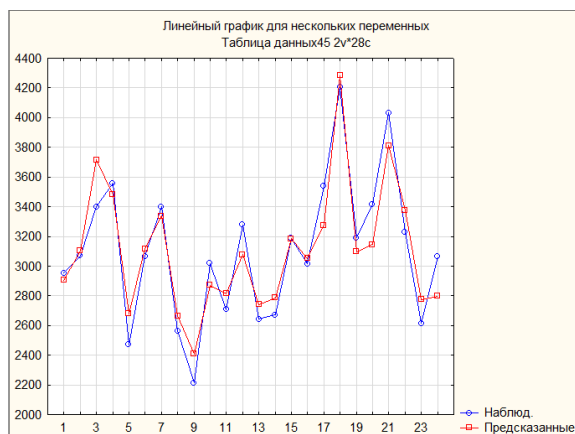
Однак, модель на основі регресійного аналізу може не працювати належним чином для нерегулярних періодів енергоспоживання. У випадку даних за місяць проблема календарної невідповідності виникає з таких причин:

- місяці різної тривалості, залежно від місяця і того, чи є цей рік високосним;
- тижні не співпадають точно з місяцями.

Дані, зібрані з більш частими інтервалами («інтервальні дані»), можуть допомогти підвищити точність моделі. Також, можна підвищити точність величини енергоспоживання, визначеного за допомогою регресійного аналізу, використовуючи добове або погодинне споживання енергії, добові обсяги виробництва та градусо-добі. Нижче показано, як приклад, результати застосування регресійної моделі прогнозування погодинного електроспоживання цеху металургійного виробництва (див. рис.).

Оцінку точності моделей було виконано за допомогою середньо-квадратичної (RMSE) та відносної  $\delta$  (%) похибки прогнозу відносно фактичних значень.

Регресійний аналіз для побудови відповідних математичних моделей можна виконувати як із залученням надбудови «Аналіз даних» в MS Excel, так і з залученням інших програмних продуктів для виконання статистичного аналізу даних (наприклад, STATISTICA).



а)



б)

Рисунок - Результати застосування регресійної моделі прогнозування погодинного електроспоживання цеху металургійного виробництва: а) - стандартна процедура; б) покрокова процедура.

Також, для цих потреб можуть залучатись спеціалізовані надбудови в MS Excel, які вже розроблені для побудови саме регресійних моделей енергоспоживання та визначення показників енергоефективності. Сюди можна, наприклад, віднести інструменти енергоменеджера, представлені на сайті Міненерго США [22] Energy Performance Indicator (EnPI), Manufacturing Energy Assessment Software for Utility Reduction (MEASUR), а також Energy Bill Tracker Tool - Energy Performance Indicators, запропонований SEAI [23]. Також для нашого завдання може бути цікавим для застосування інструмент «Decarbonization Action Plan Tool», який доступний для вільного використання на сайті Міненерго США [22].

Крім моделей на основі регресійного аналізу, можуть застосовуватись і інші математичні методи та моделі прогнозування. Наприклад, метод простого експоненційного згладжування, моделі, що включають сезонну компоненту і тренд, нейронні мережі тощо.

### Висновки.

1. Результати аналізу існуючої ситуації металургійній галузі України, показали, що збільшення виробництва сирової сталі є найважливішим чинником, який призводить до суттєвого збільшення загального споживання енергії та викидів в навколишнє середовище в металургійній промисловості. Для оптимальної реалізації наявного потенціалу енергозбереження та скорочення викидів CO<sub>2</sub> необхідно планувати цю діяльність на рівні окремих підприємств.

2. Запропоновано методичний підхід щодо формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв, в якому, поряд з описом математичної моделі, приділено питанню побудови базового рівня енергоспоживання з урахуванням положень найсучасніших міжнародних стандартів у сфері енергоменеджменту, а також чинників, що впливають на енергоспоживання.

3. Завдання формування оптимальної стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв зводиться до прямого перебору всіх можливих комбінацій заходів щодо підвищення енергоефективності, запропонованих за результатами проведення енергетичного аудиту підприємства. Використання запропонованого підходу дає можливість мати ефективний інструмент розробки управлінських рішень щодо планування підвищення енергоефективності та декарбонізації металургійних виробництв. З його допомогою можуть бути змодельовані різні варіанти стратегії підвищення енергоефективності та декарбонізації, що забезпечують найбільше економічно обґрунтоване використання наявного потенціалу енергозбереження та скорочення викидів CO<sub>2</sub> та обранні найбільш ефективної з них.

### Список використаної літератури

1. Большаков В. І. Чорна металургія і національна безпека України / В. І. Большаков, Л. Г. Тубольцев // Вісник НАН України. – 2014. – № 9. – С. 48-58.
2. Найвищий обсяг експорту України у 2021 році - продукція металургії та аграрного сектору: [електронний ресурс]: Сайт Офісу з розвитку підприємництва та експорту. – режим доступу: [https://export.gov.ua/news/3617-naivishchii\\_obsyag\\_eksportu\\_ukraini\\_u\\_2021\\_rotsi\\_-\\_produktstia\\_metalurgii\\_ta\\_agrarnogo\\_sektoru](https://export.gov.ua/news/3617-naivishchii_obsyag_eksportu_ukraini_u_2021_rotsi_-_produktstia_metalurgii_ta_agrarnogo_sektoru). – Назва з екрана.

3. December 2021 crude steel production and 2021 global crude steel production totals: [електронний ресурс]: Сайт The World Steel Association (worldsteel). – режим доступу: <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2022/december-2021-crude-steel-production-and-2021-global-totals/>. – Назва з екрана.
4. Стан української металургії під час війни: [електронний ресурс]. – режим доступу: <https://ukraineinvest.gov.ua/uk/news/22-06-22-3/>. – Назва з екрана.
5. IEA (2021), Driving Energy Efficiency in Heavy Industries, IEA, Paris <https://www.iea.org/articles/driving-energy-efficiency-in-heavy-industries>.
6. Амоша О.І., Нікіфорова В.А. Розвиток металургійної смарт-промисловості в Україні: передумови, проблеми, особливості, наслідки: науково-аналітична доповідь; НАН України, Ін-т економіки пром-сті. Київ, 2019. – 67 с.
7. Українські бруктозаготівельники готуються до перероблення військової техніки: [електронний ресурс]: – режим доступу: <https://gmcenter.ua/news/ukrainski-brukhtozahotivelniky-hotuiutsia-dopreroblennia-vijskovo-tehniky/>. – Назва з екрана.
8. Sun, Wenqiang & Wang, Qiang & Zhou, Yue & Wu, Jianzhong. (2020). Material and Energy Flows of the Iron and Steel Industry: Status Quo, Challenges and Perspectives. Applied Energy. 268. 114946. 10.1016/j.apenergy.2020.114946. Available online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192030458X> (accessed on 20 May 2022).
9. Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Remus, R., Roudier, S., Delgado Sancho, L., et al., Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production: industrial emissions Directive 2010/75/EU : integrated pollution prevention and control, Publications Office, 2013, Available online: <https://data.europa.eu/doi/10.2791/97469> (accessed on 20 May 2022).
10. World Steel Association. Steel's Contribution to A Low Carbon Future and Climate Resilient Societies—World Steel Position Paper; World Steel Association: Brussels, Belgium, 2020; ISBN 978-2-930069-83-8. Available online: [https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7ec64bc1-c51c-439b-84b8-94496686b8c6/Position\\_paper\\_climate\\_2020\\_vfinal.pdf](https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7ec64bc1-c51c-439b-84b8-94496686b8c6/Position_paper_climate_2020_vfinal.pdf) (accessed on 20 May 2022).
11. Hargroves, K., Gockowiak, K., McKeague, F., and Desha, C. (2014) An Overview of Energy Efficiency Opportunities in Mining and Metallurgy Engineering, The University of Adelaide and Queensland University of Technology (The Natural Edge Project), commissioned by the Australian Government Department of Industry, Canberra.
12. Remus R, Aguado Monsonet M, Roudier S, Delgado Sancho L. Best Available Techniques (BAT) Reference Document: for Iron and Steel Production: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU: (Integrated Pollution Prevention and Control). EUR 25521 EN. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2012. JRC69967.
13. Holappa, L. (2020). A general vision for reduction of energy consumption and CO2 emissions from the steel industry. Metals, 10(9), 1-20. [1117]. <https://doi.org/10.3390/met10091117>.
14. Flues, Florens, Dirk Rübhelke and Stefan Vögele (2013), Energy Efficiency and Industrial Output: The Case of the Iron and Steel Industry, ZEW Discussion Paper No. 13-101, Mannheim. Available online: <http://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp13101.pdf> (accessed on 20 May 2022).
15. IEA, Iron and Steel Technology Roadmap, October 2020. Available online: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>. (accessed on 20 May 2022).
16. Системи енергетичного менеджменту. Вимірювання рівня досягнутої енергоефективності з використанням базових рівнів енергоспоживання та показників енергоефективності. Загальні положення і настанова: ISO 50006:2014, IDT — ДСТУ ISO 50006:2016. — [Чинний від 2016-04-29]. — К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. — 56 с. — (Національні стандарти України).
17. Енергозбереження. Визначення обсягів енергозбереження в організаціях: ISO 50047:2016, IDT - ДСТУ ISO 50047:2020. [Чинний від 2020-09-15]. — К.: ДП УкрНДНЦ, 2020. — 37 с. — (Національні стандарти України).
18. Практичний посібник з енергетичного аудиту промислових підприємств/ А. Чернявський, А. Сафьянц, Н. Усенко, О. Соловей, О. Бориченко, П. Пертко, Ю. Шишко, А. Гоєнко// За загальною редакцією Н. Усенко та А. Чернявського. – К.: Проект «Консультування підприємств щодо енергоефективності» Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH за дорученням Федерального міністерства економічного співробітництва та розвитку Німеччини (BMZ), 2020. – 280 с.
19. Керівництво з впровадження системи енергетичного менеджменту відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 50001:2018/ А. Чернявський, Є. Іншеков, О. Соловей, О. Бориченко, П. Пертко // За загальною редакцією Є. Іншекова, А. Чернявського. - К.: Проект UNIDO/GEF «Впровадження стандарту систем енергоменеджменту в промисловості України», 2021. – 137 с.
20. Fazeli, Alireza & Bakhtvar, Farzaneh & Jahanshaloo, Leila & Che Sidik, Nor Azwadi. (2014). Efficiency benchmarking of the iron and steel industry via the benchmark curve: A review. Advanced Review on Scientific Research. 2. 19-40.

21. Планирование оптимального использования потенциала энергосбережения промышленных предприятий Украины / В.П. Розен, А.И. Соловей, А.В. Чернявский, М.А. Казмирук // Технічна електродинаміка. 2006. №5. – С.59-68.

22. Software Tools: Website of US Department of Energy: URL: <https://www.energy.gov/eere/amo/software-tools>.

23. Website of Ireland's national sustainable energy authority: URL: <https://www.seai.ie/tools/>.

**V. Nakhodov**, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-7643-5965  
**O. Borychenko**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-6127-2945  
**A. Cherniavskiy**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2858-8224  
**National Technical University of Ukraine**  
**«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

### **FORMATION OF A STRATEGY FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF METALLURGICAL ENTERPRISES AS GUARANTEE OF DECARBONIZATION OF THE UKRAINIAN ECONOMY**

*The metallurgical industry of Ukraine in wartime faced significant difficulties in its functioning. However, at the moment there is a gradual recovery of the industry. It should be noted that steel production is an extremely energy-intensive process, accounting for the second largest share of energy consumption and the largest share of CO<sub>2</sub> emissions. Therefore, in order to control the growth of energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in this industry, as well as to be competitive in the international market, Ukrainian metallurgical enterprises should not only expect maximum assistance from the government bodies and international partners in matters of logistics and sales markets, but also focus on energy efficiency issues and decarbonization of their production. While improving the energy efficiency of steel production through the introduction of standard energy efficiency measures will help the industry, there is a need to further develop and deploy a wide portfolio of breakthrough solutions to improve processes and infrastructure. This will achieve long-term deep reductions in CO<sub>2</sub> emissions. For this activity to be purposeful rather than chaotic, individual enterprises and the industry must develop a strategy to increase energy efficiency and decarbonize their production. This article is devoted to one of the possible approaches to solving this issue. Along with a description of the mathematical model for the formation of an optimal strategy for improving energy efficiency and decarbonization of metallurgical industries, the article presents the structure of energy costs, as well as the list of significant energy usages at metallurgical enterprises. In addition, a separate place in the article is given to the issue of building an energy baseline, taking into account the provisions of modern international standards in the field of energy management system (ISO 50001, ISO 50006, ISO 50047), as well as the main factors affecting energy consumption. The paper also presents the list of typical measures for improving the energy efficiency of metallurgical enterprises for each group of significant energy usages.*

**Keywords:** decarbonization, energy baseline, energy efficiency, energy efficiency improvements, energy management system, metallurgical enterprise, optimal strategy.

### **References**

1. Bolshakov V. I. Chorna metalurhiia i natsionalna bezpeka Ukrainy / V. I. Bolshakov, L. H. Tuboltsev // Visnyk NAN Ukrainy. – 2014. – № 9. – С. 48-58.
2. Naivyschchiy obsiah eksportu Ukrainy u 2021 rotsi - produktsiia metalurhii ta aharnoho sektoru: [elektronnyi resurs]: Sait Ofisu z rozvytku pidpriemnytstva ta eksportu. – rezhym dostupu: [https://export.gov.ua/news/3617-naivishchii\\_obsiah\\_eksportu\\_ukraini\\_u\\_2021\\_rotsi\\_-\\_produktsiia\\_metalurgii\\_ta\\_agrarnogo\\_sektoru](https://export.gov.ua/news/3617-naivishchii_obsiah_eksportu_ukraini_u_2021_rotsi_-_produktsiia_metalurgii_ta_agrarnogo_sektoru). – Nazva z ekrana.
3. December 2021 crude steel production and 2021 global crude steel production totals: [електронний ресурс]: Сайт The World Steel Association (worldsteel). – режим доступу: <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2022/december-2021-crude-steel-production-and-2021-global-totals/>. – Назва з екрана.
4. Stan ukrainskoi metalurhii pid chas viiny: [elektronnyi resurs]. – rezhym dostupu: <https://ukraineinvest.gov.ua/uk/news/22-06-22-3/>. – Nazva z ekrana.
5. IEA (2021), Driving Energy Efficiency in Heavy Industries, IEA, Paris <https://www.iea.org/articles/driving-energy-efficiency-in-heavy-industries>.
6. Amosha O.I., Nikiforova V.A. Rozvytok metalurhiinoi smart-promyslovosti v Ukraini: peredumovy, problemy, osoblyvosti, naslidky: naukovo-analitychna dopovid; NAN Ukrainy, In-t ekonomiky prom-sti. Kyiv, 2019. - 67 c.

7. Ukrainski brukhtozahotivelnky hotuiutsia do pereroblennia viiskovoi tekhniki: [elektronnyi resurs]: – rezhyim dostupu: <https://gmk.center.ua/news/ukrainski-brukhtozahotivelnky-hotuiutsia-do-pereroblennia-viiskovoi-tekhniki/>. – Nazva z ekrana.
8. Sun, Wenqiang & Wang, Qiang & Zhou, Yue & Wu, Jianzhong. (2020). Material and Energy Flows of the Iron and Steel Industry: Status Quo, Challenges and Perspectives. *Applied Energy*. 268. 114946. 10.1016/j.apenergy.2020.114946. Available online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192030458X> (accessed on 20 May 2022).
9. Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Remus, R., Roudier, S., Delgado Sancho, L., et al., Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production: industrial emissions Directive 2010/75/EU : integrated pollution prevention and control, Publications Office, 2013, Available online: <https://data.europa.eu/doi/10.2791/97469> (accessed on 20 May 2022).
10. World Steel Association. Steel's Contribution to A Low Carbon Future and Climate Resilient Societies—World Steel Position Paper; World Steel Association: Brussels, Belgium, 2020; ISBN 978-2-930069-83-8. Available online: [https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7ec64bc1-c51c-439b-84b8-94496686b8c6/Position\\_paper\\_climate\\_2020\\_vfinal.pdf](https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7ec64bc1-c51c-439b-84b8-94496686b8c6/Position_paper_climate_2020_vfinal.pdf) (accessed on 20 May 2022).
11. Hargroves, K., Gockowiak, K., McKeague, F., and Desha, C. (2014) An Overview of Energy Efficiency Opportunities in Mining and Metallurgy Engineering, The University of Adelaide and Queensland University of Technology (The Natural Edge Project), commissioned by the Australian Government Department of Industry, Canberra.
12. Remus R, Aguado Monsonet M, Roudier S, Delgado Sancho L. Best Available Techniques (BAT) Reference Document: for Iron and Steel Production: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU: (Integrated Pollution Prevention and Control). EUR 25521 EN. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2012. JRC69967.
13. Holappa, L. (2020). A general vision for reduction of energy consumption and CO2 emissions from the steel industry. *Metals*, 10(9), 1-20. [1117]. <https://doi.org/10.3390/met10091117>.
14. Flues, Florens, Dirk Rübbelke and Stefan Vögele (2013), Energy Efficiency and Industrial Output: The Case of the Iron and Steel Industry, ZEW Discussion Paper No. 13-101, Mannheim. Available online: <http://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp13101.pdf> (accessed on 20 May 2022).
15. IEA, Iron and Steel Technology Roadmap, October 2020. Available online: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>. (accessed on 20 May 2022).
16. Systemy enerhetychnoho menedzhmentu. Vymiruvannya rivnia dosiahnutoi enerhoefektyvnosti z vykorystanniam bazovykh rivniv enerhospozhyvannia ta pokaznykiv enerhoefektyvnosti. Zahalni polozhennia i nastanova: ISO 50006:2014, IDT — DSTU ISO 50006:2016. — [Chynnyi vid 2016-04-29]. — K.: DP «UkrNDNTs», 2016. — 56 s. — (Natsionalni standarty Ukrainy).
17. Enerhozberezhennia. Vyznachennia obsiahiv enerhozberezhennia v orhanizatsiiakh: ISO 50047:2016, IDT — DSTU ISO 50047:2020. [Chynnyi vid 2020-09-15]. — K.: DP UkrNDNTs, 2020. — 37 s. — (Natsionalni standarty Ukrainy).
18. Praktychnyi posibnyk z enerhetychnoho audytu promyslovykh pidpriemstv/ A. Cherniavskiy, A. Safiants, N. Usenko, O. Solovei, O. Borychenko, P. Pertko, Yu. Shyshko, A. Hoienko// Za zahalnoi redaktsiiei N. Usenko ta A. Cherniavskoho. — K.: Proekt «Konsultuvannya pidpriemstv shchodo enerhoefektyvnosti» Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH za doruchenniam Federalnoho ministerstva ekonomichnoho spivrobitnytstva ta rozvytku Nimechchyny (BMZ), 2020. — 280 s.
19. Kerivnytstvo z vprovadzhennia systemy enerhetychnoho menedzhmentu vidpovidno do vymoh mizhnarodnoho standartu ISO 50001:2018/ A. Cherniavskiy, Ye. Inshekov, O. Solovei, O. Borychenko, P. Pertko // Za zahalnoi redaktsiiei Ye. Insheкова, A. Cherniavskoho. - K.: Proekt UNIDO/GEF «Vprovadzhennia standartu system enerhomenedzhmentu v promyslovosti Ukrainy», 2021. — 137 s.
20. Fazeli, Alireza & Bakhtvar, Farzaneh & Jahanshaloo, Leila & Che Sidik, Nor Azwadi. (2014). Efficiency benchmarking of the iron and steel industry via the benchmark curve: A review. *Advanced Review on Scientific Research*. 2. 19-40.
21. Planirovanie optimalnogo ispolzovaniya potentsiala energosberezheniya promyshlennykh predpriyatiy Ukrainy / V.P. Rozen, A.I. Solovey, A.V. Chernyavskiy, M.A. Kazmiruk // *Tekhnichna elektrodinamika*. 2006. #5. — S.59-68.
22. Software Tools: Website of US Department of Energy: URL: <https://www.energy.gov/eere/amo/software-tools>.
23. Website of Ireland's national sustainable energy authority: URL: <https://www.seai.ie/tools/>.

Надійшла 29.05.2022

Received 29.05.2022

# ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.314

DOI 10.20535/1813-5420.2.2022.261371

Н.В. Беленок, ст. викладач, ORCID 0000-0003-4242-5536

В.І. Чибеліс, канд. тех. наук, доц., ORCID 0000-0003-2235-9826

Л.Ю. Спінул, канд. тех. наук, доц., ORCID 0000-0002-4234-6072

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## БІКОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ІНВАРІАНТНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

У роботі розглядається бікомплексне обчислення для розрахунку інваріантних систем електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Сучасні системи електропостачання на основі ВДЕ є нелінійними системами, в яких мають місце складні перехідні процеси та можливе виникнення критичних та хаотичних режимів. Вивчення структур гіперчислових систем, їхніх особливостей, методів обчислення й апроксимації елементарних функцій гіперкомплексної змінної дає змогу ефективно застосовувати такі системи при математичному моделюванні інваріантних систем електропостачання на основі ВДЕ. У деяких випадках застосування гіперчислових систем дає змогу замінити вихідну задачу еквівалентною, тобто побудувати бікомплексну модель розв'язку.

У якості вихідної системи було розглянуто систему комплексних чисел. При рекурентному подвоєнні системи отримані гіперчислові системи різних розмірностей з різними властивостями, що дало змогу присвоєння різних значень добуткам уявних одиниць. Доведено, що введення додаткових умов комутативності та асоціативності, що поширюються на дійсні числа та уявні одиниці, дає змогу конкретизувати вибір гіперчислової системи.

При аналізі нестационарних процесів інваріантних систем та дослідженні можливостей гіперчислових систем обґрунтовано доцільність вибору бікомплексного методу розрахунку при математичному моделюванні систем з багаторазовою модуляцією. Метод бікомплексного представлення передбачає пряме та зворотне бікомплексне перетворення, яке дозволяє отримати аналітично повне рішення щодо аналізу інваріантної системи електропостачання на основі ВДЕ. Розглянуто приклади використання бікомплексного інтегрального перетворення для аналізу систем із багатократною модуляцією, запропоновано застосування апарата гіперкомплексного числення для перетворення систем диференціальних рівнянь з метою їх спрощення або стиснення в одне рівняння. Показано, що використання гіперкомплексного числення дає змогу істотно зменшити обсяги оброблюваної інформації без зниження інформативності математичної моделі.

Запропоноване формулювання завдань у гіперкомплексному поданні дозволило здійснити стиснення оброблюваної інформації та отримати компактний вираз для вихідного сигналу.

**Ключові слова:** інваріантні системи, гіперкомплексні числові системи, бікомплексне обчислення, відновлювальні джерела енергії.

**Вступ.** Бурхливе зростання ринку систем, що використовують відновлювані джерела енергії на перший план висувають проблему підвищення системної енергоефективності «джерело енергії – навантаження». Це є важливим як при безпосередньому зв'язку джерел електроживлення зі споживачами, так і при використанні вторинних джерел електроживлення.

Внаслідок об'єднання різнотипних відновлюваних джерел енергії у автономну електричну систему виникає як проблема керування їх сумісною роботою, так і забезпечення максимальної ефективності перетворення первинної енергії.

Зокрема, гармонійні спотворення є однією з найголовніших проблем, які необхідно мати на увазі при збільшенні числа ВДЕ. Для розв'язання таких завдань необхідно оперативно враховувати зміни параметрів навколишнього середовища, режими електроспоживання тощо.

Вивчення структур гіперчислових систем (ГЧС), їх особливостей, методів обчислення та апроксимації елементарних функцій гіперкомплексної змінної дає можливість застосування таких систем для аналізу та розрахунку параметрів перетворювальних пристроїв з багатократною модуляцією при використанні у автономних об'єктах (АО) відновлюваної енергетики. У деяких випадках застосування ГЧС дає змогу замінити вихідну задачу еквівалентною, тобто побудувати квазіаналогову модель



розв'язку [1-7].

Для ефективного моделювання розв'язку задач, що стосуються перетворювальних пристроїв для використання у відновлюваних джерелах енергії (ВДЕ), у гіперкомплексній числовій системі необхідно знати дійсний вигляд функцій у цій системі, тобто вигляд складових функцій гіперкомплексної змінної.

**Короткий огляд публікацій по темі.** На сьогодні відома достатньо велика кількість робіт, присвячених розробці та використанню відновлюваних джерел енергії. Слід відзначити роботи Шидловського А.К., Кириленко О.В., Пивняка Г.Г., Кудрі С.О., Резцова В.Ф., Васько П.Ф., Гаєвського О.Ю, Головка В.М., Бекірова Є.А., Мхітаряна Н.М., Бьюб Р., Твайделла Д., Фаренбруха А.

**Мета дослідження** полягає у розвитку теорії побудови інваріантних систем електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії; створення на її принципах багатофункціональних перетворювальних пристроїв автономних об'єктів і бікомплексний розрахунок алгоритмів керування ними, що забезпечують високу якість вихідної електроенергії в умовах дії впливових збурень.

**Матеріали та методи.** Стаття ґрунтується на публікаціях, де розглянуті гіперкомплексні системи числення, в тому числі бікомплексне перетворення. Застосовуються методи аналізу та розрахунку вихідного сигналу.

**Виклад основного матеріалу.** Відсутність єдиного теоретичного й методологічного підходу до аналізу інваріантних систем електропостачання із заданими характеристиками функціонування значно ускладнює завдання їхньої розробки. Використання теорії інваріантності при побудові систем модуляційного типу ускладнюється нелінійністю дискретних систем автоматичного керування, якими є сучасні системи електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії.

При розв'язанні цілого ряду практичних завдань поряд з комплексними числами широко застосовуються числові системи з кількома уявними одиницями, так звані гіперкомплексні числові системи. Це обумовлено тим, що формулювання завдань у гіперкомплексному поданні досить перспективне з погляду більш раціонального розв'язування деяких алгебраїчних і диференціальних рівнянь і систем, оскільки дає змогу здійснити стискання оброблюваної інформації й одержати інформаційно повний розв'язок. Крім того, формування математичної моделі об'єкта з використанням гіперкомплексних чисел забезпечує більш адекватний опис досліджуваного процесу.

Вихідною числовою системою для узагальнення є відома система комплексних чисел. Таке узагальнення може здійснюватися, принаймні, у двох напрямках:

- за допомогою рекурентної процедури подвоєння системи комплексних чисел;
- за допомогою аксіоматичного визначення ГЧС.

У такий спосіб можуть бути отримані ГЧС різних розмірностей з різними властивостями, що обумовлено можливістю присвоєння різних значень добуткам уявних одиниць.

Залежно від співвідношень між структурними константами ГЧС може бути комутативна

$$\gamma_{ke}^j = \gamma_{ek}^j,$$

тобто структурні константи симетричні щодо головної діагоналі таблиці закону композиції. Якщо

$$\sum_{m=1}^n \gamma_{ke}^m \gamma_{mt}^p = \sum_{m=1}^n \gamma_{et}^m \gamma_{km}^p,$$

то ГЧС є асоціативною.

При цьому комутативність й асоціативність поширюються як на уявні одиниці, так і на дійсні числа ГЧС. Набір уявних одиниць конкретної ГЧС називається *базисом* ГЧС:

$$I = (i_1, i_2, \dots, i_n).$$

Розглянемо інший базис  $I = (j_1, j_2, \dots, j_n)$ . Якщо існує таке лінійне невиворжене перетворення  $A$ , що перетворить базис  $I$  у базис  $J$ , тобто  $I = A \cdot J$ ,  $|A| \neq 0$ , такі ГЧС називаються *ізоморфними*. Ізоморфні ГЧС мають однакові теоретико-числові властивості. Однією з основних властивостей дійсних чисел є відсутність дільників нуля, тобто з рівності  $a \cdot b = 0$  треба, щоб або  $a = 0$ , або  $b = 0$ , або  $a = b = 0$ . Однак більшість ГЧС таких властивостей не має, тобто може виконуватися рівність  $a \cdot b = 0$  при  $a \neq 0$ ,  $b \neq 0$ , а ГЧС має дільники нуля.

Наприклад, система комплексних чисел – комутативно-асоціативна система другого порядку без дільників нуля, закон композиції якої представлено табл.1. Крім комплексних чисел до ГЧС другого порядку належать системи дуальних і подвійних чисел [3].

Таблиця 1. Закон композиції системи комплексних чисел

	1	$i$
1	1	$i$
$i$	$i$	-1



Розглянемо більш детально вираз для комутаційної функції, що зводиться до вигляду

$$C e^{i\alpha} e^{j\beta} = C(\cos\alpha + i\sin\alpha)(\cos\beta + j\sin\beta) = C \cos\alpha \cos\beta + jC \cos\alpha \sin\beta + iC \sin\alpha \cos\beta + jiC \sin\alpha \sin\beta = a + i_1 b + i_2 c + i_3 d.$$

У результаті отримано гіперкомплексне число четвертого порядку. Однак кількість класів ізоморфізмів ГЧС четвертого порядку досить велика (квадриплексні числа, комплекс Клейна, кватерніони), тому для вибору ГЧС необхідна постановка додаткових умов [3]. Такими умовами, вочевидь, можуть бути комутативність й асоціативність ГЧС.

Алгоритми координатно-параметричного керування в інваріантних перетворювальних системах спричинили серйозні труднощі при аналізі нестационарних процесів у пристроях із багаторазовою модуляцією, що працюють з ВДЕ. З метою вирішення даного завдання, вибір ГЧС зводиться до бікомплексних чисел, за аналогією з класичним комплексним числом, яке має алгебраїчну конструкцію вигляду

$$z = x_1 + ix_2 + jx_3 + kx_4 = \sum_{m=1}^4 e_m x_m \quad (1)$$

де  $(x_1, x_2, x_3, x_4)^T \in R^4$  – точка евклідового простору. У табл.2 наведено множення Келі базисних елементів цієї групи.

Таблиця 2. множення Келі

$e_m \backslash e_m$	1	$i$	$j$	$k$
1	1	$i$	$j$	$k$
$i$	$i$	-1	$k$	$-j$
$j$	$j$	$k$	-1	$-i$
$k$	$k$	$-j$	$-i$	1

Координати точки вихідного евклідового простору, тобто дійсні множники при  $1, i, j, k$ , назовемо «компонентами» бікомплексу. Отже, прийнята у визначенні таблиця відрізняється від відповідної таблиці для кватерніонів (гіперкомплексних чисел) тим, що у цьому випадку множення комутативне.

Зазначимо, що  $i_1, i_2$  – уявні одиниці, для яких  $i_1^2 = i_2^2 = -1$ , однак  $i_1 \neq \pm i_2$ , а  $i_3 = i_1 \cdot i_2$ , причому  $i_3^2 = 1$ ,  $i_3 \neq \pm 1$ . Бікомплексні числа можуть бути отримані комутативним подвоєнням поля комплексних чисел комплексними числами.

Необхідне введення умов додавання й множення двох бікомплексів. Сумою двох бікомплексів  $a$  і  $b$  називається бікомплексне число, отримане за правилом покомпонентного додавання:

$$(a = a_1 + ia_2 + ja_3 + ka_4) + (b = b_1 + ib_2 + jb_3 + kb_4) \Rightarrow \\ \Rightarrow a + b = (a_1 + b_1) + i(a_2 + b_2) + j(a_3 + b_3) + k(a_4 + b_4).$$

Добутком двох бікомплексів  $a$  і  $b$  називається бікомплексне число, отримане за правилом, що впливає з таблиці Келі для елементів Р-групи:

$$(a = a_1 + ia_2 + ja_3 + ka_4) \cdot (b = b_1 + ib_2 + jb_3 + kb_4) \Rightarrow \\ \Rightarrow ab = (a_1b_1 - a_2b_2 - a_3b_3 + a_4b_4) + i(a_2b_1 + a_1b_2 - a_4b_3 - a_3b_4) + \\ + j(a_3b_1 - a_4b_2 + a_1b_3 - a_2b_4) + k(a_4b_1 + a_3b_2 + a_2b_3 + a_1b_4).$$

Сукупність різних бікомплексів (утворююча комутативне кільце з одиницею щодо операцій додавання й множення) є «бікомплексним простором».

Користуючись алгеброю бікомплексного перетворення, розглянемо додаток ГЧС до дослідження перетворювальних пристроїв із багатократною модуляцією для інваріантних систем на основі ВДЕ.

З точки зору виконання умов інваріантності, доведено, що єдиним варіантом створення структурно-інваріантної перетворювальної системи є послідовне з'єднання модулятора та демодулятора у силовому тракту. Система на основі інформації про вхідну, вихідну напругу та збурюючі впливи, формує комутаційну функцію  $\bar{Q}(t)$ . Для отримання комутаційної функції  $\bar{Q}(t)$  скористаємося формулою Ейлера та приведемо тригонометричний ряд Фур'є до комплексної форми

$$\bar{Q}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_{(2k-1)} \cdot e^{j(2k-1)\omega t} / \sum_{n=1}^{\infty} C_{(2n-1)} \cdot e^{i(2n-1)\Omega t} \quad (2)$$

де  $i, j$  – різні уявні одиниці, що відповідають різним частотам  $\Omega$  і  $\omega$ . Таким чином, комутаційна функція в загальному вигляді може бути представлена добутком двох різних за частотою функцій:

$$\bar{Q}(t) = a(\omega t) \cdot b(\Omega t) \quad (3)$$

Здійснивши комплексне перетворення для складових функцій виразу (3), одержимо

$$\left. \begin{aligned} a(t) &\doteq \dot{A}_m = a_m \cos \alpha_m + ia_m \sin \alpha_m \\ b(t) &\doteq \dot{B}_k = b_k \cos \beta_k + jb_k \sin \beta_k, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де  $m, k$  – номери гармоніки для  $\omega$  і  $\Omega$ ;  $i, j$  – різні уявні одиниці, що відповідають різним частотам  $\omega$  і  $\Omega$ ;

$$\left. \begin{aligned} a_m \sin \alpha_m &= \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi} a(t) \cos m \omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} a(\varphi/\omega) \cos m \varphi d\varphi; \\ a_m \cos \alpha_m &= \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi} a(t) \sin m \omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} a(\varphi/\omega) \sin m \varphi d\varphi; \\ b_k \sin \beta_k &= \frac{\Omega}{\pi} \int_0^{2\pi} b(t) \cos k \Omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} b(\lambda/\Omega) \cos k \lambda d\lambda; \\ b_k \cos \beta_k &= \frac{\Omega}{\pi} \int_0^{2\pi} b(t) \sin k \Omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} b(\lambda/\Omega) \sin k \lambda d\lambda, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

при чому  $\varphi = \omega t, \lambda = \Omega t$ .

Підставивши вирази (5) в (4), після перемноження  $\dot{A}_k$  та  $\dot{B}_k$  з урахуванням формули Ейлера одержимо інтегральне перетворення, яке назвемо бікомплексним перетворенням:

$$Q_{mk} = \dot{A}_m \dot{B}_k = \frac{1}{\pi^2} i j \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} a(\varphi/\omega) \times b(\lambda/\Omega) e^{-im\varphi} e^{-jk\lambda} d\varphi d\lambda \quad (6)$$

Отримане перетворення є прямим бікомплексним перетворенням.

Обернене бікомплексне перетворення введемо таким чином:

$$Q(t) = Q(\varphi/\omega, \lambda/\Omega) = \frac{1}{4ij} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{Q}_{mk} e^{im\varphi} e^{jk\lambda} \quad (7)$$

З урахуванням виразу (6) отримаємо повне бікомплексне перетворення в інтегральній формі:

$$Q(t) = \frac{1}{4\pi^2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{im\varphi + jk\lambda} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} a(\varphi/\omega) \times b(\lambda/\Omega) e^{-im\varphi} e^{-jk\lambda} d\varphi d\lambda \quad (8)$$

Бікомплексне перетворення позначимо оператором  $\Gamma_{m,k}[Q(t)] = \dot{Q}_{mk}$  або  $\dot{Q}_{mk} \doteq Q(t)$ , тобто вводимо поняття оригіналу й зображення бікомплексної функції.

Зазначимо, що з урахуванням викладеного, відоме комплексне перетворення є частковим випадком бікомплексного, оскільки при постійних  $a(t)$  або  $b(t)$ , коли  $m = 0$  або  $k = 0$ , введені інтегральні перетворення (6) – (8) стають рівними з точністю до постійних співмножників  $2i$  або  $2j$  відомим виразам комплексного перетворення періодичних функцій [1].

Користуючись основними правилами алгебри бікомплексного перетворення та бікомплексними зображеннями векторних функцій, зображення  $C e^{i\alpha} e^{j\beta}$  назвемо бікомплексною амплітудою гіпергармонічної функції  $C \sin(\omega t + \alpha) \sin(\Omega t + \beta)$ , а величину  $i\omega + j\Omega = \omega_0$  – бікомплексною узагальненою частотою. Роль цих величин при дослідженні систем з багатократною модуляцією аналогічна ролі комплексних амплітуди й частоти при розрахунку електричних кіл з гармонічними напругами й струмами однієї частоти.

Аналогічні поняття вводяться й для  $m, k$  – гіпергармонічної складової функції  $Q(t)$ .

Геометричну інтерпретацію гіпергармонічної функції можна ввести вектором  $\vec{C}$ , що обертається з кутовою швидкістю  $\Omega$  у системі координат  $X_1 O Y_1$ , яка у свою чергу обертається з кутовою швидкістю  $\omega$  у нерухомій системі координат  $X O Y$  (рис. 1), звідки випливає, що проекція  $\text{mod}[\vec{C}_4]$  на вісь  $OX$  проекції  $\text{mod}[\vec{C}_3 + \vec{C}_4]$  вектора  $\vec{C}$  на вісь  $OY_1$  дорівнює  $C \sin(\omega t + \alpha) \cdot \sin(\Omega t + \beta)$ .

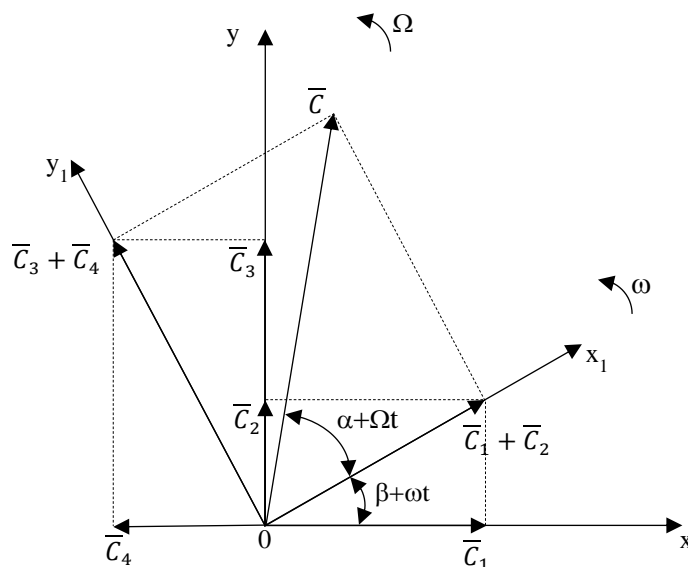


Рисунок 1 - Геометрична інтерпретація гіпергармонічної функції

Розглянуту площину можна вважати бікомплексною, якщо покласти, що осі  $OX$  й  $OY$  відповідають дійсній (1) і уявній ( $i_1$ ) осям площини  $XOY$  і дійсній ( $i_3$ ) і уявній ( $i_2$ ) осям площини  $X_1OY_1$ . Тоді вектор  $\vec{C}$  відповідає бікомплексній функції

$$\begin{aligned} \vec{C}(t) = C \cdot e^{i(\omega t + \alpha)} e^{j(\Omega t + \beta)} = C \cos(\omega t + \alpha) \cdot \cos(\Omega t + \beta) + \\ + i_1 C \cos(\omega t + \alpha) \sin(\Omega t + \beta) + i_2 C \sin(\omega t + \alpha) \cos(\Omega t + \beta) + \\ + i_3 C \sin(\omega t + \alpha) \sin(\Omega t + \beta) = \text{mod}[\vec{C}_1] + i_1 \text{mod}[\vec{C}_2] + i_2 \text{mod}[\vec{C}_3] + i_3 \text{mod}[\vec{C}_4] \end{aligned} \quad (9)$$

При цьому бікомплексна амплітуда  $\vec{C} = \vec{C}(t)|_{t=0}$  визначиться початковим положенням вектору  $\vec{C}$ . Це впливає з рис. 1, оскільки при  $t=0$

$$\text{mod}[\vec{C}_1] = a, \text{mod}[\vec{C}_2] = b, \text{mod}[\vec{C}_3] = c, \text{mod}[\vec{C}_4] = d.$$

Такий зв'язок бікомплексних величин і вектору  $\vec{C}$  має місце лише при  $a \cdot d = b \cdot c$ .

У загальному випадку, коли  $a \cdot d \neq b \cdot c$ , вектор  $\vec{C}$  відповідає сумі векторів  $\vec{C}_1$  і  $\vec{C}_2$  (рис. 2), які являють собою бікомплексні величини  $\dot{C}_1$  та  $\dot{C}_2$ . Крім того, з рис. 2 можна бачити як здійснюється зворотний процес визначення  $\dot{C}_1$  та  $\dot{C}_2$ , якщо відомо вектор  $\vec{C}$ , який відповідає бікомплексній величині  $\dot{C}$  загального вигляду.

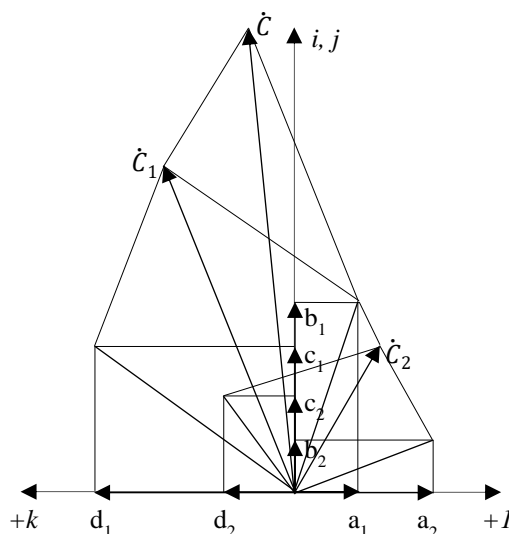


Рисунок 2 - Загальний випадок складових бікомплексної величини

Запропонований метод бікомплексного числення можна вважати узагальненням на більш абстрактному рівні відомого інтегрального символічного числення на область функцій гіперкомплексної змінної.

Користуючись конкретними співвідношеннями бікомплексного перетворення можна аналізувати вихідну напругу перетворювального пристрою із багаторазовою модуляцією і здійснювати моделювання систем електроживлення.

На основі проведених теоретичних досліджень розроблено ряд ПП із багаторазовою модуляцією та адаптивним координатно-параметричним керуванням у складі системи електропостачання з ВДЕ, які передбачають формування заданої вихідної напруги довільної форми з необхідною точністю за умови забезпечення інваріантності вихідних координат ПП до виду перетворюваної електроенергії на виході первинної системи з ВДЕ, а також до впливових координатно-параметричних збурень

Для аналізу за допомогою бікомплексного числення структури перетворювальних пристроїв із багатократною модуляцією для ВДЕ розглянемо більш детально вираз для комутаційної функції.

У загальному вигляді вираз (2) має вигляд

$$\bar{Q}(t) = \frac{\frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^{k-1}}{2k-1} \sum_{l=1}^N [g'_l \cos(2l-1)\alpha'_l] \right\} \cdot \cos(2k-1)\omega t}{\frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \sum_{l=1}^N [g_l \cos(2l-1)\alpha_l] \right\} \cdot \cos(2n-1)\Omega t} \quad (10)$$

Відомо [1], що поліноми від  $l$  у виразі (10) можуть бути представлені в замкнутій формі:

$$\sum_{l=1}^N \cos(2l-1)\alpha = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin 2N\alpha}{\sin \alpha} \quad (11)$$

Тоді вираз (10) запишеться у вигляді

$$\bar{Q}(t) = \frac{\frac{g'_l \sin 2N\alpha'_l}{\sin \alpha'_l} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{2k-1} \cos(2k-1)\omega t}{\frac{g_l \sin 2N\alpha_l}{\sin \alpha_l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \cos(2n-1)\Omega t} \quad (12)$$

Перетворимо останній вираз до вигляду

$$\bar{Q}(t) = \frac{D_{n,k} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} \cos(2k-1)\omega t}{\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \cos(2n-1)\Omega t} \quad (13)$$

$$\text{де } D_{n,k} = \frac{g'_l \sin 2N\alpha'_l}{\sin \alpha'_l} / \frac{g_l \sin 2N\alpha_l}{\sin \alpha_l}$$

З метою подальшого спрощення виразу (13) представимо його знаменник для миттєвого значення аргументу у вигляді

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \cdot \cos(2n-1)x = \frac{1}{2} \sec x \quad (14)$$

Помножимо чисельник і знаменник виразу (13) на  $\cos \Omega t$ . Тоді з урахуванням того, що  $(\cos x \cdot \sec x = 1)$ , і повертаючись до комплексної форми представлення рядів, отримаємо вираз (13) у вигляді

$$\bar{Q}(t) = D_{n,k} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} e^{i(2n-1)\omega t} \times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{2k-1} e^{j(2k-1)\Omega t} \quad (15)$$

Отримаємо вихідний сигнал перетворювального пристрою із багатократною модуляцією в бікомплексній формі може бути представлено виразом

$$\dot{U}_{\text{вих}} = D_{n,k} \dot{F}(i\Omega) \cdot \frac{1}{4ij} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{f}(jk\omega) \cdot \dot{F}(in\Omega) \quad (16)$$

де узагальнена бікомплексна частота відповідає  $(i + jq)\Omega$ ,  $q = \omega/\Omega$ .

**Висновки.** При дослідженні особливостей побудови, основних характеристик й можливостей застосування ГЧС, доведено доцільність використання ГЧС при математичному моделюванні ПС із багатократною модуляцією. Обґрунтовано вибір системи бікомплексних чисел, що представляють собою комутативне подвоєння поля комплексних чисел комплексними числами.

Користуючись основними правилами алгебри бікомплексного перетворення та бікомплексними зображеннями векторних функцій, можна аналізувати вихідний сигнал інваріантних систем енергопостачання на основі відновлюваних джерел енергії для різних форм вхідного впливу.

Одним з досить перспективних застосувань гіперкомплексного вираховування є перетворення систем диференціальних рівнянь з метою спрощення або стиснення в одне рівняння. Тобто, загальне завдання перетворення може бути сформульовано в такий спосіб: за системою диференціальних рівнянь необхідно знайти таку гіперчислову систему, за допомогою якої вихідну систему можна стиснути в одне рівняння, розв'язок якого можна записати в аналітичному вигляді [8,9].

Встановлено, що використання гіперкомплексного числення дає змогу істотно зменшити обсяги оброблюваної інформації без зниження інформативності математичної моделі.

#### Список використаної літератури

1. Касандров В.В. Алгебродинамика: кватернионы, твисторы, частицы. Вестник РУДН. Серия: Физика. 2000. Выпуск 8(1). С. 34-45.
2. Смолин А.Л. Гиперкомплексные преобразования Лоренца, эфир и остальная физика. Диалог-МГУ. 1999. 105с.
3. Топпан Ф. Алгебра с делением, суперсимметрии и октонионная М-теория. Гиперкомплексные числа в геометрии и физике. № 02(2). 2004. С. 112-129.
4. Balan V. Spectral properties and applications of numerical multilinear algebra of m-root structures. *Hypercomplex Numbers in Geometry and Physics*, 2 (10). v. 5, p. 101-107. 2008.
5. Goldberg D.E. Genetic algorithms and Walsh functions. *Complex systems*. 1989. №3(2). pp. 129-171.
6. Ludkovsky S.V. Quasi-conformal functions of quaternion and octonion variables, their integral transformations. 2008. *Far East Journal of Mathematical Science (FJMS)* 28, 1. pp. 37- 88.
7. Smirnov V.S., Samkov A.V., Bulgach T.V. Theoretical and methodological Aspects of Intensive-converter system of Telecommunication complex organization. Mathematical simulation in electrotecnics, electronics, electroenergetics. 2006. Lviv. Lvivska poleticnica. P.482.
8. Смирнов В.С., Лизанец В.В., Самков А.В., Беленок Н.В., Иваниченко Е.В. Концептуальные основы построения усилительно-преобразовательных систем телекоммуникационного оборудования для фотоэнергетики. Матеріали МНТК «Відновлювана енергетика ХХІ століття». 2016. К. ІВЕ НАНУ. 29-30 вересня. С.286-290.
9. Смирнов В. С., Беленок Н. В., Иваниченко Е. В. Теоретические основы организации структурно-инвариантных преобразовательных систем автономных объектов для возобновляемой энергетики. «Відновлювана енергетика» 2016. ІВЕ НАНУ. № 4(47). С.20-29.

N.V. Belenok, Senior Teacher, ORCID 0000-0003-4242-5536  
V.I. Chibelis, Cand. Sc., Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4234-6072  
L.Yu. Spinul, Cand. Sc., Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4234-6072  
**National Technical University Of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

## BICOMPLEX ANALYSIS OF INVARIANT POWER SUPPLY SYSTEMS BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

*The article considers a bicomplex calculation for calculating the invariant power supply systems based on renewable energy sources. Modern energy supply systems based on renewable energy sources have non-linear systems with complex transients and possible critical and chaotic regimes. The study of structures of hypernumerical systems, their features, methods of calculation and approximation of the elementary functions of a hypercomplex variable allows to effectively apply such systems in mathematical modelling of invariant power supply systems based on renewable energy sources. In some cases, the use of hypernumerical systems makes it possible to replace the original problem with an equivalent one, that is to build a bicomplex solution model. The system of complex numbers was considered as the initial system. With recurrent doubling of the system, hypernumerical systems of different dimensions with different properties were obtained, which made it possible to assign different values to the products of imaginary units. It is proved that the introduction of additional conditions of commutativity and associativity, which apply to real numbers and imaginary units, allows to specify the choice of a hypernumerical system.*

*In the analysis of nonstationary processes of invariant systems and the study of the possibilities of hypernumerical systems, the expediency of choosing a bicomplex calculation method in mathematical modelling of systems with multiple modulation is substantiated. The method of bicomplex representation involves direct and inverse bicomplex transformation, which allows obtaining an analytically complete solution for the analysis of an invariant power supply system based on renewable energy sources. Examples of the use of bicomplex integral transformation for the analysis of systems with multiple modulation are considered. The application of the hypercomplex calculus apparatus for the transformation of systems of differential equations is proposed to simplify or compress them into one equation. It is shown that the use of hypercomplex calculus allows to significantly reduce the amount of processed information without reducing the informativeness of the mathematical model.*

*The proposed formulation of tasks in a hypercomplex view allowed to compress the processing information and obtain a compact vortex for the output signal.*

**Keywords:** invariant systems, hypercomplex numerical systems, bicomplex analysis, renewable energy sources.

## References

1. Kasandrov V.V. Algebrodynamics: quaternions, twistors, particles. Bulletin Rossiiskogo Universiteta Druzhby Narodov. Seriya: Physics. 2000. Vyp. 8(1). pp. 34-45.
2. Smolin A.L. Hypercomplex Lorentz transformations, ether and the rest of physics. Dialog-MSU. 1999. 105p.
3. Toppan F. Division algebra, supersymmetries and octonionic M-theory. Hypercomplex numbers in geometry and physics. № 02(2). 2004. pp.112-129.
4. Balan V. Spectral properties and applications of numerical multilinear algebra of m-root structures. *Hypercomplex Numbers in Geometry and Physics*, 2 (10). v. 5, p. 101-107. 2008.
5. Goldberg D.E. Genetic algorithms and Walsh functions. *Complex systems*. 1989. №3(2). pp. 129-171.
6. Ludkovsky S.V. Quasi-conformal functions of quaternion and octonion variables, their integral transformations. 2008. *Far East Journal of Mathematical Science (FJMS)* 28, 1. pp. 37- 88.
7. Smirnov V.S., Samkov A.V., Bulgach T.V. Theoretical and methodological Aspects of Intensive-converter system of Telecommunication complex organization. Mathematical simulation in electrotecnics, electronics, electroenergetics. 2006. Lviv. Lvivska politechnica. P.482.
8. Smirnov V.S., Lizanets V.V., Samkov A.V., Belenok N.V., Ivanchenko E.V. Conceptual foundations for constructing amplifying-converting systems of telecommunication equipment for photoenergy. Mathematical International Scientific and Technical Conference “Renewable energy XXI century”. 2016. IRE National Academy of Sciences of Ukraine. 29-30 September. pp.286-290.
9. Smirnov V.S., Belenok N.V., Ivanchenko E.V. Theoretical foundations of the organization of structurally invariant transformation systems of autonomous objects for renewable energy. “Renewable energy”. 2016. IRE National Academy of Sciences of Ukraine. № 4(47). pp.286-290.

Надійшла 5.06.2022

Received 5.06.2022

В.А. Степаненко, аспірант, ORCID 0000-0001-6176-589X

А.І. Замулко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-8018-6332

Ю.А. Веремійчук, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-0258-0478

В.Ф. Находов, д-р техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-7643-5965

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОЦІНКА РИЗИКІВ ПРИ ІНТЕГРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДО СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

*Робота присвячена розвитку методології, що дозволяє поєднувати якісні та кількісні оцінки різних факторів ризику для прийняття інтегрального рішення при приєднанні відновлюваних джерел енергії до системи електропостачання. Інтеграція кількісної інформації та якісно представлених знань шляхом створення відповідних алгоритмів дозволяє суттєво розширити можливості проведення ризик-аналізу об'єктів відновлюваних джерел енергії, утворених енергетичних систем та обґрунтування заходів щодо управління ними.*

*В ході дослідження проведено аналіз методів та підходів, що можуть використовуватися для врахування ризиків у складних системах. В умовах високої невизначеності та складності великомасштабних систем багато рішень можуть бути отримані шляхом використання якісних оцінок, що базуються на знаннях та досвіді експертів.*

*Підтримка надійності, стабільності та ефективності електричної системи стає складним питанням для розподільних мереж із змінними енергетичними ресурсами. Збільшення частки сонячних електричних станцій (СЕС) у генерації енергосистеми становить великий виклик для ефективного управління розподільною мережею та серйозну загрозу її нормальному функціонуванню.*

*В статті здійснено ідентифікацію основних факторів, що призводять до проблем інтеграції СЕС до системи електропостачання. Проведено оцінку ймовірності виникнення факторів ризику та рівня можливих наслідків від реалізації кожного з ідентифікованих факторів ризику за допомогою метода експертних оцінок.*

*За результатами дослідження встановлено, що основними проблемами при інтеграції СЕС до системи електропостачання є необхідність збільшення маневрової потужності, погіршення якості електричної енергії, виникнення необхідності модернізації ліній, зростання заборгованості за "зеленим" тарифом, виникнення вищих гармонік та неврегульованого перетікання реактивної потужності.*

**Ключові слова:** відновлювані джерела енергії, оцінка ризикових подій, система електропостачання, сонячна електрична станція, фактор ризику, якість електричної енергії.

### Вступ

Відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2035 р., схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р, розвиток енергетики на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є важливим напрямом, який підвищує рівень енергетичної безпеки і знижує антропогенний вплив на навколишнє середовище. Передбачається збільшення частки ВДЕ у загальному балансі встановлених потужностей до рівня 25% до 2035 р., що за базовим сценарієм становить близько 24 млн т н.е. [1].

Серед різних типів ВДЕ фотоелектричну генерацію можна вважати однією з найбільш перспективних технологій за рахунок тенденції до зниження вартості фотоелектричних панелей та підвищення ефективності сонячних елементів.

Принциповим питанням функціонування операторів системи розподілу є підтримання балансу в електричній мережі за допомогою управління її ресурсами та прогнозування попиту на електричну енергію. Коли до електричної мережі додаються елементи, поведінку яких важко передбачити, дотримання балансу потужності в системі стає більш складним завданням. СЕС належать до тієї категорії елементів мережі, функціонування яких суттєво залежить від метеорологічних та атмосферних умов. Тому питання коливань виробленої потужності, викликаних зміною інтенсивності сонця, стає більш вираженим у міру збільшення проникнення цих відновлюваних джерел в електричну мережу. Таким чином, їх стохастичний характер виробництва електричної енергії буде мати помітний вплив на відхилення показників якості електричної енергії [2]. Проблеми якості електроенергії, як правило, пов'язані з СЕС, включають перехідні процеси напруги, відхилення частоти та гармоніки. Тому підтримка надійності, стабільності та ефективності електричної системи стає складним питанням для розподільних мереж. Незважаючи на вищезазначені застереження, відмічається значна присутність встановленої потужності на основі СЕС в електричних мережах. Проте подальший рух у напрямку збільшення частки СЕС у генерації електроенергії

є викликом для ефективного управління розподільною мережею та серйозну загрозу її належному функціонуванню.

Інформованість осіб, які приймають рішення щодо проектів приєднання ВДЕ до систем електропостачання, багато в чому визначається стадією життєвого циклу цих об'єктів; так на ранніх етапах зазвичай відсутні достовірні дані по всіх факторах, що впливають на виникнення ризикових подій. Аналіз, що проводиться при цьому, будується на експертній оцінці. У міру подальшої розробки та впровадження ВДЕ до розподільних електромереж, виконані експертами оцінки переглядаються та уточнюються, по ряду подій з'являється необхідна для подальшого аналізу інформація, розробляються різноманітні кількісні моделі та ін. Відсутність формальної методики, що дозволяє поєднувати якісні та кількісні оцінки різних факторів ризику для прийняття інтегрального рішення при приєднанні об'єктів ВДЕ до мережі, виявляється ключовою проблемою, вирішенню якої і присвячено справжню роботу. Інтеграція кількісної інформації та якісно представлених знань шляхом створення відповідних алгоритмів дозволяє суттєво розширити можливості проведення ризик-аналізу об'єктів ВДЕ на різних етапах приєднання до електромережі та проведення оцінювання заходів щодо управління ними.

#### Мета та завдання

Метою статті є розвиток методології, що дозволяє поєднувати якісні та кількісні оцінки різних факторів ризику для прийняття узагальненого рішення при приєднанні ВДЕ до системи електропостачання. Завданнями статті є ідентифікація та оцінка основних факторів і подій, що призводять до проблем інтеграції СЕС в енергосистему країни.

#### Матеріал і результати досліджень

Відомо, що ключовими особливостями великомасштабних і складних систем є різноманітність та взаємозалежність елементів, що входять до них, велика кількість осіб, що приймають рішення в умовах високої невизначеності та ризиків, а також унікальність цих об'єктів тощо [3]. Під складними системами розуміють сукупність безлічі взаємопов'язаних підсистем, кожна з яких може характеризуватися ієрархією спільних або взаємодіючих компонентів, власними функціями, операціями, базами даних, витратами та зацікавленими сторонами. При цьому особливості взаємодій між підсистемами не дозволяють аналізувати складну систему лише на основі знань про властивості формуючих її елементів.

Прикладами подібних систем є глобальні газотранспортні та енергетичні об'єкти, підприємства гірничодобувної та обробної промисловості тощо. Одним з ключових питань ефективного управління такими системами є оцінка та аналіз ризикових подій, що впливають на їх успішне функціонування. Наприклад, різноманітні природні, політичні, фінансово-економічні, організаційні та багато інших подій здатні суттєво вплинути на роботу складних систем, у зв'язку з чим мають піддаватися відповідному аналізу при виробленні управлінських рішень.

Для аналізу ризиків складних систем можуть використовуватися різні методи, у т. ч. аналітичні моделі, імітаційне моделювання, методи аналізу. Проте використання цих інструментів стикається з рядом проблем, пов'язаних з відсутністю необхідної кількісної інформації, складністю обґрунтування коректності результатів розрахунків, високою трудомісткістю оцінок, відсутністю необхідних програмних засобів та ін.

Зазначимо, що у багатьох випадках найпростішим і найефективнішим методом вирішення задачі в умовах невизначеності є комбіноване використання різних моделей та методів, коли кожен із них більшою мірою відображає особливості роботи відповідних підсистем. Такі комплексні моделі називають "гібридними". Особливості застосування методів аналізу ризиків складних систем та їх характеристики наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 — Особливості застосування методів аналізу ризиків складних систем та їх характеристики

Метод	Можливість застосування в задачах аналізу ризиків складних систем	Умови та особливості застосування	
		Необхідні умови	Необхідність у програмному забезпеченні (ПЗ)
Метод SWOT-аналізу	Матриця SWOT-аналізу є своєрідною формою, яка не містить остаточної інформації про оцінку ризиків та прийняття рішень для складної системи чи її окремих елементів, але дає змогу впорядкувати процес обмірковування всієї наявної інформації.	1. Процес заповнення матриці повинен бути виконаний максимально ретельно. 2. Фактори, які утворюють матрицю SWOT-аналізу, обов'язково перевіряються на предмет наявності ефекту синергії (взаємного впливу).	Не потребує використання потужного ПЗ



Метод сценаріїв	Метод сценаріїв розвитку ризиків складних систем дозволяють з вибраним рівнем достовірності визначити можливі тенденції, взаємозв'язок між діючими факторами, сформувати картину станів, до яких може прийти система під впливом тих чи інших ризиків.	1. Наявність аналітиків складних систем високої кваліфікації. 2. В основу покладено методи якісного аналізу, введення емпіричних припущень та системну побудову цілісних сценаріїв.	Потребує використання потужного ПЗ для імітаційного моделювання сценаріїв ризиків складних систем
Метод Монте-Карло	Імітаційне моделювання за методом Монте-Карло застосовується для побудови математичної моделі оцінки ризиків складних систем з важкопрогнозованими показниками. Його метою є визначення розподілу результатів реалізації ризику на основі ймовірнісного розподілу ключових змінних і кореляційної залежності між елементами складної системи.	1. Наявність хорошої вихідної моделі із застосуванням характеристик, отриманих на базі вивчення емпіричних даних про складну систему та її ймовірнісну поведінку. 2. Застосування спеціальних комп'ютерних програм.	Потребує використання потужного ПЗ для моделювання складних систем
Метод аналогій	Метод аналогій полягає в пошуку і використанні подібності між явищами, компонентами елементів складних систем. Він дає можливість врахувати можливі помилки, наслідки впливу несприятливих чинників та екстремальні ситуації як джерела ризику окремих підсистем.	1. Підбір аналога і оцінка того, наскільки його ризики можуть бути порівняні з ризиками, що розглядаються. 2. Застосування лише для повторюваних проектів та ситуацій окремих елементів складної системи. 3. Наявність відповідної інформаційної бази для проведення аналізу	Не потребує використання потужного ПЗ
Метод Дельфі	Метод Дельфі найбільш доцільний при оцінках окремих ризиків та визначенні ймовірності настання ризикових подій в складних системах, оцінці величини втрат, ймовірності зменшення втрат у обраній підсистемі тощо. Експертні оцінки можуть здійснюватися як за бальною системою, так і в конкретних кількісних показниках.	1. Наявність групи експертів з відповідних сфер знань для одержання кількісних оцінок. 2. Забезпечення анонімності і керованим зворотнім зв'язком з метою уникнення групового обговорення і тиску думки авторитетних осіб.	Не потребує використання потужного ПЗ, для обробки експертних оцінок використовуються статистичні методи
Метод аналізу ієрархій (MAI)	MAI дозволяє зрозумілим і раціональним чином структурувати проблему аналізу ризиків складних систем у вигляді ієрархії, порівняти і виконати кількісну оцінку вибраних варіантів, а також детально проаналізувати критерії, їх функціональну взаємодію і вплив на досліджувану складну систему.	1. Базування на застосуванні методу Дельфі, якщо можливі сценарії не описують вербально. 2. Необхідність фахівців високого рівня в відповідній галузі. 3. Здійснення пошуку ймовірностей виникнення можливих сценаріїв за допомогою математичного та програмного забезпечення.	Виникає необхідність застосування потужного ПЗ через велику множину ризиків та критеріїв вибору у складних системах

У зв'язку з проблемами високої невизначеності та складності великомасштабних систем значна частина рішень може бути отримана шляхом використання якісних оцінок, що базуються на знаннях та досвіді експертів. Для цього широко застосовуються методи SWOT-аналізу, що вже зарекомендували себе, Дельфі, а також найбільш популярний і широко використовується в даний час метод аналізу ієрархій (MAI), запропонований Т. Сааті [4].

**Ідентифікація основних факторів, що призводять до проблем інтеграції СЕС**

З високою ймовірністю, значна частка сонячних фотоелектричних установок буде підключатися до системи розподілу низької напруги завдяки її модульним властивостям. У більшості систем електропостачання електроенергія спрямовується в одному напрямку: від централізованих виробників електричної енергії через підстанції різних рівнів напруги до споживачів. При інтеграції джерел розподіленої генерації до системи електропостачання електроенергія може протікати в зворотному напрямку. Однак більшість систем електричного розподілу не були розроблені для забезпечення двостороннього потоку енергії. Для ланцюгів розподільних фідерів, які є довгими і обслуговують сільські райони або райони, що розвиваються, навіть невелика кількість фотоелектричної енергії може вплинути на параметри системи, якщо навантаження та генерація фотоелектричної енергії не збігаються. Коли виробництво СЕС перевищує локальний попит на енергію, енергія буде переміщатися через розподільний фідер і, можливо, через місцеву підстанцію, збільшуючи потенціал впливу на інших споживачів, які обслуговуються тим же розподільним контуром [5, 6].

Проблема якості електроенергії варіює від напруги та частоти до інших областей, таких як гармоніки. Проблема з гармоніками виникає в основному через наявність інверторів живлення, які використовуються для перетворення постійної напруги, створеної відновлюваними джерелами, в змінний. Ці нелінійні навантаження вводять гармоніки в мережу живлення, викликаючи повне гармонійне спотворення, і можуть призвести до непрацездатності обладнання [7].

Гармоніки зазвичай викликані затримкою перемикання інвертора, що викликає спотворені хвилі. Гармонійні спотворення вихідної форми сигналу інвертора будуть значними, якщо інсоляція швидко змінюється, вихідна потужність фотоелемента занадто низька або потужність серйозно коливається. Гармонійна суперпозиція виникне в ситуації інтеграції великої кількості великомасштабних СЕС в мережу для цих фотоелектричних систем, які будуть діяти як мультигармонічні джерела. Практичний досвід експлуатації кількох систем великомасштабних СЕС за кордоном показав, що навіть гармоніки вихідного струму одного інвертора, підключеного до мережі, є малими, гармонічні струми на виході кількох шунтуючих інверторів можуть значно перевищувати нормальний стандарт [8, 9].

Характеристики фотоелектричних систем без диспетчеризації (тобто генерація електричної енергії, яку не можна ввімкнути або вимкнути для задоволення потреб суспільства, що коливаються в електроенергії) допускають коливання генерації напруги, які раніше не були присутні в мережі. Поряд з переривчастістю генерації фотоелектричної енергії, існують також проблеми з якістю напруги в мережі, які необхідно враховувати. Також із загальним впливом на якість електроенергії, підвищення рівня напруги в радіальних системах розподілу було зазначено як одне з основних технічних питань підключення розподіленої генерації [10].

У новому сценарії, коли генерація та споживання можуть одночасно надходити зі сторони попиту, можуть виникнути значні та небажані коливання напруги в мережах низької напруги, що призведе до згубного впливу на роботу мережі, головним чином на віддалених кінцях ліній [11].

Згідно формул (1) та (2), чим ближче точка під'єднання СЕС до навантаження, тим менші будуть втрати потужності та напруги в мережі.

$$\Delta P = \frac{(P - P_{\text{ВДЕ}})^2 + (Q - Q_{\text{ВДЕ}})^2}{U^2} \cdot R'_{\text{ек}}, \quad (1)$$

$$\Delta U = \frac{(P - P_{\text{ВДЕ}}) \cdot R'_{\text{ек}} + (Q - Q_{\text{ВДЕ}}) \cdot X'_{\text{ек}}}{U}, \quad (2)$$

де  $P$  – активна потужність, що споживається в мережі, кВт;  $P_{\text{ВДЕ}}$  – активна потужність, що генерується СЕС, кВт;  $Q$  – реактивна потужність, що споживається в мережі, квар;  $Q_{\text{ВДЕ}}$  – реактивна потужність, що генерується СЕС, квар;  $R'_{\text{ек}}$  – приведений еквівалентний активний опір мережі, Ом;  $X'_{\text{ек}}$  – приведений еквівалентний реактивний опір мережі, Ом;  $U$  – напруга мережі, кВ.

Проте позитивний ефект від інтеграції СЕС в електромережу матиме місце до тих пір, коли їх потужність генерування суттєво не перевищить потужність споживання. За певного значення потужності генерування СЕС втрати потужності та напруги в мережі почнуть зростати, а тому напруга може перевищити допустиме значення. Отже, потрібно визначати не тільки оптимальну точку під'єднання СЕС, а й оптимальну їх установлену потужність.

При варіанті інтеграції СЕС без суттєвих змін в схемі електричної мережі та без оновлення силового електрообладнання подальший рух у напрямку збільшення частки СЕС у генерації енергосистем не є можливим. Тобто розвиток генерації електроенергії з ВДЕ в електричній мережі потрібно проводити з одночасною її реконструкцією та модернізацією.

Наявні темпи розвитку СЕС визначають необхідність прийняття рішень у сфері розвитку та реконструкції мереж на всіх рівнях напруги, особливо в частині будівництва нових ліній електропередач,

заміни існуючих проводів повітряних та кабельних ліній, заміни трансформаторів та силового обладнання на вже існуючих підстанціях та спорудження нових підстанцій.

Також при тенденції до зростання потужностей СЕС та збільшенні їх частки у структурі виробництва електроенергії, практично незмінною залишається встановлена потужність теплової та гідрогенерації, котрі на сьогодні є основними інструментами у покритті пікового та напівпікового споживання та надають енергосистемі маневрові потужності.

Оскільки виробництво електроенергії СЕС припадає саме на добовий проміжок, коли в енергетичній системі відбувається зменшення споживання, у порівнянні з ранковими та вечірніми піками, то створюється профіцит виробництва в енергосистемі. До того ж електроенергія з СЕС та ВЕС відпускається в мережу в зазначений проміжок доби навіть більше обсягу, придбаного на ринкових сегментах учасниками ринку для потреб кінцевого споживача. У результаті для дотримання балансу в енергетичній системі та забезпечення операційної безпеки в цей період часу персоналу НЕК «Укренерго» доводиться використовувати всі наявні маневрені можливості виробників електричної енергії з теплових та гідроелектростанцій з метою розвантаження в межах балансуючого ринку та віддавати аналогічні команди з операційної безпеки, а також застосовувати роботу ГАЕС у акумулюючому режимі для збільшення обсягу споживання [12].

Проте із збільшенням потужностей СЕС наведених заходів не вистачає для врегулювання балансу, і з'являється необхідність у обмеженні ВДЕ. Так у 2019 р. було 3 випадки обмеження ВДЕ, у 2020 р. – 20 випадків, а у 2021 р. ця кількість зросла до 72 випадків, навіть незважаючи на необхідність компенсації власникам ВДЕ вартості невикористаної енергії у повному обсязі. ПрАТ "НЕК "Укренерго" довелося впроваджувати Систему керування обмеженнями ВДЕ, яка дозволяє надавати команди на обмеження генерації електроенергії одночасно на велику кількість сонячних та вітрових станцій. Максимальна сумарна добова величина обмеження за 2020 р. становила 2178,86 МВт (7 червня), а вже у 2021р. максимальне добове обмеження становило 5416МВт та трималося протягом 5 днів (з 30 квітня по 4 травня включно). Таким чином річне обмеження ВДЕ на етапі генерації за 2020 р. становило 14,7 ГВт, а у 2021р. - досягло майже 101 ГВт [13]. Якщо в країні не будуть запускатися маневрені потужності, то ці обмеження лише збільшуватимуться.

При подальшому зростанні частки СЕС у структурі виробництва електроенергії з метою забезпечення гнучкості енергосистеми та уникнення необхідності обмеження генерації електроенергії з ВДЕ, забезпечення при цьому безпеки і надійності роботи енергетичної системи, необхідно розвивати високоманеврові потужності та збільшувати обсяги системи акумулювання енергії.

До початку функціонування оптового ринку електроенергії виплати за "зеленим" тарифом були включені у тарифи для юридичних осіб (непобутових споживачів). В той період кількість електроенергії з ВДЕ мала невеликий обсяг, тому стаття витрат не становила проблему. Після запровадження оптового ринку електроенергії, виплата за електроенергію з альтернативних джерел була закладена в тариф на передачу електроенергії оператором системи розподілу НЕК "Укренерго", тобто за неї сплачували всі споживачі електричної енергії - по 22,6 коп. в кожному кВтгод [14].

За серпневою редакцією Положення «про покладення спеціальних обов'язків на учасників ринку електричної енергії для забезпечення загальнооспільних інтересів у процесі функціонування ринку електричної енергії» виплати за "зеленим" тарифом було перенаправлено на генеруючі державні компанії ПрАТ «Укргідроенерго» та ДП «НАЕК «Енергоатом», де посередником виступає ДП «Гарантований покупець» [15].

Профінансування між доходами та витратами, що виникає під час виконання *Public Service Obligation (PSO)*, майже стовідсотково спрямовується на купівлю електроенергії за «зеленим» тарифом. При цьому від'ємне сальдо нівелюється за рахунок послуги із забезпечення зростання частки генерації електричної енергії з відновлюваних джерел енергії, яку ДП «Гарантований покупець» надає оператору системи передачі ПрАТ «НЕК «Укренерго».

Таким чином борг ПрАТ «НЕК «Укренерго» перед ДП «Гарантований покупець» на травень 2022р. становить 8,7 млрд грн [16]. Накопичена заборгованість за виконання *PSO* становить загрозу стабільній безпечній роботі ПрАТ «Укргідроенерго» та ДП «НАЕК «Енергоатом», а також дотримання ними та власниками ВДЕ своїх зобов'язань перед державою, працівниками, кредиторами (у тому числі державними банками) та учасниками цивільно-правових відносинах [17].

Більшість фотоелектричних інверторів, встановлених сьогодні на СЕС, по паспортним технічним характеристикам мають коефіцієнт потужності, що дорівнює одиниці. Це означає, що жодна реактивна потужність не повинна віддаватися в мережу, лише активна. Проте спостереження показують залежність між активною та реактивною віддачею потужності до мережі. Наявний потік реактивної потужності більшості аналізованих інверторів підтверджує лінійну залежність від активної потужності [18].

Внаслідок зміни кута запалювання тиристорів в інверторі можна досягати різних кутів між струмом і напругою, що в електричній мережі буде причиною зміни перетоків реактивної потужності.

Також можна зробити висновок про те, що генерування сонячною станцією реактивної потужності, враховуючи практично активне навантаження споживачів на стороні низької напруги, призводить до її зворотних перетоків і, відповідно, до додаткових втрат активної потужності та до збільшення величини повного струму.

Підсумовуючи вищевикладене, можна виділити наступні фактори ризиків, що виникають при інтеграції відновлюваних джерел енергії до системи електропостачання: збільшення маневрової потужності, погіршення якості електричної енергії, виникнення необхідності модернізації ліній, зростання заборгованості за "зеленим" тарифом, виникнення вищих гармонік та перетікання реактивної потужності. Важливість врахування цих факторів підтверджується реальними проблемами, що виникають в Об'єднаній енергетичній системі України у сфері приєднання джерел розосередженої генерації до мережі.

Далі вирішення задачі оцінки ідентифікованих факторів слід розглядати в двох напрямках: як оцінку ймовірності виникнення визначених факторів ризику та як оцінку рівня наслідків від їх реалізації при інтеграції СЕС до системи електропостачання.

#### **Оцінка основних факторів, що призводять до проблем інтеграції СЕС**

На другому етапі здійснено оцінку ймовірності виникнення та рівня можливих наслідків від реалізації кожного з ідентифікованих факторів ризику за допомогою метода експертних оцінок. При застосуванні даного методу проводилося опитування спеціальної групи експертів з 6-ти спеціалістів різних організацій, які напряму або опосередковано дотичні до питання використання СЕС, по шкалі від 1 до 6, де 1 - дуже низька ймовірність (дуже низький рівень наслідків), а 6 - дуже висока ймовірність (дуже високий рівень наслідків). Результати опитування представлені у табл. 2 та 3.

*Таблиця 2 – Оцінка ймовірності виникнення визначених факторів ризику при інтеграції СЕС*

Найменування фактору	Експерт №1	Експерт №2	Експерт №3	Експерт №4	Експерт №5	Експерт №6
Збільшення маневрової потужності	1	1	2	1	2	3
Погіршення якості електричної енергії	6	5	6	5	3	4
Виникнення необхідності модернізації ліній	5	6	5	4	4	5
Зростання заборгованості за "зеленим" тарифом	4	4	3	5	3	6
Виникнення вищих гармонік	3	2	1	2	4	1
Перетікання реактивної потужності	2	3	4	3	5	2

*Таблиця 3 – Оцінка рівня наслідків від реалізації визначених факторів ризику при інтеграції СЕС*

Найменування фактору	Експерт №1	Експерт №2	Експерт №3	Експерт №4	Експерт №5	Експерт №6
Збільшення маневрової потужності	1	1	2	1	2	3
Погіршення якості електричної енергії	6	5	6	5	3	4
Виникнення необхідності модернізації ліній	5	6	5	4	4	6
Зростання заборгованості за "зеленим" тарифом	4	4	3	5	3	5
Виникнення вищих гармонік	3	2	1	2	4	1
Перетікання реактивної потужності	2	3	4	3	5	2

Статистичну обробку даних розпочинають з визначення узгодженості думок експертів, числовим вираженням якої є коефіцієнт конкордації [19]. Необхідність у проведенні такої процедури обумовлюється тим, що фактори можуть бути витлумачені неоднозначно в силу індивідуальних особливостей кожного експерта, рівня його знань та уявлень про об'єкт. Коефіцієнт конкордації  $W$  приймає значення від 0 до 1, для першої анкети коефіцієнт  $W_1$  обчислюється за формулою (3):

$$W_1 = \frac{12 \cdot \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m r_{ij} - \bar{r} \right)^2}{m^2 \cdot (n^3 - n) - m \cdot \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{H_j} (h_k^3 - h_k)} = \frac{12 \cdot 332,8}{6^2 \cdot (6^3 - 6) - 6 \cdot ((2^3 - 2) + (2^3 - 2))} = 0,534, \quad (3)$$

де  $H_j$  - число груп рівних рангів у  $j$ -му ранжуванні;  $h_k$  - число рівних рангів у  $k$ -ій групі пов'язаних рангів при ранжуванні  $j$ -им експертом;  $n$  - кількість об'єктів;  $m$  - кількість експертів;  $r_{ij}$  - ранг, який присвоюється  $j$ -им експертом  $i$ -му об'єкту;  $\bar{r}$  - середній ранг.

При  $W=1$  є повна узгодженість думок експертів, а при  $W=0$  узгодженість практично відсутня. В нашому випадку для анкети №1  $W_1=0,534$ , а для анкети №2 аналогічно за формулою (3) -  $W_2=0,552$ . Потім отримане значення оцінюється на значимість для кожної анкети за допомогою коефіцієнта Пірсона  $\chi^2_p$ , що розраховується за формулою (4):

$$\chi^2_{p1} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m r_{ij} - \bar{r} \right)^2}{\frac{1}{12} \cdot \left[ m \cdot n \cdot (n+1) - \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{H_i} (h_k^3 - h_k) \right]} = \frac{332,8}{\frac{1}{12} \cdot \left[ 6 \cdot 6 \cdot (6+1) - \frac{1}{6-1} \cdot 12 \right]} = 16,1. \quad (4)$$

Аналогічно за формулою (4) для анкети №2  $\chi^2_{p2}=16,56$ . Розраховане значення  $\chi^2_p$  співставляється з табличним значенням  $\chi^2_{\tau}$  для  $n-1$  ступенів свободи та довірчої ймовірності  $P=0,99$  (для даного розрахунку  $\chi^2_{\tau}=15,08$ ). І в тому, і в іншому випадках  $\chi^2_p > \chi^2_{\tau}$ , отже, коефіцієнт конкордації статистично істотний.

Оскільки думки експертів узгоджені, то можна перейти до розрахунку вагомості кожного з факторів за формулою (5):

$$k_j = \frac{\sum_{i=1}^m x_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}}, \quad (5)$$

Формула (5) дозволяє нормувати експертні оцінки, таким чином вагові коефіцієнти приймають значення від 0 до 1, а їхня сума стає рівною 1. Перевагою такого визначення вагомості факторів ризику є простота та можливість його застосування в умовах експертного оцінювання.

Результати розрахунків представлені у табл. 4. У сьомому стовпці наведено значення коефіцієнта підсумкового впливу як добутку ймовірності виникнення кожного з факторів ризику на рівень його можливих наслідків.

Таблиця 4 – Ранжування факторів ризиків (перший етап)

Найменування фактору	Ймовірність виникнення фактору			Рівень наслідку від реалізації фактору		Підсумковий вплив	Ранг
	$\sum_{i=1}^m x_{ij}$	$k_j$	$k_j, \%$	$\sum_{i=1}^m x_{ij}$	$k_j$		
Збільшення маневрової потужності	10	0,080	8,0	10	0,080	0,64	6
Погіршення якості електричної енергії	29	0,232	23,2	29	0,232	5,38	2
Виникнення необхідності модернізації ліній	29	0,232	23,2	30	0,240	5,57	1
Зростання заборгованості за "зеленим" тарифом	25	0,200	20,0	24	0,192	3,84	3
Виникнення вищих гармонік	13	0,104	10,4	13	0,104	1,08	5
Перетікання реактивної потужності	19	0,152	15,2	19	0,152	2,31	4

З представленої таблиці випливає, що на даному етапі найбільший вплив серед проблем інтеграції СЕС в електромережу мають такі фактори, як виникнення необхідності модернізації ліній та погіршення якості електричної енергії. Фактор «збільшення маневрової потужності» отримав найменшу вагу та був виключений з подальшого розгляду.

Після виключення найменш впливового фактору необхідно провести перерахунок вагомості факторів, результати якого представлені у табл. 5.

Таблиця 5 – Ранжування факторів ризиків (другий етап)

Найменування фактору	Ймовірність виникнення фактору			Рівень наслідку від реалізації фактору		Підсумковий вплив	Ранг
	$\sum_{i=1}^m x_{ij}$	$k_j$	$k_j, \%$	$\sum_{i=1}^m x_{ij}$	$k_j$		
Погіршення якості електричної енергії	29	0,252	25,2	29	0,252	6,36	2
Виникнення необхідності модернізації ліній	29	0,252	25,2	30	0,261	6,58	1
Зростання заборгованості за "зеленим" тарифом	25	0,217	21,7	24	0,209	4,54	3
Виникнення вищих гармонік	13	0,113	11,3	13	0,113	1,28	5
Перетікання реактивної потужності	19	0,165	16,5	19	0,165	2,73	4

Отже, проведені оцінки дозволили запропонувати підхід до виявлення ключових факторів, що впливають на інтеграцію СЕС в електромережу, а також оцінити ймовірність їх виникнення та рівень можливих наслідків. Таким чином, здійснено ідентифікацію та оцінку основних факторів і подій, що призводять до проблем інтеграції СЕС в енергосистему країни. Описані методи дозволяють поєднувати якісні та кількісні оцінки різних факторів ризику для прийняття узагальненого рішення при приєднанні ВДЕ до системи електропостачання.

В подальшому дослідженні отримані результати будуть використані для розробки формальної методики врахування впливу СЕС на етапі приєднання до Об'єднаної енергетичної системи України. Дана методика дозволить здійснювати техніко-економічне обґрунтування вибору місця та схеми приєднання ВДЕ до системи електропостачання, а також визначати відповідні вимоги до параметрів електроустановки відповідно до факторів ризику на етапі видання технічних умов замовнику.

### Висновки

В ході дослідження було виявлено, що подальший розвиток у напрямку збільшення частки СЕС у генерації енергосистеми становить значний виклик для ефективного управління розподільною мережею та створює проблеми її нормальному функціонуванню, зокрема в частині щодо виконання вимог ДСТУ EN 50160:2014.

Розвиток "зеленої" енергетики відбувається без урахування реальних потреб ОЕС України у додаткових генеруючих потужностях, що призводить до таких проблем, як необхідність збільшення маневрової потужності, погіршення якості електричної енергії, виникнення необхідності модернізації ліній, зростання заборгованості за "зеленим" тарифом, виникнення вищих гармонік та перетікання реактивної потужності, а також запровадження неринкових методів щодо використання системи керування обмеженнями.

Для оцінки ризиків інтеграції сонячних систем можуть використовуватися різні методи, такі як: метод сценаріїв, метод Монте-Карло, метод аналогій, метод SWOT-аналізу, метод Дельфі та метод аналізу ієрархій. У багатьох випадках найпростішим підходом є комбіноване використання різних моделей та методів, коли кожен із них більшою мірою відображає особливості роботи відповідних підсистем. Такі комплексні моделі називають "гібридними". У зв'язку з проблемами високої невизначеності та складності великомасштабних систем багато рішень можуть бути отримані шляхом використання якісних оцінок, що базуються на знаннях та досвіді експертів, що і було показано у даному дослідженні.

Відсутність формальної методики, що дозволяє поєднувати якісні та кількісні оцінки різних факторів ризику для прийняття інтегрального рішення при приєднанні об'єктів ВДЕ до мережі, виявляється ключовою проблемою, над вирішенням якої буде здійснено подальшу роботу. Інтеграція

кількісної інформації та якісно представлених знань шляхом створення відповідних алгоритмів дозволяє суттєво розширити можливості проведення ризик-аналізу об'єктів ВДЕ на різних етапах приєднання до електромережі та проведення оцінювання заходів щодо управління ними.

#### **Список використаних джерел**

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. URL: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art\\_id=245239564&cat\\_id=245239555](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245239564&cat_id=245239555).
2. ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT).
3. Haimes Y. Y. Risk modeling, assessment, and management. 3rd ed. Hoboken, NJ : J. Wiley & Sons, 2008.
4. Saaty T. L. Principia mathematica decernendi: Mathematical principles of decision making: generalization of the analytic network process to neural firing and synthesis. Pittsburgh, Pa: RWS Publications, 2010. 531 p.
5. Coddington M., Miller M., Katz J. Grid-Integrated Distributed Solar: Addressing Challenges for Operations and Planning, Greening the Grid. OSTI.GOV | OSTI.GOV. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1244310>.
6. Veremiichuk Y., Zamulko A., Zaichenko S., Mahnitko A., Berzina K., Zicmane I. "Analysis of Electric Energy Supply Security Attached to Renewable Energy Sources Implementation" X International Conference on Electrical and Power Engineering EPE 2018 Iași, Romania. October 18-19, 2018.
7. Belcher B., B.J. Petry, Davis T., K.. The effects of major solar integration on a 21-Bus system: technology review and PSAT simulations Conf. Proc. - IEEE SOUTHEASTCON (2017), 10.1109/SECON.2017.7925361.
8. Dong W, Bai X, Zhu N, Zhou Z, Li H. Discussion on the power quality under grid-connection of intermittent power sources. Power Syst Technol 2013;37 (5):1265–71.
9. Varma R, Salama M, Seethapathy R, Champion C. Large-scale photovoltaic solar power integration in transmission and distribution networks. In: Proceedings of IEEE power and energy society general meeting: the electrification of transportation and the grid for the future. Detroit, MI, USA; July 2011.
10. Лежнюк, П. Д. Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, І.О. Гунько // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2015. – № 3 (41). – С. 7–13.
11. Tonkoski R., Lopes L. A. C., El-Fouly T. H. M. Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2011. Vol. 2, no. 2. P. 139–147. URL: <https://doi.org/10.1109/tste.2010.2098483>.
12. У 2020 році встановлена потужність БЕС та СЕС зросла на 41%, а їхня частка у структурі виробництва електроенергії – вдвічі. Національна енергетична компанія «Укренерго». URL: [https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zroslo-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnystva-elektroenergiyi-vdvichi/?fbclid=IwAR20eN3fgZVw22mBs3rx\\_XS4JMCSMoFZccKW XpN3Ah-MC-NwQYS9\\_OklBvg](https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zroslo-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnystva-elektroenergiyi-vdvichi/?fbclid=IwAR20eN3fgZVw22mBs3rx_XS4JMCSMoFZccKW XpN3Ah-MC-NwQYS9_OklBvg) (дата звернення: 05.05.2022).
13. У 2020 році встановлена потужність БЕС та СЕС зросла на 41%, а їхня частка у структурі виробництва електроенергії – вдвічі. ПрАТ "НЕК "Укренерго. URL: [https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zroslo-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnystva-elektroenergiyi-vdvichi/?fbclid=IwAR20eN3fgZVw22mBs3rx\\_XS4JMCSMoFZccKW XpN3Ah-MC-NwQYS9\\_OklBvg](https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zroslo-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnystva-elektroenergiyi-vdvichi/?fbclid=IwAR20eN3fgZVw22mBs3rx_XS4JMCSMoFZccKW XpN3Ah-MC-NwQYS9_OklBvg) (дата звернення: 14.05.2022).
14. Сагайдак І., Балагура О., Макаренко В. "Зелена" енергетика в контексті загроз економічній та національній безпеці. Економіка та держава. 2020. № 6. С. 113-117. URL: <https://doi.org/10.32702/2306-6806.2020.6.113>.
15. Положення про покладення спеціальних обов'язків на учасників ринку електричної енергії для забезпечення загальносуспільних інтересів у процесі функціонування ринку електричної енергії: Постанова Каб. Міністрів України від 05.06.2019 р. № 483 : станом на 18 квіт. 2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/483-2019-п#Text>.
16. Актуальна інформація щодо розрахунків з виробниками електроенергії. ДП «Гарантований покупець». URL: [https://www.gpee.com.ua/news\\_item/342](https://www.gpee.com.ua/news_item/342). (дата звернення: 14.05.2022).



17. Ukrainian Association of Renewable Energy (2020), "UARE position on the proposal to liquidate SE "Guaranteed Buyer", available at: [https://uare.com.ua/novyny/707\\$pozitsiya\\$uave\\$shchodo\\$propozitsiji\\$likvidatsiji\\$dp\\$garantovaniy\\$pokupets\\$2.html](https://uare.com.ua/novyny/707$pozitsiya$uave$shchodo$propozitsiji$likvidatsiji$dp$garantovaniy$pokupets$2.html).

18. Grid Influences From Reactive Power Flow of Photovoltaic Inverters With a Power Factor Specification of One / A. Spring et al. IEEE Transactions on Smart Grid. 2016. Vol. 7, no. 3. P. 1222–1229. URL: <https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2413949>.

19. Бешельєв С. Д., Гудвіч Ф. Г. (1980). Математично-статичні методи експертних оцінок. М.: Статистика. С. 263.

**V. Stepanenko**, Ph.D. student, ORCID 0000-0001-6176-589X

**A. Zamulko**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-8018-6332

**Y. Veremiichuk**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-0258-0478

**V. Nakhodov**, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-7643-5965

**National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

### **ASSESSMENT OF RISK FOR THE INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES INTO THE ELECTRICITY SUPPLY SYSTEM**

*The work is devoted to the development of a methodology that allows combining qualitative and quantitative assessments of different risk factors to make an integrated decision when renewable energy sources connect to the electricity supply system. The integration of quantitative information and qualitatively presented knowledge through the creation of appropriate algorithms can significantly expand the possibilities of risk analysis of renewable energy sources, established energy systems and justification of measures to manage them.*

*The key features of large-scale and complex systems are the diversity and interdependence of the elements included in them, the large number of decision-makers in conditions of high uncertainty and the uniqueness of these objects. Therefore, the study describes the methods and approaches that can be used to analyze the risks of complex systems. In conditions of high uncertainty and complexity of large-scale systems, many solutions can be obtained by using qualitative assessments based on the knowledge and experience of experts.*

*Maintaining the reliability, stability and efficiency of the electrical system is becoming a difficult issue for distribution networks with variable energy resources. Further movement in the direction of increasing the share of solar power plants (SPP) in the generation of the power system is a great challenge for effective management of the distribution network and a serious threat to its normal functioning.*

*The article identifies the main factors that lead to the problems of integration of SPP. Also, the probability of occurrence and the level of possible consequences of the implementation of each of the identified risk factors were assessed by using the method of expert assessments.*

*According to the results of the study, the main problems in integrating SPP into the power supply system are increasing shunting power, deteriorating electricity quality, the need to modernize lines, increasing debt on the "green" tariff, higher harmonics and reactive power flow.*

**Keywords:** renewable energy sources, risk assessment, power supply system, solar power plants, risk factor, electricity quality.

### **References**

1. Energy strategy of Ukraine for the period up to 2035. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine. URL: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art\\_id=245239564&cat\\_id=245239555](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245239564&cat_id=245239555).

2. DSTU EN 50160: 2014 Characteristics of power supply voltage in general purpose electrical networks (EN 50160: 2010, IDT).

3. Haimes Y. Y. Risk modeling, assessment, and management. 3rd ed. Hoboken, NJ : J. Wiley & Sons, 2008.

4. Saaty T. L. Principia mathematica decernendi: Mathematical principles of decision making: generalization of the analytic network process to neural firing and synthesis. Pittsburgh, Pa: RWS Publications, 2010. 531 p.

5. Coddington M., Miller M., Katz J. Grid-Integrated Distributed Solar: Addressing Challenges for Operations and Planning, Greening the Grid. OSTI.GOV | OSTI.GOV. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1244310>.

6. Veremiichuk Y., Zamulko A., Zaichenko S., Mahnitko A., Berzina K., Zicmane I. "Analysis of Electric Energy Supply Security Attached to Renewable Energy Sources Implementation" X International Conference on Electrical and Power Engineering EPE 2018 Iași, Romania. October 18-19, 2018.
7. Belcher B., B.J. Petry, Davis T., K.. The effects of major solar integration on a 21-Bus system: technology review and PSAT simulations Conf. Proc. - IEEE SOUTHEASTCON (2017), 10.1109/SECON.2017.7925361.
8. Dong W, Bai X, Zhu N, Zhou Z, Li H. Discussion on the power quality under grid-connection of intermittent power sources. *Power Syst Technol* 2013;37 (5):1265–71.
9. Varma R, Salama M, Seethapathy R, Champion C. Large-scale photovoltaic solar power integration in transmission and distribution networks. In: *Proceedings of IEEE power and energy society general meeting: the electrification of transportation and the grid for the future*. Detroit, MI, USA; July 2011.
10. Lezhnyuk, P. Influence of solar power plants on consumer voltage of 0.4 kV / P. Lezhnyuk, O. Rubanenko, I. Gunko // *Energy: economics, technology, ecology: scientific journal*. -2015. - № 3 (41). - P. 7–13.
11. Tonkoski R., Lopes L. A. C., El-Fouly T. H. M. Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2011. Vol. 2, no. 2. P. 139–147. URL: <https://doi.org/10.1109/tste.2010.2098483>.
12. In 2020, the installed capacity of WPPs and SES increased by 41%, and their share in the structure of electricity production - doubled. Ukrenergo National Energy Company. URL: [https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi-vdvichi/?fbclid=IwAR20eN3fgZVw22mBs3rx\\_XS4JMCSMoFZccKWxpN3Ah-MC-NwQYS9\\_OklBvg](https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi-vdvichi/?fbclid=IwAR20eN3fgZVw22mBs3rx_XS4JMCSMoFZccKWxpN3Ah-MC-NwQYS9_OklBvg) (date of access: 05.05.2022).
13. In 2020, the installed capacity of WPPs and SES increased by 41%, and their share in the structure of electricity production - doubled. PJSC "NEK" Ukrenergo. URL: [https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi-vdvichi/?fbclid=IwAR20eN3fgZVw22mBs3rx\\_XS4JMCSMoFZccKWxpN3Ah-MC-NwQYS9\\_OklBvg](https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi-vdvichi/?fbclid=IwAR20eN3fgZVw22mBs3rx_XS4JMCSMoFZccKWxpN3Ah-MC-NwQYS9_OklBvg) (date of access: 14.05.2022).
14. Sagaidak I., Balagura O., Makarenko V. "Green" energy in the context of threats to economic and national security. *Economy and state*. 2020. № 6. P. 113-117. URL: <https://doi.org/10.32702/2306-6806.2020.6.113>.
15. Regulations on the imposition of special responsibilities on participants in the electricity market to ensure public interests in the functioning of the electricity market: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 05.06.2019 № 483. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/483-2019-п#Text>.
16. A Up-to-date information on settlements with electricity producers. SC "Guaranteed Buyer". URL: [https://www.gpee.com.ua/news\\_item/342](https://www.gpee.com.ua/news_item/342). (date of access: 14.05.2022).
17. Ukrainian Association of Renewable Energy (2020), "UARE position on the proposal to liquidate SE "Guaranteed Buyer", available at: [https://uare.com.ua/novyny/707\\$pozitsiya\\$uave\\$shchodo\\$propozitsiji\\$likvidatsiji\\$dp\\$garantovanijs\\$pokupets\\$2.html](https://uare.com.ua/novyny/707$pozitsiya$uave$shchodo$propozitsiji$likvidatsiji$dp$garantovanijs$pokupets$2.html).
18. Grid Influences From Reactive Power Flow of Photovoltaic Inverters With a Power Factor Specification of One / A. Spring et al. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016. Vol. 7, no. 3. P. 1222–1229. URL: <https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2413949>.
19. Beshelev S., Goodwich F. (1980). *Mathematical and statistic methods of expert assessments*. M.: Statisticians. P. 263.

Надійшла 20.06.2022  
Received 20.06.2022

## СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЛОКАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ У СКЛАДІ МІКРОМЕРЕЖ

У статті розглянуто питання щодо вибору оптимального варіанту електропостачання віддалених локальних енергетичних об'єктів у складі мікромережі та поза її межами. Наведено перелік основних споживачів електроенергії, в Україні – промисловість, населення та комунальні послуги, транспорт та інші. Проаналізовано основний розподіл енергетичних потоків споживання електроенергії та встановлено, що велика частка електричної енергії припадає саме на локальні енергетичні об'єкти, які стоять поряд із великими електротехнічними об'єктами.

Запропоновано та сформульовано терміну локального енергетичного об'єкту. Розроблено класифікацію об'єктів за такими категорійними ознаками, як: економіко - географічне положення, функціональне призначення, режим електропостачання, критерій ефективного керування, спосіб керування, тип виконуваної задачі, параметр споживання електричної енергії (потужність, рід струму), розмір об'єкту, вплив людини, форма власності, категорія електроприймачів.

Комплексно оцінено та проаналізовано переваги і недоліки децентралізованого в порівнянні з централізованим електропостачанням. Розглянуто основні типи систем автономного живлення та поза мережних систем електропостачання.

Наведено перелік переваг та недоліків, а також можливостей та загроз розвитку електропостачання локальних енергетичних об'єктів у складі мікромереж. До переваг увійшли: енергетична безпека, надійність, зменшення витрат на транспортування електроенергії, створення нових гнучких бізнес-моделей та нових учасників ринку електроенергетики, розвиток місцевого бізнесу / створення робочих місць, стимулювання розвитку використання відновлюваних джерел енергії. До основних недоліків увійшли: висока вартість систем, акумулювання енергії, ризики для інвесторів.

Для проведення аналітичних досліджень (аналізу) використано методологію SWOT - аналізу. Надано стратегічні напрямки необхідні для розвитку і поширення енергетичних інновацій в Україні у довгостроковій перспективі.

**Ключові слова:** локальний енергетичний об'єкт, класифікація локальних об'єктів, SWOT - аналіз мікромереж, баланс електроенергії, споживачі.

**Вступ.** Існуюча на сьогодні модель генерації та споживання електроенергії в Україні є недосконалою і в процесі реформації. Українська економіка споживає в середньому у 2-3 рази більше енергоресурсів від економіки країн ЄС. За даними інфографічного дослідження енергетичного сектору України станом на 2020р. значна частина споживання електричної енергії (33%) припадає на промисловість, така ж частка 33% - на населення та комунальні послуги, близько 4% дісталось транспорту (з них майже ≈90% це залізничний транспорт), 30% відводиться на інші потреби: 8% власні потреби генеруючих електростанцій, 11% - експорт, будівництво, та сільськогосподарські потреби, та 11% це втрати у процесі передачі електроенергії на значні відстані [1].

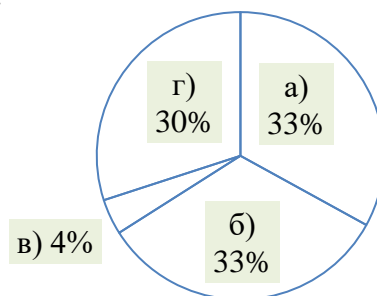


Рисунок 1 - Основні споживачі електричної енергії в Україні станом на 2020р.  
а) промисловість, б) населення та комунальні послуги, в) транспорт, г) інші.

Якщо відобразити це у одиницях вимірювання кількості потужності «кВт\*год» та навести діаграму представлену на рис.2, то видно, що суттєві втрати енергетика зазнає від технологічних втрат в тому числі її транспортуванні (16,5 млрд кВт\*год), власні потреби електростанцій (11,8 млрд кВт\*год) та споживання ГАЕС у насосному режимі (1,8 млрд кВт\*год), що у сумі сягає 30 млрд кВт\*год на рік.

Аналізуючи основний розподіл енергетичних потоків споживання електроенергії встановлено, що велика частка електричної енергії припадає саме на локальні енергетичні об'єкти (ЛЕО), які стоять поряд із великими електротехнічними об'єктами. І тому енергоефективне електропостачання цих об'єктів, в тому числі і, у складі мікромережі вкрай важливе питання сьогодення.

Значна увага в останні роки приділяється розробці систем електроживлення локальних об'єктів. Варто відмітити, що на даний час не існує сформульованого чіткого визначення для "локального енергетичного об'єкту". Для аналізу будь-якого питання чи явища необхідно перш за все дати визначення, окреслити чіткі межі досліджуваного.



Рисунок 2 - Баланс розподілу електроенергії між основними споживачами (дані 2019р.) [1]

**Мета та завдання. Мета.** Уточнити визначення терміну «локальний енергетичний об'єкт», за рахунок розкриття його сутності і змісту у складі енергомереж. З'ясувати стратегічні напрямки необхідні для розвитку і поширення енергетичних інновацій в Україні за участі мікромереж.

**Завдання.** Проаналізувати та встановити вимоги до визначення терміну локального енергетичного об'єкту, розробити класифікацію енергетичних об'єктів за різними класифікаційними ознаками. Обґрунтувати значення та сутність локальних енергетичних об'єктів у складі енергомереж. Провести комплексне оцінювання та аналізування переваг і недоліків мікромереж шляхом застосування методологій SWOT - аналізу.

**Матеріал та результати досліджень.** Термін "локальний (енергетичний) об'єкт" представляє інтерес з точки зору його теоретичного аналізу оскільки не має точного однозначного тлумачення, через те, що вивчається у різноманітних сферах науково-практичної діяльності. Складність формулювання визначення терміну пов'язане також з приналежністю його як до сфери науки, так і до сфери практики.

Для того щоб дати чітке визначення "локальному енергетичному об'єкту", було проведено аналіз і синтез термінів і визначень з даної області термінології, які зазначені у різних державних стандартах, законах і довідниках.

В першу чергу було розглянуто найбільш схожі визначення термінів таких як "об'єкт" (від лат. *objectum* — «предмет»), "об'єкт енергетики" - електрична станція (крім ядерної частини атомної електричної станції), електрична підстанція, електрична мережа, підключені до об'єднаної енергетичної системи України, а також котельня, підключена до магістральної теплової мережі, магістральна теплова мережа, споруда альтернативної енергетики тощо[2], "споживач електричної енергії". Крім того, також аналізувались такі терміни "локальний" (лат. *localis*, від *locus* – місце) місцевий, той, що не виходить за визначені межі[3], "інфраструктура" (від лат. *infra* – нижче, під і структура) основні установи та інститути, необхідні для функціонування економіки й суспільства[4], "Критично важливі об'єкти інфраструктури" [5], та інші.

На основі проведеного аналізу вказаних термінів можна сформулювати наступне визначення.

**Локальний енергетичний об'єкт** - це споруда, підприємство або їх сукупність, ділянка місцевості господарського або казенного значення, які розміщуються на певній території з електротехнічними комплексами, містять певну кількість джерел, навантажень та накопичувачів, мають або не мають зв'язок

з електричною мережею та виконують єдине завдання, як правило, пов'язане з забезпеченням технологічного процесу й життєдіяльності людей.

Об'єкти, в тому числі і ті, які приведені на рис.2, суттєво відрізняються і за своїм призначенням і за режимами роботи, і за іншими критеріями, тому для більш чіткого розуміння і візуалізації терміну запропоновано штучну класифікацію локальних об'єктів за різними характерними ознаками, яка наведена у таблиці 1. У статті запропоновано 12 категорійних ознак, таких як: економіко-географічне положення (місцезнаходження об'єкта) [6], функціональне призначення, критерій ефективного керування, спосіб керування [7], тип виконуваної задачі, параметр споживання електричної енергії (потужність, рід струму) [8], розмір об'єкту, вплив людини, форма власності [9], категорія електроприймачів.

Таблиця 1 - Класифікація локальних об'єктів

№	Класифікаційна ознака	Види локальних об'єктів
1.	Економіко - географічне положення	1. Наземні об'єкти 2. Морські об'єкти (підводні) 3. Космічні об'єкти
2.	Функціональне призначення	1. Промислові 2. Стратегічні об'єкти 3. Об'єкти військового призначення 4. Комунально побутові об'єкти (житлові будинки, спорткомплекси, готелі тощо) 5. Космічні станції 6. Морські заводи 7. Гірські споруди 8. Дослідні станції 9. Фермерські господарства 10. Об'єкти віддалені від основної мережі 11. Комерційні та ін.
3.	Режим електропостачання	1. Автономні; 2. Підключені до мережі
4.	Стратегія ефективного керування	1. Об'єкти типу "Ресурсоощадження" 2. Об'єкти типу "Економічність"
5.	Система керування	1. Централізована; 2. Децентралізована; 3. Комбінована
6.	Тип виконуваної задачі	1. Забезпечення життєдіяльності; 2. Забезпечення виробничого процесу
7.	Потужність споживання ел.ен.	1. до 10 кВт; 2. до 100кВт; 3. більше 100кВт
8.	Розмір об'єкту	1. Малий. Невелика площа, яка може контролюватися однією або кількома людьми (до 5 осіб) 2. Середній. Значна площа, яка потребує кількох і більше працівників штату (до 250 осіб) 3. Великий (понад 250 осіб штату)
9.	Вплив людини	1. Автоматизовані 2. Обов'язковий вплив - налагодження, керування, використання.
10.	Форма власності	1. Приватна 2. Колективна (кооперативна власність) 3. Державна (власність муніципалітету) 4. Власність інших держав 5. Власність міжнародних організацій та юридичних осіб інших держав
11.	Рід струму	1. Постійний струм; 2. Змінний струм
12.	Категорія електроприймачів	1. Електричні приймачі I категорії 2. Електричні приймачі II категорії 3. Електричні приймачі III категорії

Наведений перелік класифікаційних ознак не може претендувати на повноту опису всіх можливих характеристик, які певним чином роз'яснюють сутність та значення досліджуваного терміну. До розгляду може бути внесено низку інших показників та характеристик, або, навпаки, окремі з них можуть бути виключеними з розгляду залежно від глибини та рівня дослідження, а також переконань експертів.

У зв'язку з розвитком територіальних громад України створюються нові так звані ЛЕО, які потребують електроживлення для свого нормального функціонування. Вони можуть розташовуватись, як у центральних районах міста, так і на периферії. В обох випадках їхнє підключення до живлячої підстанції

не завжди є можливим, оскільки забезпечення живлення таких об'єктів ЛЕО в першу чергу пов'язане з потребою в прокладанні нових ліній електропередач або кабельних ліній від центральної електромережі, а це може бути або не можливим в плані реалізації або економічно не вигідним, тому в таких випадках варто застосовувати автономне живлення таких мікромереж.

В закордонній літературі так звані "Off-Grid Electricity systems" немережеві системи. Вони бувають двох типів: мікро- міні- наномережа ("micro- mini- nano-grids") та автономна система ("stand-alone systems") [7].

Мікромережа або міні чи наномережа являє собою ізольовану енергосистему, яка включає в себе дрібномасштабне виробництво електроенергії, яка живить локальні об'єкти ЛЕО, один або декілька, через свою розподільну мережу. Вона може працювати як в ізольованому режимі, так і від національної електромережі.

Автономні системи - це невеликі електричні системи, які не підключені до центральної системи розподілу електроенергії. В свою чергу можуть бути диференційованими на: *pico systems* (використовуються для живлення окремих приладів, наприклад телевізор, холодильник, освітлення тощо); *home systems* (використовуються для окремих цілих домогосподарств); *productive systems* (використовуються для живлення лікарень, об'єктів малого бізнесу, готелів, фабрик та інших).

**Переваги в порівнянні з національною енергетичною мережею.** Мікромережі і автономні системи в деяких випадках є більш конкурентоспроможними з точки зору витрат, ніж розширення національної мережі. Наприклад, сільські райони, що часто розташовані далеко від національної енергосистеми або у важкодоступній місцевості або на островах, прокладання ліній електропередач від національної енергосистеми у ці райони зазвичай є надзвичайно дорогим та технічно складним, у той час, як деякі системи є надійними, придатними і простими у використанні і адаптивними до місцевих потреб і умов. У разі відповідної підготовки персоналу вони також можуть керуватись місцевими технічними фахівцями, що в свою чергу призводить до місцевої зайнятості.

Наприклад, гірські і лісові райони, а також невеликі острови, які мають важкодоступний для машин доступ, вимагають більше часу і ресурсів для встановлення ліній електропередач, у той час, як окремі системи легші і дешевші у реалізації і можуть використовувати місцеві відновлювані джерела енергії для генерації електроенергії.

Щоб в комплексі оцінити та проаналізувати переваги і недоліки застосуємо метод SWOT-аналізу [11]. Дана методологія передбачає спочатку з'ясування переліку сильних і слабких сторін (внутрішні чинники), загроз і можливостей (зовнішні чинники), а потім встановлення зв'язків між ними, що надалі можуть бути використані для формування стратегії розвитку.

Нижче подано систематичний аналіз сильних, слабких сторін, загроз та можливостей мікромереж.

#### *1. Сильні сторони*

- енергетична безпека / надійність - мікромережі забезпечують безпечне, надійне електропостачання для споживачів або локальних об'єктів, де це може бути складним або критичним;
- альтернатива централізованому електропостачанню - порівняно з регіональною мережевою інфраструктурою, мікромережі можуть встановлюватись швидко та економічно;
- інтеграція відновлюваних джерел енергії - все більша кількість відновлюваної енергії може розміщуватись в менших масштабах, пристосованих до мікромереж;
- ефективність - втрати на загальну систему можуть бути зменшені шляхом більш чіткого розміщення та вирівнювання попиту та пропозиції на електроенергію;
- розвиток місцевого бізнесу / створення робочих місць - мікромережі генерують економічну цінність у межах сфери, яка їм служить;
- зменшення витрат на транспортування електроенергії із застосуванням розподіленої генерації, що може призводити до зниження тарифу для кінцевого споживача;
- створення нових гнучких бізнес моделей та нових учасників ринку електроенергетики, що стимулюватиме конкуренцію на ринку передачі та розподілу електроенергії;
- стимулювання розвитку відновлювальних джерел енергії із застосуванням сучасного тренду передових країн світу на впровадження високотехнологічних систем акумулювання електроенергії;
- можливість продажу надлишкової енергії в централізовану мережу, що стимулюватиме розвиток ринку балансувальних послуг;
- під час впровадження відповідного нормативно-законодавчого поля, відсутність взаємодії з обленерго та системним оператором при підключенні електроустановок до мікромереж, що зменшує як часові (відпадає необхідність погодження проміжних етапів робочого проекту та техніко-економічного обґрунтування схеми приєднання), так і капітальні витрати (можливість застосування нетипових схем живлення при споживачах III категорії з надійності) на підключення;
- гнучкість застосування мікромереж, а саме можливість підключення споживачів в дефіцитних або віддалених від основної мережі районах.

#### *2. Слабкі місця*

- вартість - фінансові зобов'язання на те щоб, спроектувати та побудувати мікромережу коштовними в переважній більшості;
- акумулювання енергії - ринок, який постійно розвивається та є залежним від природи, наприклад, існує широкий спектр рішень, але всі вони супроводжуються потенційно значними витратами та ризиком;
- складність - властива як при проектуванні та експлуатації мікромережі в цілому, так і при конструюванні мікромережі для конкретного застосування / місця розташування;
- інформаційна обізнаність - відсутність інформації про розроблення та експлуатацію мікромереж в межах загальнодоступності;
- нормативні питання - відсутність стандартних експлуатаційних процедур, стандартів якості та будівельних стандартів, характерних для мікромереж, а також норм взаємозв'язку з навколишньою (централізованою) мережею;
- технічні знання - відповідні технічні спеціальні знання важко отримати та зберегти на місцевому рівні;
- ризик для інвесторів - невизначеність щодо продуктивності мікромережі, поведінки користувачів тощо зменшує інвестиції у мікромережі;
- відсутність відповідного нормативно-законодавчого поля в Україні для стимулювання розвитку таких мереж, наприклад неможливість отримання "зеленого тарифу" для електростанцій, що працюють на ВДЕ у випадку роботи в "острівному" режимі;
- у більшості випадків, мікромережі мають нижчу надійність, ніж об'єднана енергетична система, тому доцільно їх застосування для живлення споживачів III категорії надійності, оскільки відповідальність за перерви в електропостачанні при цьому будуть лежати на власниках таких мереж.

### *3. Можливості*

- зниження витрат на технологію - технології відновлюваної енергетики та енергозбереження продовжують швидко розвиватися та знижувати витрати;
- краще розуміння технології - всі аспекти проектування та експлуатації мікромереж, виникають з широкого спектру експериментальних проектів;
- автоматизація - проектування та експлуатація мікромереж все більше автоматизується за допомогою використання вдосконаленого / користувацького програмного забезпечення
- політика - уряди все частіше визначають мікромережу як потенційне рішення різних питань, що веде до підтримки політикою у вигляді регуляторної реформи та надання грантової допомоги;
- зростання цін на електроенергію - підвищить інтерес та привабливість розподіленої генерації енергії;
- зростає ціна на дизельне паливо - у міру збільшення вартості дизельного палива вдосконалюється сектор відновлюваної енергетики.
- модернізація мереж - забезпечує більш сприятливе середовище для мікромереж, а також поступово сприяє розширенню (збільшенню) мікромереж;

### *4. Загрози*

- переваги інвесторів - для проектів з відомими фінансовими показниками, що підтримуються встановленими операторами електромереж у певному регуляторному та політичному середовищі
- заборона мікромереж - через потенційну загрозу, що мікромережу становлять модель комунального бізнесу, неадекватні або невідповідні стандарти / регулювання та недостатнє розуміння мікромереж загалом
- прийняття / поведінка споживачів - залучення потенційних користувачів до розробки стандартів пропозиції (якості та надійності), структури тарифів та управління попитом є викликом для економічно ефективного та успішного проектування та експлуатації мікромереж [10].

Економіка України відзначається підвищеним рівнем енергомісткості валового внутрішнього продукту, у порівнянні з європейськими країнами та іншими країнами з перехідною економікою. Витрати стають все більш помітними через зростання вартості імпорту, відсутності енергетичної безпеки та стратегії, не конкурентоспроможності галузей промисловості та екологічним аспектом. Таким чином, підвищення рівня енергоефективності необхідно як з економічної, так і з екологічної точки зору.

Проте розуміння існуючих бар'єрів на шляху підвищення рівня енергоефективності в Україні є важливим для розробки послідовної та ефективної політики [12].

Аналіз показує, що причини низької енергоефективності можна згрупувати у двох напрямках:

- (1) Надмірне регулювання ринку, яке заважає нормальному функціонуванню енергетичного ринку;
- та (2) відсутність заходів щодо стимулювання енергоефективності.

Розв'язання проблеми надмірного регулювання енергетичних ринків може бути важливим чинником для підвищення рівня енергоефективності. Звичайно, поки ціни на енергоносії в Україні штучно занижені, домогосподарства та компанії не матимуть стимулів інвестувати в енергоефективні заходи та утримуватися від нецільового використання енергії. Таким чином, план дій щодо підвищення рівня енергоефективності має бути спрямований на:



- подальше дерегулювання та усунення викривлення цін на енергетичних ринках.
- ціноутворення має бути прозорим результатом переговорів між учасниками ринку, а не адміністративним втручанням.
- перехід ринкової влади від кількох державних вертикально інтегрованих компаній до конкурентних гравців ринку.

Окрім можливості ліберального функціонування ринків, держава має визначити подальші шляхи підвищення рівня енергоефективності. Такі заходи мають усунути ринкові недосконалості та збої, які заважають домогосподарствам і компаніям ефективно використовувати енергоносії. Зокрема, можна виділити такі заходи:

- розв'язати проблему недосконалості інформації шляхом запровадження обов'язкового маркування, енергоаудиту, прозорості та передбачуваної енергетичної політики, консультування з енергозбереження тощо.

- забезпечити додаткове довгострокове фінансування шляхом співфінансування, гарантій по кредитах, зниження вартості кредитів, податкових пільг тощо.

чітке визначення прав власності в секторі житлової нерухомості.

- встановити ринкову ціну на рівні, що включає вартість завданої екологічної шкоди та інші зовнішні витрати на використання енергії.

Неналежне регулювання ринку та підвищення рівня енергоефективності шляхом усунення недоліків ринку вимагає узгодженої стратегії енергетичної політики, включаючи визначення спільної мети та більш конкретних цілей, які узгоджуються із загальними цілями. Відкриті, прозорі та чіткі цілі сприятимуть підвищенню передбачуваності економічної політики, що створює впевненість у плануванні довгострокових інвестицій в енергоефективні технології.

Україні необхідно оцінити, які заходи економічної політики є вигідними для ЛЕО, а також для суспільства в цілому.

#### **Висновки**

1. З урахуванням розподілу основних енергетичних потоків споживання електроенергії, сформульовано та уточнено визначення терміну «локальний енергетичний об'єкт», розкрито його сутність, зміст та значення у складі енергомереж, яке допомагає охарактеризувати основних суб'єктів енергетики.

Створена класифікація локальних енергетичних об'єктів, де за 12-тма класифікаційними ознаками упорядковано та зведено до таблиці їхні види.

2. За рахунок проведеного SWOT- аналізу виявлено переваги й недоліки, та визначено загрози і можливості мікромереж. Основними з переваг мікромереж в умовах нарощування потужностей поновлюваної енергетики є: мінімізація втрат при передаванні електроенергії на великі відстані, розвантаження електромережі та мінімізація додаткових мережевих будівництв. З недоліків варто відзначити низьку надійність та дороговизну резервування енергії. А однією з кращих можливостей для розвитку мікромереж в Україні може стати покращене законодавство у сфері поновлюваної енергетики.

#### **Список використаної літератури**

1. Інфографічний довідник. Енергетика України 2020 року трансформація та Євроінтеграція, 11.03.2020р. : [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://reform.energy/presentations>

2. Закон України "Про землі енергетики та правовий режим спеціальних зон енергетичних об'єктів" від 09.07.2010 № 2480-VI

3. Словник іншомовних слів за ред. О. С. Мельничука. — 2-е видання, випр. і доп. Київ: Головна редакція «Українська радянська енциклопедія» (УРЕ), 1985 — 966 с.

4. «Універсальний Словник - Енциклопедія» (УСЕ): 4-те видання, виправлене і доповнене — Львів: ТЕКА, 2006. 1432 сторінок, близько 23500 статей, 3270 ілюстрацій, фото, карт, схем, таблиць.

5. Закон України «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України» від 5 жовтня 2017 року № 2163-VIII

6. Паламарчук О. М. Економіко - географічне положення / Географічна енциклопедія України. Том 1. — К.: Українська енциклопедія, 1989.

7. Draft дослідження "Мікромережі: світовий досвід та можливості для України", А. Зінченко, Ю. Усенко, В. Бутюк, О. Михайленко. 2017 р. : [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://issuu.com/andrijzinchenco/docs/grids/15>

8. Буслова Н.В. "Аналіз доцільності використання мікромереж", Буслова Н.В., Примаченко О.О., [Електронний ресурс]: «Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики». – Київ: ФЕА КІП ім. Ігоря Сікорського, 2017. – Ст. 146-151.

9. Класифікація форм власності. Держстандарт України; Класифікатор від 22.11.1994 № 288

10. Mini-grid Policy Toolkit. Policy and Business Frameworks for Successful Mini-grid Roll-outs. Michael Franz, Nico Peterschmidt, Michael Rohrer, Bozhil Kondev. Eschborn, 2014.

11. Абалонин С. SWOT-анализ деятельности предприятия / С. Абалонин - Маркетинг № 6, 1999. – 109 с.

12.Ф. Майсснер. Підвищення енергоефективності в Україні: зменшення регулювання та стимулювання енергозбереження / Ф.Майсснер, Д. Науменко, Й.Радеке//Інститут економічних досліджень та політичних консультацій. Берлін/Київ, 2012р.[Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://www.ier.com.ua/files/publications/Policy\\_papers/German\\_advisory\\_group/2012/PP\\_01\\_2012\\_ukr.pdf](http://www.ier.com.ua/files/publications/Policy_papers/German_advisory_group/2012/PP_01_2012_ukr.pdf)

**A. Khotian**, Ph.D. student, ORCID 0000-0003-1676-0752

**V. Rozen**, Dr. Sc. Science, prof., ORCID 0000-0002-0440-4251

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

## **STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF LOCAL ENERGY OBJECTS WITHIN MICROGRIDS**

**Goal.** Clarify the definition of the term "local energy object", by disclosing its essence and content in the energy network. To find out the strategic directions necessary for the development and dissemination of energy innovations in Ukraine with the participation of microgrids.

**Task.** Analyze and establish requirements for determining the term of a local energy object, develop a classification of energy objects according to different classification criteria. Justify the importance and essence of local energy objects in the power grid. Conduct a comprehensive assessment and analysis of the advantages and disadvantages of microgrids through the use of SWOT - analysis methodologies.

**The result of the study.** The article proposes and formulates the definition of the term of the local energy object. The classification of objects is developed by such categorical features as: economic - geographical position, functional purpose, power supply mode, criterion of effective management, method of management, type of performed task, parameter of electric energy consumption (power, type of current), size of object, human influence, form of ownership, category of electric receivers. The advantages and disadvantages, as well as opportunities and threats to the development of power supply of local objects as part of microgrids are presented. SWOT analysis methodology was used to conduct analytical research (analysis).

**Scientific novelty** consists in the introduction into scientific circulation of a new term, such as "local energy object", as well as in the disclosure of its essence, content and meaning.

**Conclusions and practical significance.** The definition of the term "local energy object" is clarified, its essence, content and meaning in the composition of energy networks are revealed, which helps to characterize the main subjects of energy. The strategic directions necessary for the development and dissemination of energy innovations in Ukraine in the long run are provided.

**Keywords:** local energy object, classification of local objects, SWOT - analysis of microgrids, energy balance, consumers, energy saving, energy efficiency.

1. Infographic guide. Energy of Ukraine 2020 transformation and European integration, March 11, 2020 : [Electronic resource] - Access mode: <http://reform.energy/presentations>

2. Law of Ukraine "On Energy Lands and the Legal Regime of Special Zones of Energy Facilities" of July 9, 2010 № 2480-VI

3. Dictionary of foreign words, ed. O.S. Melnychuk. - 2nd edition, corr. and ext. Kyiv: Main Editorial Office of the Ukrainian Soviet Encyclopedia (URE), 1985 - 966 p.

4. "Universal Dictionary-Encyclopedia" (ALL): 4th edition, corrected and supplemented - Lviv: TEKA, 2006. 1432 pages, about 23,500 articles, 3270 illustrations, photos, maps, diagrams, tables.

5. Law of Ukraine "On Basic Principles of Cyber Security of Ukraine" of October 5, 2017 № 2163-VIII

6. Palamarchuk O.M. Economic and geographical position / Geographical Encyclopedia of Ukraine. Volume 1. - Kyiv: Ukrainian Encyclopedia, 1989.

7. Draft study "Microgrids: world experience and opportunities for Ukraine", A. Zinchenko, Yu. Usenko, V. Butyuk, O. Mykhaylenko. 2017: [Electronic resource] - Access mode: <https://issuu.com/andrijzinchenko/docs/grids/15>

8. Buslova N.V. "Analysis of the feasibility of using microgrids", Buslova N.V., Primachenko O.O., [Electronic resource]: "Modern problems of electric power engineering and automation". - Kyiv: FEA KPI them. Igor Sikorsky, 2017. - Art. 146-151.

9. Classification of forms of ownership. State Standard of Ukraine; Classifier dated 22.11.1994 № 288

10. Mini-grid Policy Toolkit. Policy and Business Frameworks for Successful Mini-grid Roll-outs. Michael Franz, Nico Peterschmidt, Michael Rohrer, Bozhil Kondev. Eschborn, 2014.

11. Abalonin S. SWOT-analysis of the enterprise / S. Abalonin - Marketing № 6, 1999. - 109 p.

12. F. Meissner. Improving energy efficiency in Ukraine: reducing regulation and stimulating energy saving / F. Meissner, D. Naumenko, J. Radeke // Institute of Economic Research and Policy Consulting. Berlin / Kyiv, 2012 [Electronic resource] - Access mode: [http://www.ier.com.ua/files/publications/Policy\\_papers/German\\_advisory\\_group/2012/PP\\_01\\_2012\\_ukr.pdf](http://www.ier.com.ua/files/publications/Policy_papers/German_advisory_group/2012/PP_01_2012_ukr.pdf)

Надійшла 2.06.2022

Received 2.06.2022

# SMART GRID СИСТЕМИ І ТЕХНОЛОГІЇ

## SMART GRID SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

УДК 621.314:657

DOI 10.20535/1813-5420.2.2022.261374

І.Ю. Бойко, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-8044-137X

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

### ПРОТОТИП ПРИСТРОЮ РОЗРАХУНКУ ДИНАМІЧНОЇ ВАРТОСТІ ОДИНИЦІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

З метою впровадження гнучкої динамічної тарифікації споживачам необхідно мати здатність динамічної відповіді, яка визначається на основі постійного контролю впливу зворотного зв'язку між постачальником та споживачами електроенергії на зміну значень параметрів навантаження. Розумні сенсорні технології дозволяють об'єднаний електроенергетичній системі постачати електроенергію більш ефективно за допомогою динамічного аналізу попиту і пропозиції. Реалізувати завдання відстеження споживаної кожним користувачем електроенергії з метою дотримання умови макроекономічного балансу та динамічної оптимізації механізму тарифікації електроенергії пропонується за допомогою використання концепції розумного лічильника.

Метою дослідження є розробка системи для гнучкого динамічного визначення вартості одиниці електроенергії кожного генератора у складі локальної ізольованої SmartGrid. При відхиленні обсягу генерованої енергії від деякого рівня, встановленого для даного інтервалу часу має виконуватись щосекундний розрахунок нової тарифної вартості одиниці електроенергії. Кожен споживач під'єднаний до лічильника, який реєструє зміну обсягу отриманої електроенергії у динамічному режимі. Лічильник містить вбудований мікропроцесор та обладнаний радіо - модулем для реєстрації та обміну даними із підсумовуючим мікроконтролером, який виконує функції розрахунку загального обсягу спожитої електроенергії. А також частину електроенергії, внесеної конкретним генератором. Для розрахунку вартості одиниці електроенергії кожного генератора у складі енергосистеми та сумарної вартості електроенергії, що генерується щосекундно всіма генераторами запропоновано використання третього мікроконтролера із вбудованим мікропроцесором та радіо - модулем.

У результаті виконане моделювання роботи запропонованого пристрою на прикладі системи з одним генератором продемонструвало адекватну його роботу відповідно теоретичним положенням.

**Ключові слова:** SmartGrid, енергогенеруюча система, динамічна тарифікація, розумний лічильник, мікроконтролер, пристрій розрахунку.

**Вступ.** Останнім часом відмічається все більш широке розповсюдження локальних енергогенеруючих систем, які передбачають створення на певній території власних енергомережових структур, здатних працювати в тому числі автономно (Microgrid). Для таких локальних енергогенеруючих систем, таких як комбіновані системи на базі відновлювальних джерел енергії у поєднанні із дизельними генераторами, які об'єднуються у віртуальні електростанції задля участі у загальному енергоринку, прийнята наразі концепція тарифікації є такою, що не відображає дійсну вартість електроенергії [1]. Для забезпечення енергоефективності таких систем необхідно вбачається відмова від встановлених наразі статичних тарифів на електроенергію у вигляді грн/кВт · год [2] на користь більш гнучкої тарифікації, у якій заради виконання умови макроекономічного балансу у енергогенеруючій системі [3] перерахунок нової вартості одиниці електроенергії у грн/Вт · с виконується щосекундно, в залежності від рівня споживаної електроенергії [4].

Для впровадження гнучкої динамічної тарифікації споживачам необхідно мати здатність динамічної відповіді, яка визначається на основі постійного контролю впливу зворотного зв'язку між постачальником та споживачами електроенергії на зміну значень параметрів навантаження. Хоча наразі обладнання для цього легко доступне, теоретичні моделі і програмне забезпечення досі відсутні. В результаті досліджень [5, 6] були розроблені інтегровані моделі реагування споживачів та теорія прогнозування тарифної ціни в динамічних умовах, що створюються за допомогою динамічного ціноутворення на електроенергію.

Інтегровані моделі включені до структури орієнтованих інженерних моделей, які забезпечують реалізацію ціноутворення в режимі реального часу [6]. У роботі [7] представлено стратегію централізованого керування енергогенеруючою системою у складі Microgrid, за допомогою ціноутворення

в реальному часі. Для подальшого розвитку моделі необхідно врахувати динамічну зміну навантаження і відповідні перехідні процеси. Розумні сенсорні технології дозволяють об'єднаний електроенергетичній системі постачати електроенергію більш ефективно за допомогою динамічного аналізу попиту і пропозиції [8].

Реалізувати завдання відстеження споживаної кожним користувачем електроенергії з метою дотримання умови макроекономічного балансу та динамічної оптимізації механізму тарифікації електроенергії пропонується за допомогою використання концепції розумного лічильника (Smart Energy Meter, SEM). SEM – це електричний пристрій, що має мікросхему лічильника енергії для вимірювання спожитої електроенергії та бездротовий протокол для передачі даних [9]. Використання SEM у складі раніше згаданої Microgrid автоматично перетворює дану локальну енергосистему на SmartGrid [10]. У цьому лічильнику використана енергія та відповідна кількість буде постійно відображатися на РК-дисплеї та передаватися до мікроконтролеру наступного рівня. Запропонована система замінює традиційні методи зчитування лічильників і забезпечує віддалений доступ виробника електроенергії до існуючого лічильника. Також він може регулярно контролювати показання лічильників без відвідування кожного будинку.

Для реалізації можливості застосування динамічної тарифікації із врахуванням наявності перехідних процесів при зміні обсягу генерованої електроенергії та врахування умови економічного балансу актуальним є застосування концепції пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії [11]. Дана робота описує хід розробки прототипу пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії, за допомогою якого реалізується функція корегування тарифної вартості одиниці електроенергії. Також, споживач на основі отриманих даних про зміну тарифної вартості може приймати рішення про корегування рівня споживання електроенергії. Такий прототип може вважатися SEM.

**Мета та завдання дослідження.** Для досягнення дотримання умови макроекономічного балансу у енергогенеруючій системі виконати проектування та моделювання роботи прототипу розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії. Створений раніше алгоритм для динамічного визначення вартості одиниці електроенергії [12] у системі з кількома енергогенераторами було використано у ході розробки прототипу пристрою розрахунку.

**Модель розрахунку електроенергії.** Прототип пристрою розрахунку рівня генерованої електроенергії генератором електроенергії однофазної мережі із мікроконтролером  $MK_i$ , де  $i$  – номер генератора у складі SmartGrid, може бути виконано на базі мікросхеми Arduino Uno [13], який містить у собі мікропроцесор ATmega328P [14]. Для передачі інформації про обсяг спожитої електроенергії до підсумовуючого мікроконтролера  $MK_\Sigma$  використовується радіо - модуль NRF24L01+ [15], запрограмований на передачу необхідних даних. Мікроконтролер  $MK_\Sigma$  також виконано на базі Arduino Uno із модулем NRF24L01+, налаштованим на прийом та передачу даних. Схему під'єднання пристрою розрахунку до однієї фази виділено у блоці  $PP_i$  на рис.1.

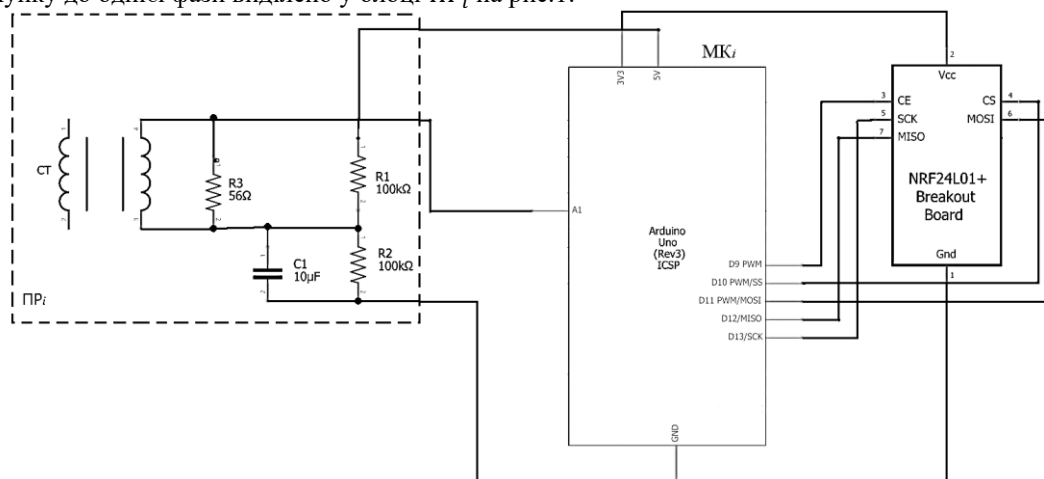


Рисунок 1 – Спрощена схема пристрою розрахунку з радіо - модулем

Побудова пристрою розрахунку на базі Arduino Uno основана на методиці, викладеної у [16], з тією відмінністю, що до контактів D9 PWM, D10 PWM/SS, D11 PWM/MOSI, D12/MISO, D13/SCK, 3V3, GND мікроконтролера  $MK_i$ , під'єднано радіо - модуль. Складники схеми пристрою розрахунку наведено нижче:

- 1.плата Arduino Uno із мікроконтролером ATmega328P;
- 2.трансформатор струму (СТ, current transformer);
- 3.шунтуючий резистор R3, 56 Ом;

4. подільник напруги на двох резисторах  $R_1$ ,  $R_2$ , 100 кОм;
5. конденсатор  $C_1$ , 10 мкФ;
6. радіо - модуль NRF24L01+.

Пристрій розрахунку  $PP_i$  під'єднується до контактів A1, 5V, GND мікроконтролера  $МК_i$ .

Arduino Uno має лише аналогові входи напруги, які вимірюють 0 – 5 В постійного струму, тому вихідний струм від СТ, (current transformer), необхідно перетворити в еталон напруги, а потім масштабувати еталон напруги в діапазон 0 – 5 В. Для відстеження струму на виході генератора вихідна обмотка СТ, (current transformer), під'єднана до одного із кабелів живлення (обраної фази).

У наведеній моделі в якості трансформатора струму – СТ, (current transformer), використовується Talema AC1030, який працює з номінальним струмом 30А і максимальним – 75А. При 220 В змінного струму СТ протягом коротких періодів часу може працювати на потужності 16,5 кВт а постійно на 6,6 кВт, що підходить для невеликого домогосподарства.

Для розрахунку опору шунтуючого резистору  $R_3$  врахуємо, що коефіцієнт трансформації СТ = 1000. Враховуючи рекомендації методики викладеної у [16] і приймаючи струм первинної обмотки рівним 42А визначаємо значення  $R_3 = 59,5$  Ом і обираємо найближче стандартне значення 56 Ом [16].

Ємність конденсатора  $C_1 = 10$  мкФ. Дільник напруги  $R_1 = R_2 = 100$  кОм.

Радіо - модуль NRF24L01+ забезпечує наступні параметри:

1. Бездротовий зв'язок;
2. Швидкість передачі даних, до 2 Мб / с;
3. Режим роботи (приймач / передавач) можна змінювати в процесі роботи;
4. Висока перешкодозахищеність. Дані в пакетах приймаються з перевіркою CRC;
5. Контроль доставки даних. Приймач відправляє передавачу сигнал підтвердження прийому даних (без зміни режиму роботи);
6. Можливість вибору одного з 128 каналів зв'язку. Крок кожного каналу дорівнює 1 МГц (від 2,400 ГГц до 2,527 ГГц);
7. Можливість одночасної роботи до 6 передавачів на одному каналі.

Для функціонування пристрою розрахунку генерованої електроенергії та радіо - модуля NRF24L01+ складено код на мові C++ [17], завантажений за допомогою середовища Arduino IDE до вбудованого мікропроцесора ATmega328P. Програмне забезпечення Arduino з відкритим кодом (IDE) дозволяє легко писати код і завантажувати його у мікропроцесор і використовувати з будь-якою платою Arduino [18]. Схема пристроїв розрахунку для інших генераторів, працюючих у складі SmartGrid має вигляд, аналогічний до наведеного на рис.1.

Код для функціонування інших пристроїв розрахунку також аналогічний до коду для мікроконтролера першого пристрою розрахунку, з відмінністю у ідентифікаторі передавача.

Схему мікроконтролера  $МК_2$  наведено на рис.2. Для живлення мікроконтролера використовується акумулятор напругою 5В, під'єднаний до контактів мікроконтролера 5V, GND.

Програмний код на мові C++ для функціонування мікроконтролера для прийому даних про спожиту електроенергію, розрахунку і передачі даних для подальшого визначення вартості одиниці електроенергії кожного генератора було завантажено за допомогою середовища Arduino IDE до вбудованого мікроконтролера ATmega328P. Схема мікроконтролера  $МК_C$  де виконується розрахунок вартості одиниці електроенергії  $C_i$  для кожного генератора та сумарна вартість електроенергії, що генерується щосекундно обома генераторами  $C_2$  аналогічна до наведеної на рис. 2. Програмний код для функціонування мікроконтролера де виконується розрахунок вартості одиниці електроенергії для кожного генератора та сумарна вартість електроенергії, що генерується щосекундно обома генераторами було складено на мові C++ та завантажений вбудованого мікропроцесора мікроконтролера  $МК_C$ .

#### **Модель роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії**

Для побудови схеми пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії та симуляції його роботи обрано середовище TinkerCAD [19], безкоштовна онлайн-колекція програмних засобів, створена на основі Autodesk, лідера в галузі 3D-дизайну, інженерного та розважального програмного забезпечення. Розділ розробки електричних схем якого містить необхідні плати Arduino Uno та деяку частину апаратних модулів для складання проектів на їх основі.

Зважаючи, що TinkerCAD не підтримує трансформатор струму, генератор сигналів був використаний для створення прикладу сигналу на вході пристрою розрахунку. Величини опору резисторів  $R_1, R_2, R_3$  та ємності конденсатора  $C_1$  дорівнюють параметрам відповідних елементів у секції  $PP_i$  на рис.1.

Для відображення середньоквадратичного струму на вході пристрою розрахунку та розрахованого значення обсягу електроенергії на базі середньоквадратичної потужності до кожної Arduino Uno під'єднано модель LCD дисплею роздільної здатності (16x2). Контакти LED+, VDD, DB7, DB6, DB5, DB4, E, RS, та VSS LCD дисплею під'єднані до контактів 5V, D7 PWM, D6 PWM, D5 PWM, D4, D9 PWM, D8 та GND мікроконтролера  $МК_1$  відповідно. Яскравість дисплею регулюється за допомогою додаткового потенціометра з опором 10 кОм, під'єднаний до контактів VD дисплею та 5V, GND мікроконтролера  $МК_1$ .

Також, для задання необхідної напруги живлення LCD дисплею додано резистор  $R_4$  з опором 220 Ом [16], під'єднаний до контактів LED+ дисплею та 5V мікроконтролера МК<sub>1</sub>. Спрощену схему пристрою розрахунку з LCD дисплеєм роздільної здатності (16x2) та генератором сигналів під'єднаним до шунтуючого резистора R3 зображено на рис. 3.

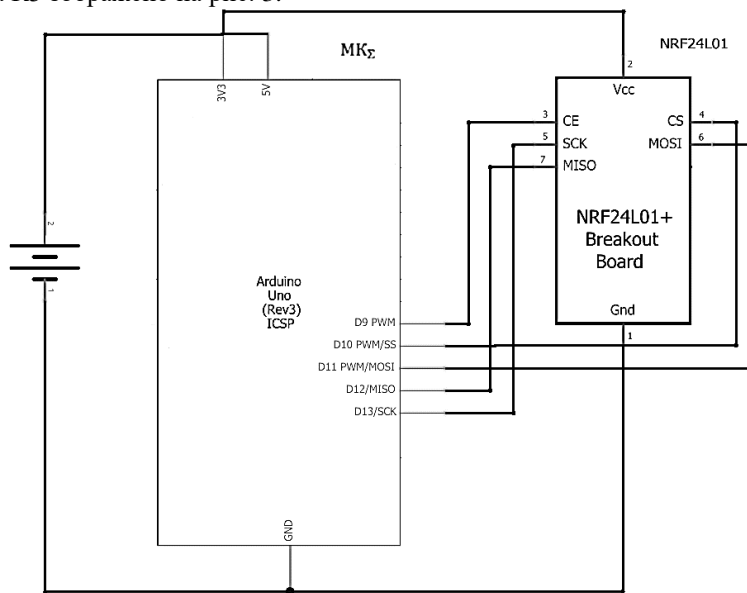


Рисунок 2 – Спрощена схема мікроконтролера для прийому даних і визначення вартості електроенергії

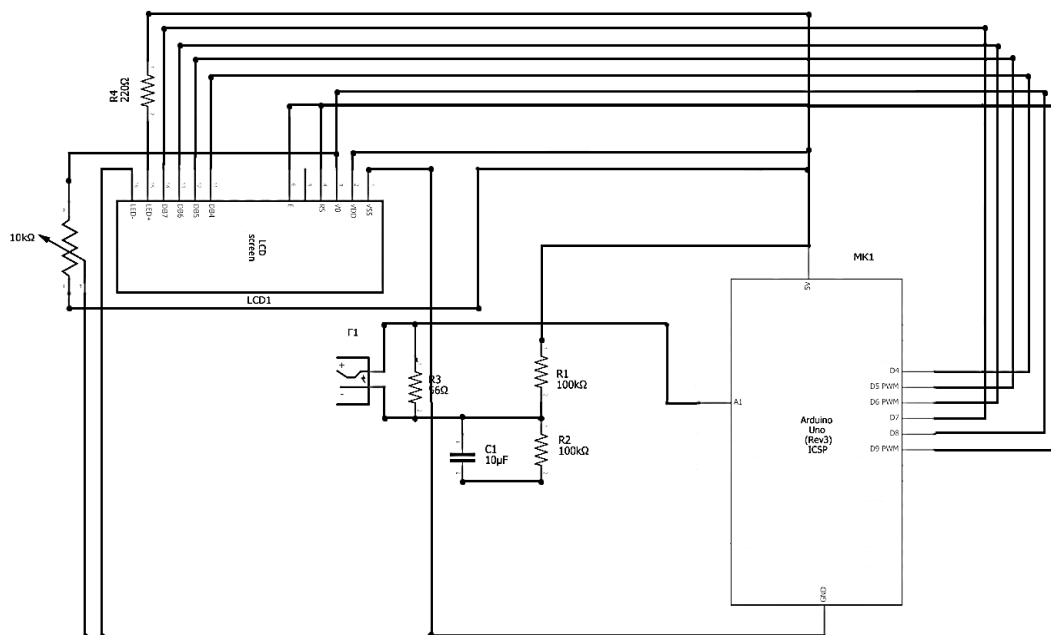
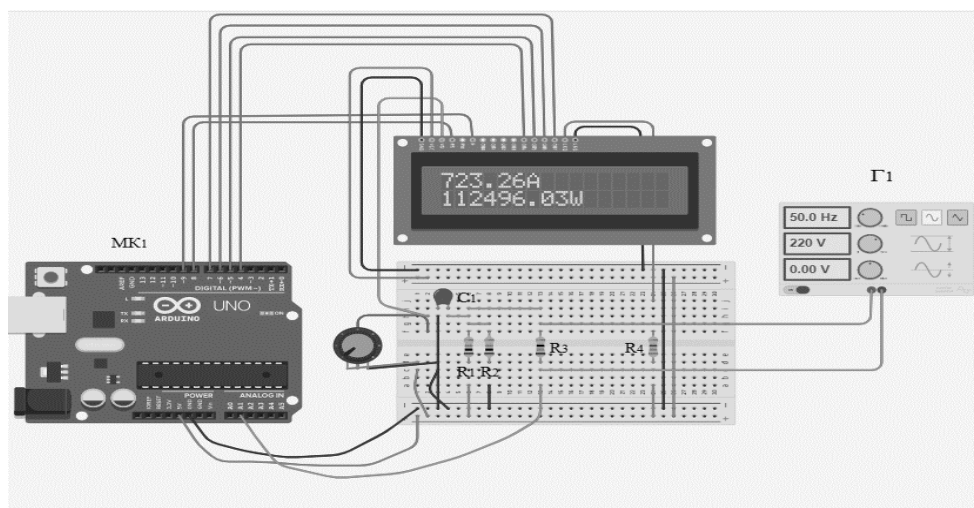


Рисунок 3 – Спрощена схема пристрою розрахунку електроенергії

Моделі роботи пристрою розрахунку першого генератора у складі SmartGrid наведено на рис. 4.

Перший рядок LCD дисплею відображає середньоквадратичний струм на виході генератора, тоді як другий рядок – рівень електроенергії.

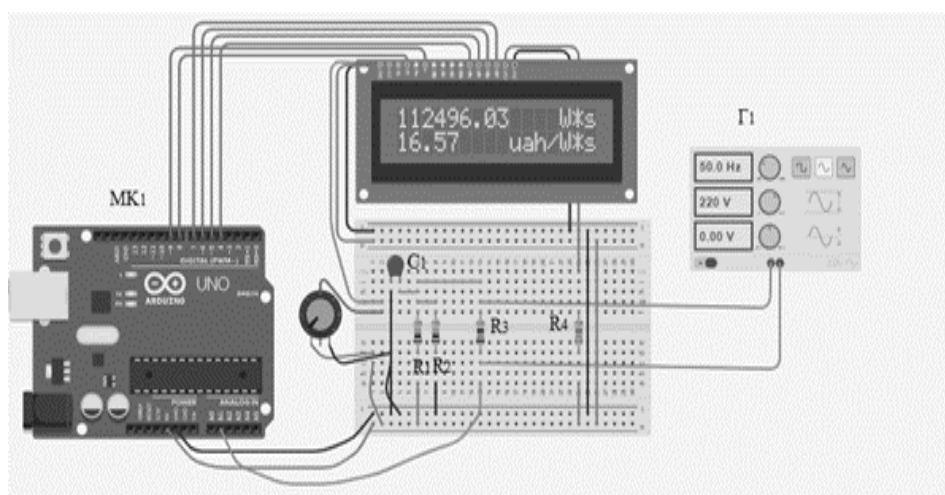
Програмний код для мікроконтролера пристрою розрахунку з LCD – дисплеєм було складено на мові C++ та завантажено до вбудованого мікропроцесора. Параметри генератора сигналу Г<sub>1</sub> наведено у табл. 1.

Рисунок 4 – Модель роботи пристрою розрахунку на мікроконтролері МК<sub>1</sub>

Таблиця 1 – Параметри генератора сигналу.

Джерело сигналу	Напруга, В	Частота, Гц	Напруга зсуву, В
Г <sub>1</sub>	220 В	50 Гц	0 В

Через відсутність у середовищі TinkerCAD емуляції радіо - модулю NRF24L01+ для реалізації можливості передачі даних від пристроїв розрахунку, та складність реалізації дротової передачі інформації між більше ніж двома платами Arduino прийняте наступне рішення. Для демонстрації роботи алгоритму щосекундного розрахунку вартості одиниці електроенергії дизель-генератора запропоновано поєднати програмно у код мікроконтролера пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії МК<sub>*i*</sub> де *i* – номер генератора, функції: пристрою розрахунку генерованої електроенергії ПР<sub>*i*</sub>; мікроконтролера МК<sub>Σ</sub> для розрахунку кількості отриманої електроенергії за 1с.; мікроконтролера МК<sub>с</sub> для розрахунку вартості одиниці електроенергії *C<sub>i</sub>* для кожного генератора. Результати симуляції роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії для генератора Г<sub>1</sub> наведені на рис. 5. Перший рядок LCD дисплею відображає електроенергію, отриману від генератора за цю секунду, а другий рядок – її вартість. Програмний код для роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії для генератора Г<sub>1</sub> було складено на мові C++ та завантажено до вбудованого мікропроцесора.

Рисунок 5 – Результат симуляції роботи пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії генератора Г<sub>1</sub>

Представлена модель пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії має свої переваги, так як при програмному поєднанні функцій всіх мікроконтролерів у код одного МК<sub>*i*</sub> можна скоротити кількість плат з трьох до однієї. Але втрачається можливість обміну даними між мікроконтролерами пристроїв розрахунку і загальним підсумовуючим пристроєм, а отже можливість дослідження вкладу кожного генератора у загальний об'єм виробленої електроенергії і розрахунку її вартості.



Для моделювання роботи більшої кількості генераторів із пристроями розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії необхідно внести зміни в програмний код мікропроцесора кожного пристрою розрахунку. У випадку практичної реалізації необхідно також внести зміни в програмний код мікроконтролерів МК<sub>Σ</sub> та МК<sub>с</sub>.

**Висновки.** Для виконання алгоритму динамічної тарифікації запропоновано технічну реалізацію прототипу пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії на базі мікропроцесора ATmega326p для щосекундного розрахунку вартості одиниці електроенергії, що дозволяє реалізувати на практиці запропоновані теоретичні положення розрахунку динамічної тарифікації. Запропонована схема підсумовуючого пристрою, розраховуючого об'єм спожитої кожним користувачем електроенергії, та схема пристрою який виконує розрахунок вартості одиниці електроенергії і дозволяє розраховувати вклад кожного генератора у сумарне значення тарифної вартості, з відповідним визначенням вартості електроенергії по кожному генератору. Проведене моделювання розрахунку електроенергії на прикладі системи з одним генератором показало адекватну роботу пристрою розрахунку динамічної вартості одиниці електроенергії відповідно теоретичним положенням.

#### **Список використаної літератури**

1. Постанова Кабінету Міністрів України №1325 від 28.12.2020 р.
2. Тарифи на електроенергію в 2021 році. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://index.minfin.com.ua/>
3. Michael D. Bordo. Equation of exchange // The New Palgrave: A Dictionary of Economics, 1987, v. 2, pp. 175–77.
4. Zhuikov V.Y., Boiko I.Y., Denysiuk S.P. Model of dynamic tariffing Microgrid's electricity consumption in local energy markets // Science and Education a New Dimension. IX (31), Issue 250, 2021 Feb. – pp. 46-49.
5. David A.K., Lee Y.C. Dynamic tariffs: theory of utility-consumer interaction // IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 3, August 1989.
6. Goran Koreneff, Anssi Seppala, Matti Lehtonen, Veikko Kerkkonen, Erkki Laitinen, Jukka Helli, Erkki Anttila. Electricity spot price forecasting as a part of energy management in de-regulated power market // Energy Management and Power Delivery, 1998.
7. Jie Chen, James S. Thorp, Robert J. Thomas, Timothy D. Mount. Locational Pricing and Scheduling for an Integrated Energy-Reserve Market // System Sciences, 2003.
8. Inam Ullah Nutkani, Wang Peng, Poh Chiang Loh, Frede Blaabjerg. Autonomous Economic Operation of Grid Connected DC Microgrid // 2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems.
9. V. Preethi and G. Harish. Design and implementation of smart energy meter // 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT) – 26-27 Aug. 2016
10. Jixuan Zheng, David Wenzhong Gao and Li Lin. Smart Meters in Smart Grid: An Overview // 2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech) – 4-5 April 2013
11. Бойко І. Ю. Динамічна тарифікація у системі електроживлення: автореф. дис. канд. техн. наук: 05. 09. 03. Київ, 2021. 20 с.
12. Свідчення про реєстрацію авторського права на науковий твір «Застосування просюмерів на локальному рівні Smart Grid та врахування алгоритму динамічної тарифікації» № 101337 від 21 грудня 2020 р.
13. Arduino Older Boards. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.arduino.cc/en/main/boards/>
14. ATmega328P. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/atmega328p/>
15. Single Chip 2.4GHz Transceiver. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nordicsemi.com/Products/Low-power-short-range-wireless/nRF24-series/>
16. Michael Klements. Simple Arduino Home Energy Meter. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.the-diy-life.com/simple-arduino-home-energy-meter/>
17. Bjarne Stroustrup. "The C++ Programming Language (Fourth Edition)". 2012-12-09.
18. Arduino IDE 1.8.15. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.arduino.cc/en/software/>
19. TinkerCAD Autodesk. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tinkercad.com/>

**I. Boiko, Ph.D, ORCID 0000-0002-8044-137X**

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

#### **PROTOTYPE OF THE CALCULATION DEVICE OF DYNAMIC COST OF THE BASIC PART OF ELECTRICITY**

*In order to implement flexible dynamic billing, consumers need to be able to respond dynamically, which is determined by constantly monitoring the impact of feedback between the supplier and consumers of electricity*

on changes in the values of load parameters. Smart sensor technologies allow a unified power supply system to supply electricity more efficiently through dynamic analysis of supply and demand. It is proposed to implement the task of tracking the electricity consumed by each user in order to comply with the conditions of macroeconomic equilibrium and dynamic optimization of the pricing mechanism for electricity using the concept of smart meters.

The aim of the study is to develop a system for flexible dynamic determination of the cost of the basic part of electricity for each generator in the local isolated SmartGrid. If the volume of generated energy deviates from a certain level set for a given time interval, a new calculation of the new tariff value per basic part of electricity must be performed every second. Each consumer is connected to a meter, which registers the change in the amount of electricity received in a dynamic mode. The meter contains a built-in microprocessor and is equipped with a radio module for registration and data exchange with a summarizing microcontroller, which performs the functions of calculating the total amount of electricity consumed. As well as part of the electricity supplied by a particular generator. To calculate the cost of basic part of electricity for each generator in the power system and the total cost of electricity generated every second by all generators, the using of a third microcontroller with built-in microprocessor and radio module is proposed. As a result, the simulation of the proposed device on the example of a system with one generator demonstrated its adequate operation in accordance with the theoretical provisions.

**Key words:** SmartGrid, energy generation system, dynamic billing, smart meter, microcontroller, calculation device.

#### References

1. The Cabinet of Ministers of Ukraine, decree №1325. (2020, Dec. 28).
2. Electricity tariffs in 2021. [Online]. Available: <https://index.minfin.com.ua/>. Accessed on: Mar. 13. 2022.
3. Michael D. Bordo. Equation of exchange // The New Palgrave: A Dictionary of Economics, 1987, v. 2, pp. 175–77.
4. Zhuikov V.Y., Boiko I.Y., Denysiuk S.P. Model of dynamic tariffing Microgrid's electricity consumption in local energy markets // Science and Education a New Dimension. IX (31), Issue 250, 2021 Feb. – pp. 46-49.
5. David A.K., Lee Y.C. Dynamic tariffs: theory of utility-consumer interaction // IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 3, August 1989.
6. Goran Koreneff, Anssi Seppala, Matti Lehtonen, Veikko Kekkonen, Erkki Laitinen, Jukka Heli, Erkki Antila. Electricity spot price forecasting as a part of energy management in de-regulated power market // Energy Management and Power Delivery, 1998.
7. Jie Chen, James S. Thorp, Robert J. Thomas, Timothy D. Mount. Locational Pricing and Scheduling for an Integrated Energy-Reserve Market // System Sciences, 2003.
8. Inam Ullah Nutkani, Wang Peng, Poh Chiang Loh, Frede Blaabjerg. Autonomous Economic Operation of Grid Connected DC Microgrid // 2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems.
9. V. Preethi and G. Harish. Design and implementation of smart energy meter // 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT) – 26-27 Aug. 2016
10. Jixuan Zheng, David Wenzhong Gao and Li Lin. Smart Meters in Smart Grid: An Overview // 2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech) – 4-5 April 2013
11. I. Boiko, "Dynamic tariffication in the power supply system," Ph.D. thesis, "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, 2021.
12. M. Rybiy and I. Boiko, « Application of prosumers at the local level Smart Grid and taking into account the algorithm of dynamic billing». Appl. 101337, Dec. 21, 2020.
13. Arduino Older Boards. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/main/boards/> Accessed on: Mar. 13. 2022.
14. ATmega328P. [Online]. Available: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/atmega328p/> Accessed on: Mar. 13. 2022.
15. Single Chip 2.4GHz Transceiver. [Online]. Available: <https://www.nordicsemi.com/Products/Low-power-short-range-wireless/nRF24-series/> Accessed on: Mar. 13. 2022.
16. Michael Klements. Simple Arduino Home Energy Meter. [Online]. Available: <https://www.the-diy-life.com/simple-arduino-home-energy-meter/> Accessed on: Mar. 13. 2022.
17. Bjarne Stroustrup. "The C++ Programming Language (Fourth Edition)". 2012-12-09.
18. Arduino IDE 1.8.15. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/software/> Accessed on: Mar. 13. 2022.
19. TinkerCAD Autodesk. [Online]. Available: <https://www.tinkercad.com/> Accessed on: Mar. 13. 2022.

Надійшла 16.03.2022

Received 16.03.2022

# ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN POWER ENGINEERING

УДК 621.039.51

DOI 10.20535/1813-5420.2.2022.261376

В.А. Халімончук, д.т.н., ORCID 0000-0002-9285-661X

М.М. Паламарчук, магістрант, ORCID 0000-0002-4187-9256

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ КСЕНОНОВИХ КОЛИВАНЬ ПОТУЖНОСТІ В РЕАКТОРАХ ВВЕР-1000 В ОДНОМІРНІЙ АКСІАЛЬНІЙ ГЕОМЕТРІЇ

В статті представлені результати досліджень ксенонових коливань з використанням розробленого алгоритму на основі методу адіабатичного моделювання повільних перехідних процесів в ядерних енергетичних реакторах. Суть методу полягає в тому, що просторова складова щільності потоків нейтронів визначається з рішення стаціонарних рівнянь транспорту нейтронів, а часова залежність зводиться до зміни параметрів (перерізів взаємодії нейтронів) рівнянь транспорту нейтронів відповідно до змін концентрацій  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ .

У цій роботі пропонується використовувати одновимірну (аксіальну) модель у двогруповому дифузійному наближенні для дослідження перехідних процесів ксенону. Тому впливом запізнілих нейтронів в цьому випадку можна знехтувати. Вважається, що всі нейтрони миттєві, оскільки час життя як миттєвих, так і запізнілих нейтронів значно менший у порівнянні з характерним часом ксенонового перехідного процесу. Дифузійне рівняння базується на рівнянні балансу, в якому швидкість зміни щільності нейтронів в часі визначається генерацією, поглинанням та витоком нейтронів в одиниці об'єму активної зони. Диференціальні рівняння, що використані для розрахунку просторово-часової поведінки поля нейтронів в об'ємі активної зони, розраховуються чисельно, кінцево-різницевою способом та аналітично. Нейтронно-фізичні константи кожного аксіального шару визначають усередненням з урахуванням кількості та типів тепловиділяючих збірок відповідно до завантаження активної зони, що розглядається. Константи типів ТВЗ є попередньо розраховані з використанням спектрального коду HELIOS.

В результаті роботи отримано алгоритм для фізичного розрахунку реактора ВВЕР-1000 в одновимірній аксіальній геометрії, проведено валідацію розробленої програми, здійснено низку розрахунків перехідних процесів та розглянута можливість використання розробленої програми для оптимізації ксенонового перехідного процесу.

**Ключові слова:** ксеноновий перехідний процес, реактивність, щільність потоку нейтронів, вододіяні реактори, математичне моделювання перехідних процесів, ксенонові аксіальні коливання потужності

**Вступ.** Дослідження перехідних і аварійних режимів експлуатації енергетичних реакторів є одним з найважливіших завдань в аналізі безпеки АЕС. Як правило, в цих режимах відбувається просторовий перерозподіл ряду параметрів активної зони, що призводить у багатьох випадках до несиметричного просторово-часового розподілу поля енерговиділення в активній зоні. З урахуванням роботи реактора в автоматичному режимі підтримання потужності просторові деформації можуть відбуватися без зміни інтегральних величин, але бути настільки значними, що локальні питомі значення потужності, або локальні значення різних параметрів активної зони можуть перевищувати встановлені експлуатаційні межі, або межі безпечної експлуатації [1].

Оцінка безпеки експлуатації енергетичних реакторів в ксенонових перехідних процесах є актуальною задачею. Зазвичай АЕС працюють в базовому режимі, але іноді постає необхідність регулювання генеруючої потужності, або можуть виникати нештатні ситуації в роботі АЕС, що супроводжуються перехідним процесом. Сьогодні існує ряд програмних кодів для аналізу безпеки АЕС, але тільки коди, які враховують просторову кінетику активної зони (наприклад, DYN3D) в змозі адекватно оцінити стан реактора в перехідних процесах. Яка модель просторової кінетики (три-, дво- чи одновимірної) може бути використаною, залежить від дослідження конкретного ксенонового процесу.

Нині проведено багато досліджень по управлінню полем енерговиділення, аксіальним офсетом та аксіальними ксеноновими коливаннями в активній зоні реактора ВВЕР-1000. Так, дослідження, які проводилися в [1, 2] та були виконані за допомогою DYN3D показали нетривіальність розробки графіків переміщення СУЗ та зміни концентрації борної кислоти для компенсації реактивності з забезпеченням допустимого значення аксіального офсету. Вже на цій стадії було показано складність моделювання цих процесів за допомогою DYN3D, що в основному пов'язано з відсутністю в алгоритмі DYN3D визначення положення ОР СУЗ для забезпечення критичності. Тому виникла необхідність створення простішої моделі для дослідження методів компенсації реактивності в ксенонових перехідних процесах.

В рамках роботи, результати якої представлені нижче, був розроблений розрахунковий алгоритм дослідження ксенонових аксіальних коливань потужності та виконана оцінка його якості й точності з визначення аксіального офсету, що в подальшому може бути використаним в дослідженнях режимів управління маневруванням потужністю на енергоблоках ВВЕР-1000.

**Математична модель.** Нині при вивченні просторової динаміки енергетичних реакторів на теплових нейтронах найчастіше використовується двогрупова дифузійна модель активної зони. В цій роботі пропонується використати одновимірну (аксіальну) модель транспорту нейтронів у двогруповому дифузійному наближенні для дослідження ксенонових перехідних процесів. Тому впливом запізнілих нейтронів в цьому випадку можна знехтувати. Вважається, що всі нейтрони миттєві, оскільки час життя як миттєвих, так і запізнілих нейтронів значно менший у порівнянні з характерним часом ксенонового перехідного процесу. Дифузійне рівняння базується на рівнянні балансу, в якому швидкість зміни щільності нейтронів в часі визначається генерацією, поглинанням та витоком нейтронів в одиниці об'єму АкЗ. Для визначення просторово-часового розподілу щільностей потоків нейтронів використано адіабатичне наближення. Суть цього підходу полягає в тому, що просторова складова поля нейтронів визначається з рішення стаціонарних рівнянь транспорту, а часова залежність враховується за допомогою зміни параметрів (перерізів взаємодії нейтронів) рівнянь транспорту нейтронів відповідно до змін концентрацій  $^{135}\text{Xe}$ , густини та температури теплоносія, температури палива. Стаціонарні рівняння, які використовуються для знаходження просторового розподілу щільності потоку нейтронів у двогруповому дифузійному наближенні мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \nabla D^{(1)} \cdot \nabla \Phi^{(1)} - \Sigma_a^{(1)} \cdot \Phi^{(1)} - \Sigma_{1 \rightarrow 2} \cdot \Phi^{(1)} + \sum_{g=1}^2 \nu \Sigma_{f,g} \cdot \Phi_g &= 0 \\ \nabla D^{(2)} \cdot \nabla \Phi^{(2)} - \Sigma_a^{(2)} \cdot \Phi^{(2)} + \Sigma_{1 \rightarrow 2} \cdot \Phi^{(1)} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Позначення нейтронно-фізичних констант в цих рівняннях є загальноприйнятими в літературі з фізики реакторів [3].

Для вирішення рівнянь (1) потрібно щоб система була критичною (стаціонарною), це можливо, коли дифузійні константи розмножуючого середовища знаходяться в строгому балансі з геометричними розмірами. При цьому щільність потоку нейтронів буде стаціонарною лише у випадку, коли дифузійні константи розмножуючого середовища чітко забезпечують критичність. Якщо цього немає, то завжди можна підібрати таке число коефіцієнта розмноження ( $K_{\text{eff}}$ ), при якому нормування джерела нейтронів в першому рівнянні (1) на нього дозволить отримати стаціонарний стан системи. Тоді двогрупові дифузійні рівняння для стаціонарного стану будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned} \nabla D^{(1)} \cdot \nabla \Phi^{(1)} - \Sigma_a^{(1)} \cdot \Phi^{(1)} - \Sigma_{1 \rightarrow 2} \cdot \Phi^{(1)} + \frac{1}{K_{\text{eff}}} \cdot \sum_{g=1}^2 \nu \Sigma_{f,g} \cdot \Phi_g &= 0 \\ \nabla D^{(2)} \cdot \nabla \Phi^{(2)} - \Sigma_a^{(2)} \cdot \Phi^{(2)} + \Sigma_{1 \rightarrow 2} \cdot \Phi^{(1)} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Оцінка впливу зворотного зв'язку за концентрацією  $^{135}\text{Xe}$  на аксіальний розподіл енерговиділення передбачена шляхом коригування залежності макроскопічного перерізу поглинання нейтронів кожної розрахункової ноди в тепловій області у вигляді:

$$\Sigma_{a,0}^2(r,t) = \Sigma_{a,0}^2(r) + \sigma_{\text{Xe}} \cdot X_{\text{e}}(r,t),$$

де  $\Sigma_{a,0}^2$  – макроскопічний перетин поглинання нейтронів теплової групи в розрахунковій ноді без концентрації ядер  $^{135}\text{Xe}$ ,  $\sigma_{\text{Xe}}$  – мікроскопічний переріз поглинання нейтронів одним ядром ксенону, а  $X(r,t)$  – концентрація ядер ксенону в окремій ноді для відповідного моменту часу перехідного процесу, що може бути визначеною з рівнянь кінетики ксенону:

$$\begin{aligned} \frac{dX_{\text{e}}(t)}{dt} &= \lambda_i I(t) + \gamma_x (\Sigma_{f,1} \Phi_1 + \Sigma_{f,2} \Phi_2) - \lambda_x X_{\text{e}}(t) - \sigma_{x,2} X_{\text{e}}(t) \Phi_2 \\ \frac{dI(t)}{dt} &= \gamma_i (\Sigma_{f,1} \Phi_1 + \Sigma_{f,2} \Phi_2) - \lambda_i I(t) \end{aligned} \quad (3)$$

де  $X_{\text{e}}$  і  $I$  – концентрації ядер ізотопів  $^{135}\text{Xe}$  і  $^{135}\text{I}$ ;  $\lambda_i = 2.9 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  і  $\lambda_x = 2.11 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  – постійні розпаду  $^{135}\text{Xe}$  і  $^{135}\text{I}$ ;  $\gamma_i = 0.056$  і  $\gamma_x = 0.003$  – вірогідності появи ядер  $^{135}\text{Xe}$  і  $^{135}\text{I}$  на один акт ділення.

У цих рівняннях використано припущення, що  $^{135}\text{I}$  має малий переріз поглинання і тим самим його вигоранням нехтується. Крім того, прийнято, що  $^{135}\text{I}$  є безпосереднім продуктом ділення, хоча насправді він з'являється в результаті радіоактивного  $\beta$ -розпаду ізотопу  $^{135}\text{Te}$ , що є його попередником. Виправданням такого підходу є дуже малий час життя  $^{135}\text{Te}$ , що складає 2 хвилини.

Для розрахунку рівнянь (2) використовується кінцево-різницевий перехід до системи алгебраїчних рівнянь і їх розв'язок ітераційним способом з розподілом ітерацій на внутрішні та зовнішні. Нейтронно-фізичні константи кожного аксіального шару визначаються усередненням з урахуванням кількості та типів ТВЗ відповідно до завантаження активної зони, що входять до складу кожного аксіального шару з урахуванням нейтронно-фізичних констант кожного з типів ТВЗ попередньо підготовлених спектральним кодом HELIOS в залежності від аксіального розподілу глибини вигорання, температури палива та теплоносія, густини теплоносія і концентрації борної кислоти.

У внутрішньому ітераційному процесі розрахунку аксіального розподілу щільностей потоків нейтронів розподілене джерело генерації нейтронів підтримується постійним, а  $K_{\text{eff}}$  визначається як відношення сумарного джерела розрахованого для завершеної зовнішньої ітерації до його значення на початку зовнішньої ітерації. Рішення кінцево-різницевих рівнянь отримується в відносних одиницях з точністю до значень постійного множника, тому для визначення розмірності щільності потоку нейтронів в абсолютних значеннях виконується нормування щільності потоку нейтронів на рівень потужності реактора. Розв'язок рівнянь (3) передбачено аналітичним способом. Оскільки в роботі виконується розрахунок в одновимірній геометрії, то для врахування витоку нейтронів в радіальному напрямку вводиться поправка в макропереріз поглинання нейтронів у швидкій та тепловій групах через баклінг системи  $B_{1,2}^2 = 1/\Phi_{1,2} \cdot \Delta\Phi_{1,2}$ . За допомогою баклінга враховується витік нейтронів в напрямках, що не розглядаються в даній моделі. Це виконано в програмі шляхом введення поправки до макроперерізу поглинання нейтронів для швидкої та теплової груп у вигляді:

$$\Sigma_a^{1,2} = \Sigma_a^{1,2} + D_{1,2} \cdot \frac{1}{\Phi_{1,2}} \cdot \Delta\Phi_{1,2}$$

**Результати досліджень.** В даній статті розглянуто перехідний процес зниження потужності реактора ВВЕР-1000 стрибком від номінального рівня потужності до 50%. Моделювання відбувається таким чином, що вся активна зона зводиться до розрахунку однієї осередненої ТВЗ, тому на номінальному рівні потужність становить 18,4 МВт (відповідає потужності реактора 3000 МВт), а перехід відбувається стрибком на потужність 9,2 МВт.

У всіх дослідженнях, що розглядаються тут, стаціонарний вихідний стан розраховано з урахуванням зворотного зв'язку за теплогідравлічними параметрами, нерівномірним впливом отруєння  $^{135}\text{Xe}$  та  $^{149}\text{Sm}$ . Моделювання перехідного процесу здійснене при постійних теплогідравлічних параметрах активної зони та концентрації  $^{149}\text{Sm}$  на протязі всього процесу, які відповідають стаціонарному стану реактора. Також у вихідному стані визначається значення критичної концентрації борної кислоти, та відбувається врахування радіального витоку нейтронів у першій та другій енергетичній групі на основі розрахунку радіальних баклінгів.

Розроблена модель валідована на одному з розрахунків стаціонарного стану порівнянням аксіального розподілу енерговиділення з аналогічними результатами, отриманими з використанням тривимірної програми DYN3D. Порівняння виконано для першого завантаження 2 енергоблоку ХАЕС в стаціонарному стані з номінальним рівнем потужності та введеними в активну зону стрижнями регулюючої групи в положенні 80% від низу активної зони. Щільність потоку нейтронів розраховується з умов нормування на рівень потужності реактора, водночас не враховувалось, що частина енерговиділення в активній зоні відбувається не через ділення, а шляхом залишкового енерговиділення, що пов'язано з розпадом продуктів ділення. Однак, валідація програми проводилася на свіжій активній зоні і тому такий підхід повністю виправданий. Результати валідації показані на рисунку 1.

Результати досліджень самого перехідного процесу зі 100% на 50% рівень потужності на стані активної зони з глибиною вигорання  $15\text{MBt} \cdot \text{дб/кгU}$  представлено на рисунках 2÷4. Як видно з отриманих результатів крива  $t=0$  на рис. 2÷4 відповідає роботі ядерного реактора в стаціонарному стані на номінальній потужності. При цьому найбільше значення щільності потоку нейтронів, енерговиділення та концентрації ядер йоду і ксенону спостерігається в центрі активної зони. Невелике зміщення максимального значення щільності потоку нейтронів та енерговиділення до низу (Рис.2÷3) пояснюється зануреними органами регулювання у верхній частині АкЗ. Далі в процесі зниження потужності щільність нейтронного потоку зменшується, що призводить до перерозподілу концентрації ядер ксенону (Рис.4) і, як наслідок, ксеноновим коливанням потужності рисунки 5 та 7. Такі аксіальні коливання поля нейтронів без врахування в розрахунках дії зворотного зв'язку за теплогідравлічними параметрами доволі суттєві і завдяки зміщенню максимуму щільності потоку нейтронів по висоті активної зони значно впливають на величину аксіального витоку нейтронів і опосередковано на характер зміни середньої в активній зоні концентрації ядер  $^{135}\text{Xe}$  та  $K_{\text{eff}}$  (рис.6).

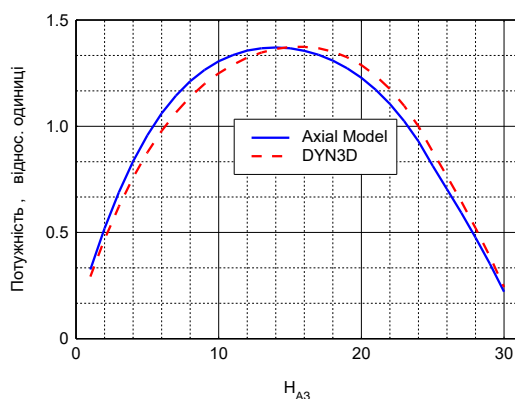


Рисунок 1 – Аксіальний розподіл енерговиділення визначений розробленою програмою та за допомогою тримірного коду DYN3D

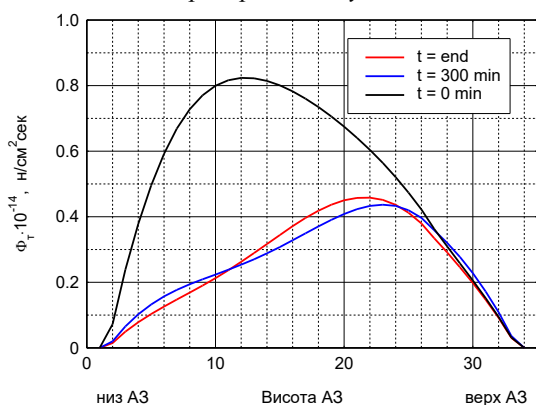


Рисунок 2 – Часовий розподіл щільності потоку нейтронів по висоті активної зони з вигоранням палива 15 МВт діб/кг

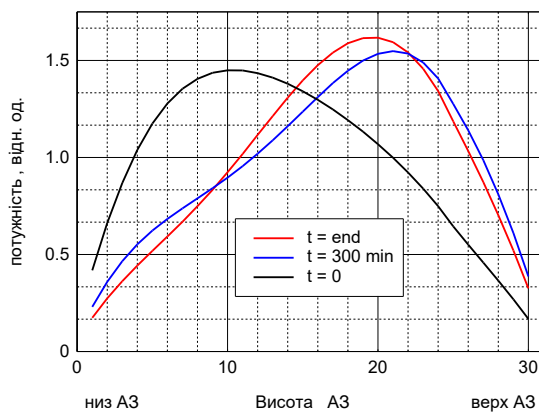


Рисунок 3 – Часовий розподіл енерговиділення по висоті активної зони з вигоранням палива 15 МВт діб/кг

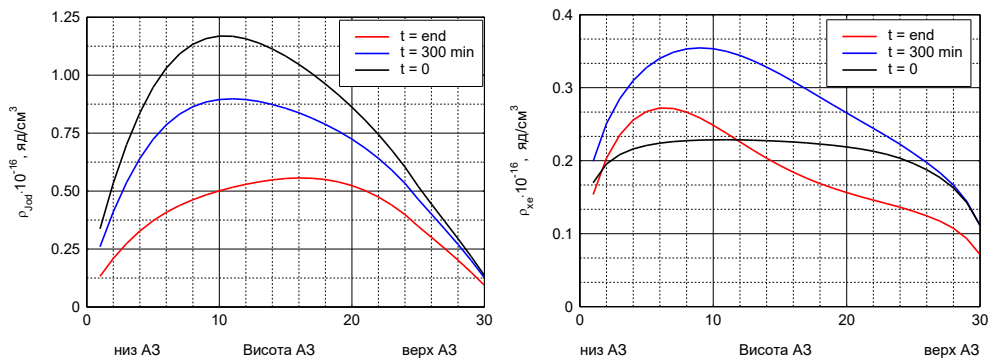


Рисунок 4 – Часовий розподіл концентрації йоду та ксенону по висоті активної зони за глибини вигорання палива 15 МВт діб/кг

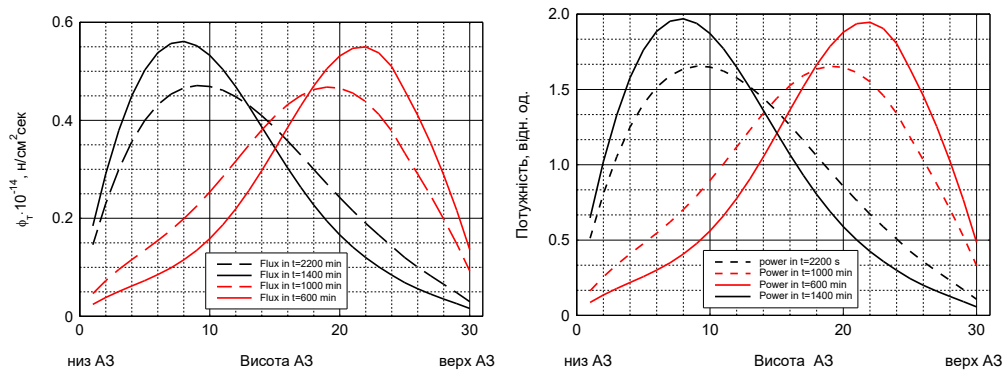
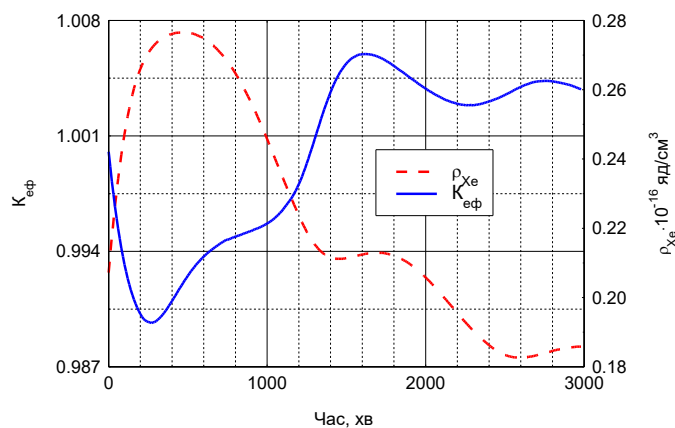


Рисунок 5 – Ксенонові коливання потужності. Глибина вигорання АкЗ 15 МВт діб/кгU

Рисунок 6 – Часова поведінка  $K_{\text{эф}}$  та середньої по активній зоні концентрації ядер  $^{135}\text{Xe}$  Глибина вигорання АкЗ 15 МВт діб/кгU

Така поведінка ефективного коефіцієнта розмноження та середньої по активній зоні концентрації ядер  $^{135}\text{Xe}$  (див. рисунок 6) може бути зумовлена лише суттєвою аксіальною деформацією щільності потоку нейтронів (див. рисунок 5), що впливає на аксіальний витік нейтронів. Слід сказати, що в стані активної зони з глибиною вигорання 0 МВт-діб/кгU коливання аксіального розподілу поля нейтронів значно менші у порівнянні з наведеними на Рисунок 4. Як видно з рисунка 7, в перехідному процесі зниження потужності при глибині вигорання АкЗ як 0, так і 15 МВт-діб/кгU спостерігаються значні аксіальні коливання офсету. Причому на вигорівших станах АкЗ вони мають слабо затухаючий характер, але амплітуда цих коливань набагато більша, ніж в стані зі свіжим паливом, для якого характер є гармонічним. Тому важливою задачею в ксенонових перехідних процесах є компенсація ксенонових коливань потужності за допомогою керуючих впливів (введення ОР СУЗ чи здійснення водообміну) з боку оператора для забезпечення стійкості реактора.

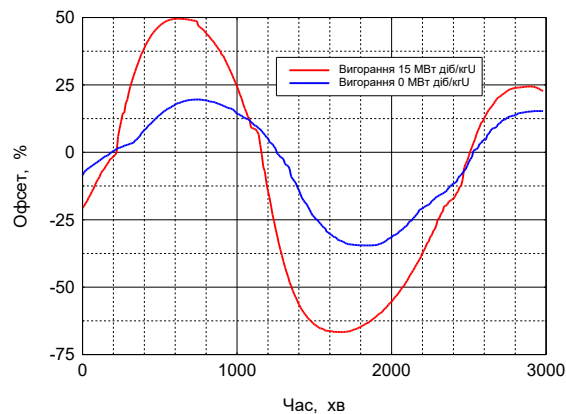


Рисунок 7 – Порівняння аксіального офсету при глибині вигорання 0 та 15 МВт діб/кгU



На кінець слід відмітити, що у зв'язку з меншою інтенсивністю ксенонових коливань потужності на свіжих станах, в перехідних процесах зниження потужності, у порівнянні з їх протікання на станах з вигорівшою АкЗ, в ході ксенонового перехідного процесу на стадії розотруєння зникають коливання  $K_{\text{эф}}$ . (Рисунок 8).

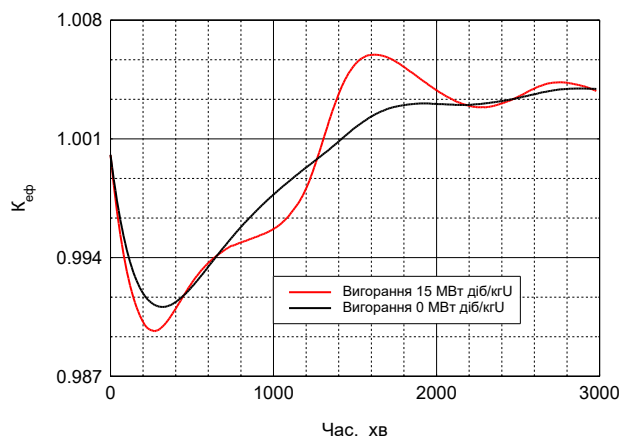


Рисунок 8- порівняння часової зміни  $K_{\text{эф}}$  на станах АкЗ з різною глибиною вигорання

### Оптимізація зупинки реактора

В дослідженнях ксенонових перехідних процесів виникають випадки з оптимізації їх реалізації. Ця проблема якісно розглянута, в ряді публікацій, наприклад, [4÷7]. Такі задачі в математичному плані достатньо складні і з використанням просторових моделей реакторів практично не вирішуються. Як правило, в постановці оптимізаційної задачі формулюється цільова функція (функціонал) і знаходиться пошук відповідних умов з управління енергорозподілом в активній зоні, що забезпечує мінімальне або максимальне значення функціонала. За звичай цільова функція є нелінійною і її пошук реалізується на основі одного з методів нелінійного програмування, наприклад, метод градієнтного спуску.

В даному розділі розглянуто можливість використання розробленої програми для визначення оптимального режиму зупинки реактора з точки зору скорочення за часом тривалості йодної ями. Оптимізація ксенонового перехідного процесу розглядалася для першого завантаження другого блоку ХАЕС. В розрахунку на протязі всього перехідного процесу був врахований вплив зворотних зв'язків як за концентрацією ксенону, так і за теплогидравлічними параметрами. Крім цього у вихідному стані враховувався зворотний зв'язок за концентрацією  $^{149}\text{Sm}$ , зміна якої на протязі процесу не враховувалась.

Нижче на рисунку 9 представлено оптимальний режим зупини реактора, який виконаний методом евристичного підбору, та наведена поведінка ефективного коефіцієнта розмноження в такому режимі. В оптимальному режимі зупинки реактора пропонується знизити потужність до 15% від номінального значення, попрацювати на цьому рівні 400 хв (за цей час реактор попадає в йодну яму), далі підвищити потужність до 100% (відбувається випалювання нейтронами ксенону) й через деякий час зменшити її до 0. Такий режим зупини реактора дає змогу зменшити вдвічі ширину йодної ями за часом (див. порівняння  $K_{\text{эф}}$  на рисунку 9).

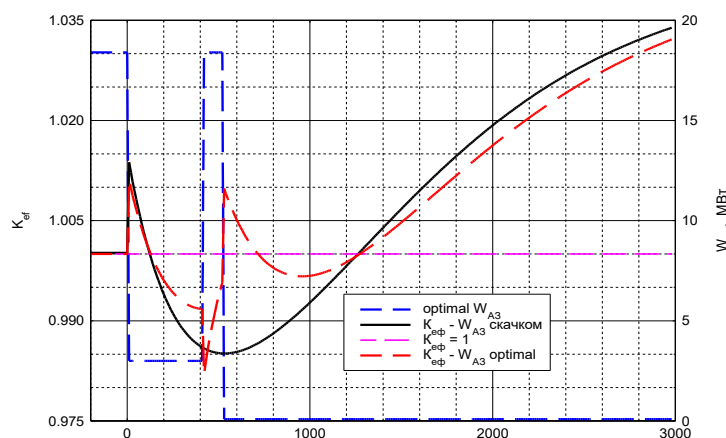


Рисунок 9 – Зниження потужності до нуля стрибком та згідно з оптимальним графіком

З рисунка 10 видно, що при реалізації оптимального режиму концентрація ксенону при зупині реактора зменшується вдвічі. Така поведінка концентрації ксенону зумовлена наявним випалюванням

нейтронів, оскільки при зниженні потужності стрибком до нуля, цей процес припиняється й зменшення концентрації ксенону відбувається лише шляхом радіоактивного розпаду.

Наведене на рисунку 11 відхилення офсету вказує на більшу стабільність реактора в оптимальному режимі зупину. Така характеристика АО викликана зменшенням ксенонових коливань потужності.

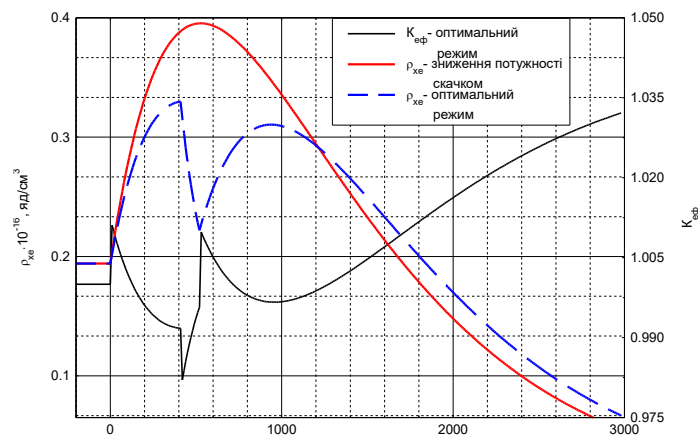


Рисунок 10 – Концентрація ядер Хе для режимів зниження потужності до нуля стрибком згідно з оптимальним графіком

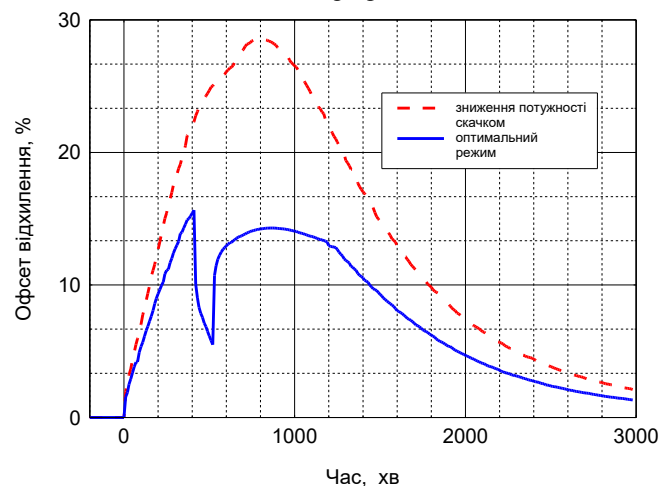


Рисунок 11 – Офсет відхилення для режимів зниження потужності до нуля стрибком та згідно з оптимальним графіком

### Висновки

Отримані результати досліджень вказують на схильність реактора ВВЕР-1000 до аксіальних коливань потужності. Оскільки експлуатація реактора ВВЕР-1000 в енергомережі має регламентні обмеження, то в режимі ксенонових коливань потужності вона неможлива без керуючих впливів з боку оператора. Тому важливою функцією розробленого алгоритму є вивчення методики гасіння ксенонових коливань потужності.

В роботі також розглянута можливість використання розробленої програми до пошуку оптимального режиму зниження потужності. Цей графік зниження потужності розроблений методом підбору. Отриманий оптимальний режим зупинки реактора дав змогу вдвічі скоротити ширину йодної ями за часом. Отже, таке зменшення йодної ями дозволить скоротити час простою реактора в режимах, коли необхідно знизити потужність на короткий проміжок часу.

Розроблена модель дає можливість промодельовувати перехідний процес та знайти оптимальний режим роботи реактора, при цьому є досить простою у використанні. Нині в програмі реалізовано борне регулювання потужністю, але в майбутньому можлива реалізація управління через ОР СУЗ, що збільшить функціональні можливості розробленої програми фізичного розрахунку реактора в одномірній аксіальній геометрії.

### Список використаної літератури

1.Халімончук В.А. Розробка, впровадження та використання моделей просторової кінетики для обґрунтування безпеки ядерних енергетичних реакторів України: дис. на здобуття вченого ступеня д-та тех. наук.: 05.14.14 Київ 2018. 348с

2.Халимончук В.А. Безопасность атомных станций. Динамика ядерного реактора с распределенными параметрами в исследованиях переходных режимов эксплуатации ВВЭР и РБМК: монография. Киев: Основа, 2008. 230 с.

3.Глестон С., Эдлунд М. Основы теории ядерных реакторов. М.: Издательство иностранной литературы. 1954, 458 с

4.Рудик А.П. Ксеноновые переходные процессы в ядерных реакторах. М.: Атомиздат. 1974.

5.Герасимов А.С. Оптимизация ксеноновых переходных процессов в реакторе. Задача на минимум энерговыделения. Б., Препринт ИТЭФ, 1975, №90

6.Рудик А.П. Ядерные реакторы и принцип Понтрягина. М., Атомиздат, 1971

7.Рудик А.П. Оптимальная остановка высокопоточного реактора. М., Препринт ИТЭФ, 1069, №691

V.A. Khalimonchuk, Dr. Tech. Sc., ORCID 0000-0002-9285-661X

M.M. Palamarchuk, undergraduate, ORCID 0000-0002-4187-9256

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

### STUDY OF XENON POWER FLUCTUATIONS IN WWER-1000 REACTORS IN ONE-DIMENSIONAL AXIAL GEOMETRY

*The article uses the adiabatic modelling method for slow transient processes in nuclear reactors. The essence of this method is that the spatial component of the neutron flux density is determined by the solution of static equations of neutron transport. And the time dependence is reduced to the change of parameters (neutron interaction cross-section) of neutron transport equations accordingly to the change of  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{149}\text{Sm}$  concentrations.*

*In this work, we propose to use a unidimensional (axial) model in the two-group diffusion approximation to investigate xenon transients. As a result, the effect of delayed neutrons in this case may be overlooked. All neutrons are assumed to be instantaneous because the lifetime of both instantaneous and delayed neutrons is much shorter compared to the characteristic time of the xenon transition process. The diffusion equation is based on a balance equation in which the generation, absorption, and leakage of neutrons per unit core volume determine the rate of change in neutron density over time. The differential equations used to calculate the spatio-temporal behavior of the neutron field in the core volume are calculated numerically, by finite-difference method, and analytically. The neutron-physical constants of each axial layer are determined by averaging, taking into account the number and types of fuel assemblies in accordance with the loading of the core in question. The fuel assembly type constants are preliminarily calculated using spectral codes.*

*As a result of the work, an algorithm for the physical calculation of the WWER 1000 reactor in one-dimensional axial geometry was obtained, the validation of the developed program was carried out, a number of transient calculations were carried out and a variety of xenon transient optimizations were proposed.*

**Keywords:** xenon transition process, reactivity, neutron flux density, water-water reactors, mathematical modeling of transition processes, xenon axial power fluctuations

### References

1. V. A. Khalimonchuk. Development, implementation and use of models of spatial kinetics to substantiate the safety of nuclear power reactors in Ukraine. Qualification Scientific Paper as Manuscript. Kyiv 2018. 348p

2. V.A Khalimonchuk. Safety of nuclear power plants. Dynamics of a nuclear reactor with distributed parameters in the study of transient modes of operation of VVER and RBMK. Kyiv: Osнова, 2008. 230 p.

3. S. Gleston, M. Edlund. Fundamentals of the theory of nuclear reactors. M.: Publishing house of foreign literature. 1954, 458 p

4. A.P. Rudik. Xenon transients in nuclear reactors. Moscow: Atomizdat. 1974.

5. A.S. Gerasimov. Optimization of xenon transients in the reactor. The task of minimizing energy release. L., ITEP Preprint, 1975, No. 90

6. A.P. Rudik. Nuclear reactors and the Pontryagin principle. M., Atomizdat, 1971

7. A.P. Rudik. Optimal shutdown of a high flow reactor. M., ITEP Preprint, 1069, No. 691

Надійшла 8.06.2022

Received 8.06.2022

С.В. Бойченко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-2489-4980

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

А.В. Яковлева, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-7618-7129

Д.В. Боднар, магістр, ORCID 0000-0003-0377-6034

А.В. Гудзь, магістр, ORCID 0000-0001-6003-5756

М.В. Московчук, магістр, ORCID 0000-0002-1555-858X

Український науково-дослідний та навчальний центр хімотології та сертифікації ПММ,

науково-технічна спілка хімотологів, Національний авіаційний університет

М.Г. Лорія, д-р техн. наук, проф. ORCID 0000-0002-5589-8351

Східноукраїнський національний університет ім. Володимира Даля

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ ПАЛИВ ДЛЯ ПОВІТРЯНО-РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ ЗІ СПИРТУ

У статті розглянуто питання конкурентоспроможності технологій виробництва альтернативних авіаційних палив та їх використання у сучасному транспортному секторі, що стрімко розвивається. Розглянуто актуальні тенденції транспортної галузі щодо необхідності переходу від традиційного нафтового палива до альтернативного, не тільки для наземного, а й для авіаційного транспорту. Така тенденція обумовлена вичерпністю запасів нафти з одного боку та погіршенням стану довкілля з іншого. В роботі проаналізовано асортимент відновлюваної сировини та технологічні процеси її перероблення, що використовуються сьогодні для виробництва альтернативних авіаційних палив. Виконано порівняльний аналіз характеристик технологічних процесів одержання альтернативних палив для повітряно-реактивних двигунів на основі біомаси. Розглянуто процеси одержання спиртів (етанолу та бутанолу) з відновлюваної рослинної сировини та процеси їх подальшої конверсії на альтернативне паливо для повітряно-реактивних двигунів. Показано, що на сьогоднішній день використання авіаційних палив, одержаних зі спиртів дозволено у сумішах з традиційним нафтовим паливом у кількості до 50 %.

**Ключові слова:** біопаливо, повітряно-реактивний двигун, спирт, цеоліти, авіаційна галузь, біоетанол, конверсія, ферментація.

**Вступ.** Розвиток авіаційної техніки постійно рухається у напрямі збільшення швидкостей та висот польотів літальних апаратів (ЛА), покращення економічності, масових характеристик, надійності та ресурсу силових установок. Надійність та ефективність роботи двигуна і відповідно самого ЛА потребують високої якості палива [1]. Сучасні палива для цивільної авіації мають задовольняти низку вимог, пов'язаних з економічністю, надійністю, довговічністю роботи авіаційної техніки та екологічною безпечністю палива. Також слід не забувати про обмеженість світових запасів нафти, що є основною сировиною для виробництва авіаційного палива. Беручи до уваги зазначені фактори, актуальним стає пошук та розробка альтернативних технологій виробництва авіаційного палива з відновлюваної сировини. На сьогодні вже відомо низку енерготехнологій виготовлення альтернативних авіаційних палив, які активно досліджуються та впроваджуються в практику [1, 2].

Сучасні тенденції розвитку цивільної авіації вказують на необхідність підвищення паливної ефективності та екологічності застосовуваних палив. Застосування традиційного палива для повітряно-реактивних двигунів (ПРД) все в меншій мірі задовольняє перспективним вимогам до екологічності при постійно зростаючій на нього ціні. Крім того, запаси нафти не безмежні [3]. На думку багатьох фахівців, рішенням зростаючих проблем з нафтовими паливами може бути використання альтернативних видів авіаційного палива. Низка компаній в різних країнах світу спільно з виробниками авіаційної техніки при вагомій державній підтримці активно розробляють нові види палива. Найбільш поширені на даний момент біопалива, що складаються з біоетанолу, отримані з різних рослинних і тваринних джерел [2, 4].

Альтернативні види палива за своїми експлуатаційними властивостями не повинні поступатися нафтовим палив. Можливий перехід на них не повинен вимагати значних витрат на модернізацію повітряних суден і засобів наземного авіапаливозабезпечення. Тому актуальним завданням є проведення порівняння основних показників якості нафтових палив, біопалив і їх сумішей для оцінки можливості застосування біопалив на повітряних судах. У найближчій перспективі можуть використовуватися зріджений природний газ, синтетичні бензини і дизельне паливо, а в майбутньому можна очікувати на широке застосування водню і енергетичних установок з паливними елементами [3].

**Мета роботи і завдання дослідження.** Метою роботи є порівняльний аналіз і характеристика технологій отримання палив для повітряно-реактивних двигунів зі спиртової сировини, що володіють

поліпшеними експлуатаційними та екологічними властивостями, порівняно з традиційними паливами для ПРД.

**Об'єкт дослідження** – паливо для ПРД на основі спиртів та технологічні процеси його одержання.

**Предмет дослідження** – методологічні основи використання альтернативних видів палива, в тому числі, спиртів як палив для ПРД.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** З кожним роком авіаційна галузь відчуває зростаючий пресинг з боку громадськості та екологів, які відзначають, що збільшення обсягу перевезень завдає серйозної шкоди навколишньому середовищу, до того ж авіація є одним з найбільших споживачів паливно-мастильних матеріалів.

Провідні представники авіаційної галузі прийшли до єдиної думки про необхідність підвищення паливної ефективності експлуатованих літаків на 1,5% до 2020 р. Одним з таких способів є застосування альтернативного палива. Але, головна проблема, пов'язана з широкомасштабним виробництвом біопалива – це його вартість. На даний момент біопаливо дорожче традиційного авіаційного керосину в 2–3 рази. Але з нарощуванням обсягів виробництва біопалива його вартість буде поступово падати. При цьому, за прогнозами аналітиків, вартість традиційного авіакеросину буде збільшуватися, відповідно, з часом ці два види палива, напевно, змінять свої позиції [2, 5].

Однією з головних рушійних сил для галузі є спільна ініціатива американських ВВС і флоту. На дослідженні виділяються значущі кошти, а на сьогоднішній день розробки ведуться з використанням усіх можливих видів сировини. Зокрема, морські сили США планують до 2020 року передати всі повітряні транспортні засоби на суміш 50/50 авіаційного керосину та біопалива [6].

Всесвітній економічний форум в Давосі щорічно стає всесвітнім діловим і економічним центром. Місцем, де лідери провідних розвинених країн обговорюють стратегічно-важливі питання, котрі стосуються вектора розвитку планети в цілому. У тому числі і екологічні. Не секрет, що цьогоріч форум відвідала і юна активістка за збереження планети Гретта Тумберг. І ось, перші ініціативи не змусили себе довго чекати. Аеропорт Цюриха вперше заправив літаки біопаливом [7].

**Основна частина.** В основі будь-якого моторного палива, чи то традиційного, чи то альтернативного, зокрема на основі біомаси, є вуглеводні, що утворені атомами водню та вуглецю. Незважаючи на те, що як нафта так і біомаса є джерелами природного вуглецю, кожна з цих видів сировини має дуже різний хімічний склад [8]. Відмінності у складі сировини визначають підходи та технологічні процеси, що використовуються для перероблення обох видів ресурсів на вуглеводневе паливо. Так, природа нафтових вуглеводнів (гідрофобні, дуже леткі та інертні) вимагає здійснення конверсії за високих температур і в паровій фазі. На відміну від них, вуглеводні, одержані з біомаси є високо реакційно здатними і тому потребують значно нижчих температур для проведення реакцій, ніж нафтові сполуки [9].

На рис. 1 наведено основні технологічні процеси перероблення біомаси на альтернативне паливо для ПРД. У всіх випадках необхідний перший етап подрібнення, метою якого є зменшення структурної складності біомаси та отримання оксигеновмісних проміжних сполук, менш складні і, як наслідок, більш придатних для подальшого одержання палива для ПРД. Ці проміжні продукти (олії, синтетичний газ, спирти та цукри) дають назву різноманітним напрямкам перетворення біомаси на альтернативне паливо для ПРД: *Oil to Jet – OtJ* (олії у паливо для ПРД), *Gas to Jet – GtJ* (газ у паливо для ПРД), *Alcohol to Jet – AtJ* (спирти у паливо для ПРД) та *Sugars to Jet – StJ* (цукри у паливо для ПРД) відповідно [8, 9].

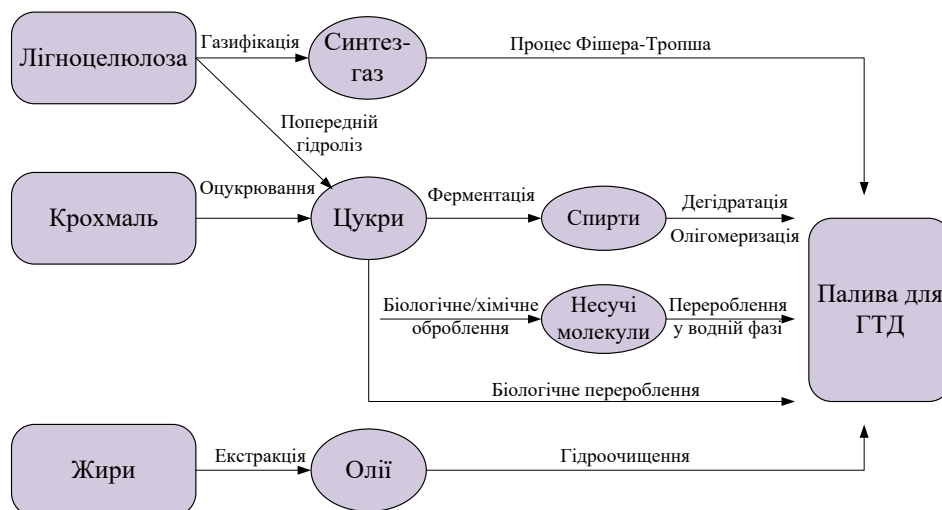


Рисунок 1 – Основні технологічні процеси перероблення біомаси на альтернативне паливо для ПРД [9]

На сьогодні вже відомо низка технологій виготовлення альтернативних авіаційних палив, що активно досліджуються та впроваджуються в практику. У межах даної статті представлено огляд основних технологій, доступних сьогодні, зокрема детально буде розглянуто технологічні процеси одержання альтернативного палива для ПРД зі спиртової сировини. Основні характеристики чотирьох найбільш поширених технологічних процесів (*OtJ*, *GtJ*, *AtJ* та *StJ*) представлено в таблиці 1 [9].

Таблиця 1 – Основні характеристики технологічних процесів одержання альтернативних авіаційних палив на основі біомаси

№ з/п	Показник	Технологічний процес			
		OtJ	GtJ	AtJ	StJ
1	Сировина	Рослинні олії	Лігноцелюлоза, побутові та сільськогосподарські відходи	Спирти, одержані з біомаси	Цукри, фурані
2	Етапи реакцій	Гідроочищення Фракціонування	Газифікація ФТ-синтез фракціонування	Дегідрування Олігомеризація Гідрогенізація Фракціонування	Деоксигенація С-С групування Гідрогенізація Фракціонування
3	Каталізатори	Al сульфід та інші металеві каталізатори	Каталізатори на основі Fe та Co	Гетерогенні та гомогенні каталізатори	Широкий спектр гетерогенних каталізаторів
4	Комерційна готовність	Комерційне використання	Демонстраційні польоти	Лабораторні дослідження	Лабораторні дослідження
5	Мінімальна вартість, \$/галон	4,4–5,1	3,9–4,3	Не розраховувалося	Більше 3,5
6	Емісія ПГ (г CO <sub>2</sub> /МДж)	13–141	2–10	Не розраховувалося	15–49
7	Наявність ароматичних сполук у складі палива	Ні	Так, за технологією FT-SKA	Так	Так
8	Сертифікація ASTM	Так Компаундування у кількості до 50 % з нафтовим паливом для ГТД	Так Компаундування у кількості до 50 % з нафтовим паливом для ГТД	Так Компаундування у кількості до 50 % з нафтовим паливом для ГТД	На стадії проведення випробувань

Використання біоетанолу як моторного палива вимагає рішення низки технологічних проблем, пов'язаних з його застосуванням. Перш за все слід зазначити необхідність попереднього очищення етанолу від води. Крім того, виникає необхідність модифікації двигуна для роботи на чистому етанолі або обов'язкове змішання з бензином для використання в двигунах без їх модифікації. До недоліків можна віднести також високий тиск пари і, як наслідок, високу випаровуваність етанолу, високу корозійну активність через неминучу присутність води, а також можливість її вимерзання в умовах низьких температур і розшарування паливної суміші [5, 6].

Світове виробництво етанолу базується на двох методах: нафтохімічному і біотехнологічному (ферменти або бактерії). Нафтохімічний метод полягає в гідратації етилену в присутності неорганічних кислот. Простота технологічного оформлення і висока продуктивність робить цей метод надзвичайно привабливим в умовах низької вартості використовуваної сировини. На даний момент через негативний баланс цін між етанолом і етиленом даний метод практично повністю витіснений процесами на основі переробки біомаси [5].

Ферментація глюкози – це найстаріший метод виробництва етанолу, що застосовується для виготовлення алкогольних напоїв. Як сировина використовується продукція сільського господарства, що містить цукру, крохмаль і целюлозу, а також відходи деревної промисловості та побутові відходи [7].

Є методи виробництва спирту гідролізом целюлози. Біда тільки, що целюлоза – одна з найміцніших з'єднань, наявних в рослинах, і «розвалити» цей на диво міцний полісахарид на цукри, що є основою для виробництва спирту, ще треба зуміти. Целюлозу доводиться розкладати або за допомогою сильнодіючих хімікатів (від кислоти до ензимів), або вдаватися безпосередньо до допомоги ензими бактерій. Процес

виходить нешвидким і не дешевим: станом на 2006 рік вартість виробництва літра целюлозного спирту становила 60 центів, і при такій ціні по економіці він зрівняється з нафтою при ціні її не нижче 120 доларів за барель [4–5, 8].

Оскільки переробка целюлози так складна, спирт в значно більших обсягах отримують з, наприклад, крохмалю. Він хоч теж полісахарид, але розкладається на цукри куди простіше.

Каліфорнійська *Byogy Renewables* рапортує про розробку першого в світі методу прямої переробки спирту в 100 % заміну гасу шляхом каталітичного синтезу. Там вважають, що таке паливо може бути сертифіковане в кінці 2013-середині 2014 року, і відома *Qatar Airways* вже уклала з *Byogy* угоду про використання виробленого біопалива на своїх літаках відразу після отримання сертифікату. Авіакомпанія розраховує, що виробництво палива з спирту незабаром стане провідним трендом, і воно допоможе їй відмовитися від використання на своїх літаках палива нафтового походження [10].

*Qatar Petroleum* і *Shell* вже побудували в Катарі завод з виробництва палива *GTL* (*Gas-to-liquid*), а авіакомпанія з 2009 року використовує на своїх *A340-600* суміш з рівних кількостей *GTL* і керосину *A1*. *GTL* не містить ароматичних вуглеводнів, тому його доводиться змішувати з керосином, але керосин можна буде замінити на *ATJ* [8].

**Технологічний процес конверсії етанолу на цеолітах.** Біоетанол – один з видів відновлюваної сировини, що отримується з рослинної біомаси, що містить природні цукри, целюлозу або крохмаль, шляхом її ферментативної переробки. Використання біоетанолу як моторного палива вимагає рішення ряду технологічних проблем, пов'язаних з його застосуванням. Перш за все слід зазначити необхідність попереднього очищення етанолу від води [11].

Світове виробництво етанолу базується на двох методах: нафтохімічному і біотехнологічному (ферменти або бактерії). Здійснення прямої конверсії ферментацій сумішей і етанолу в вуглеводні можливо на каталізаторах на основі *ZSM-5*. У цеолітах типу пентасілов основним елементом кристалічної решітки є фрагмент з п'яти- і шестичленних кілець, поєднання яких дає ланцюжки, що утворюють шари [12].

Усередині цеоліту формується система каналів, поєднання яких представляє собою круглу десятичленне кільце діаметром 0,54-0,56 нм.

При пропусканні біоетанолу через цеоліти зі структурою *HZSM-5* утворюється ряд ароматичних і аліфатичних вуглеводнів різної будови. Цей процес за аналогією з процесом конверсії метанолу *MTG* (*methanol-to-gasoline*) відомий під назвою *ETG* (*ethanol-to-gasoline*). Механізм реакції включає в себе дегідратацію етанолу, олігомеризацію етилену з подальшим крекінгом і ароматизацією олефінів або олефінових фрагментів.

Конверсія етанолу на розроблених каталізаторах типу *HZSM-5* призводить до утворення насичених і ненасичених вуглеводнів, у тому числі толуолу, ксилолів та інших ароматичних вуглеводнів. Октанове число рідкого продукту при конверсії етанолу на цеолітах *ЦКЕ-Г50* склало 98 за дослідницьким методом. З урахуванням відсутності в його складі сірки і азоту, а також низький вміст бензолу його можна використовувати як високооктанове, екологічно більш чисте моторне паливо, що відповідає рівню якості за *Євро-4–5*, у порівнянні з паливом, що продукують з нафти [12].

Крім того, ці каталізатори можна розглядати як перспективні для отримання з етанолу олефінів і ароматичних вуглеводнів – важливих продуктів для нафтохімічної промисловості. Таким чином, експериментальні дані дозволяють розглядати цеолітні каталізатори на основі *HZSM-5* як перспективні і відкривають можливість отримання етилену, пропан-пропенової і бутан-бутенової фракцій, вуглеводнів бензинового ряду і ароматичних вуглеводнів з біоетанолу. За відсутності нафти отримання їх з відновлюваної сировини стане нагальною потребою [11].

**Використання спиртів як сировини для отримання вуглеводневих моторних палив.** Спирти мають високі октанові числа – більше 100 од., але меншу в порівнянні з нафтовими паливами теплоту згоряння (під час згорання палива виділяється менше енергії, потужність падає, а витрата палива збільшується) [4].

У даний час як альтернатива використовуються сумішеві палива (суміші бензину з етанолом). Такі суміші зазвичай позначають буквою *E* (від слова етанол) і числом, що показує вміст спирту у відсотках. Найбільш поширене паливо *E10* або газохол, що містить 10 % етанолу [4, 6].

Спирт і його суміші з бензином не замерзають, проте схильні до поглинання вологи. На певному етапі це може привести до розшарування паливної суміші, що неприпустимо. У спиртового палива є низка істотних недоліків, таких як токсичність (особливо це стосується метанолу), корозійна активність і агресивність по відношенню до алюмінієвих сплавів, гуми та інших конструкційних матеріалів.

У ролі альтернативної сировини для виробництва моторних палив і інших продуктів для нафтохімії можна використовувати нижчі спирти, головним з яких є біоетанол.

Переробка біомаси в етиловий спирт є одним з найбільш ефективних способів її використання. При цьому необхідно відзначити, що 80 % виробленого в світі біоетанолу використовується як автомобільне паливо у вигляді бензіоетанольної суміші різного складу [4, 6]



**Одержання палив для повітряно-реактивних двигунів на основі спиртової сировини.** Паливо AtJ (Alcohol-to-Jet) – це паливо, що одержують зі спиртів, таких як метанол, етанол, бутанол та інших довголанцюгових жирних спиртів. В останні роки, перетворення етанолу в сумішове паливо для ПРД є досить перспективним варіантом для розвитку галузі виробництва альтернативного авіаційного палива. Технологічний процес одержання альтернативних палив для ПРД зі спиртів (AtJ) включає у себе три основні етапи [13]:

1. зневоднення спирту біологічного походження до відповідного олефіну;
2. олігомеризація олефінів до нового олігомеризованого олефіну;
3. гідрування олігомеризованого олефіну до насиченого вуглеводневого продукту.

Ці три процеси є добре відомими і широко використовуються в нафтохімічній промисловості. Спирти, що зазвичай використовуються у технології AtJ, включають невеликі сполуки з кількістю атомів вуглецю C2 – C4, такі як етанол та бутанол (н-бутанол та ізо-бутанол). Ці спирти можуть бути отримані з цукровмісної біомаси за допомогою мікробних технологій бродіння, подібних до тих, що використовуються у пивоварінні та виноробстві [8, 13]. Одержання цукрів з вуглеводних полімерів з біомаси на основі їстівної сировини, такої як цукровий очерет або кукурудза є порівняно легким, адже достатньо простої обробки в гарячій воді для вивільнення мономерів. У разі використання неїстівної біомаси (наприклад, лігноцелюлози) одержання цукру є більш проблематичним, і потребує додаткового попереднього оброблення з метою послаблення структури лігніну, яка оточує полімери целюлози та геміцелюлози. Спирти утворюються в біоферментаторах за низьких концентрацій у межах кімнатної температури, щоб забезпечити виживання мікроорганізмів.

Для перероблення спиртів на паливо для ПРД, їх спочатку зневоднюють у відповідний алкенний продукт, що містить однакову кількість атомів вуглецю. Потім продукт відокремлюють від рідкої води та домішок фракціонування і подають на наступний етап процесу у вигляді газу. На наступному етапі газоподібний матеріал олігомеризується до ненасичених сполук з більшою молекулярною масою. Ненасичені олігомери, що мають молекулярну масу, приблизно сумісну з нафтовим паливом для ПРД, відокремлюють та додатково обробляють на третьому основному етапі – гідруванні над твердофазним каталізатором газоподібним воднем. На завершальній стадії гідрований продукт переганяють з отриманням кінцевих продуктів, серед яких є керосинова фракція [3, 9, 13].

Сьогодні прийнято виділяти два різновиди технологічних процесів виробництва палива для ПРД зі спиртів. Перший з них, що описано вище, відомий як *AtJ-SPK – Alcohol To Jet – Synthesized Paraffinic Kerosene*, тобто синтетичний парафіновий керосин. Другим процесом є виробництво альтернативного палива для ПРД зі спиртів, що містить у своєму складі ароматичні вуглеводні. Ця технологія називається *AtJ-SKA – Alcohol To Jet - Synthesized Kerosene with Aromatics*. Альтернативне паливо за технологією *AtJ-SKA*, виробляється сьогодні компанією Swedish Biofuels, також є відоме під торговою назвою SB-JP-8 [9]. Принципово технологічний процес одержання палива *AtJ-SKA* є таким же, як технологічний процес *AtJ-SPK*, за винятком наявності додаткового етапу ароматизації вуглеводнів. Залежно від технологічних можливостей підприємства з виробництва палива, виробництво ароматичних речовин може виконуватися як інтегрований потік у загальному виробничому процесі.

Для поширення виробництва альтернативного палива для ПРД на основі спиртів у комерційних масштабах, технологічний процес повинен пройти процедуру його затвердження та відповідати стандартам ASTM [3]. Традиційно, вимоги до палив для ПРД визначено стандартом ASTM D1655 для авіаційних турбінних палив, у якому деталізовано вимоги до палив нафтового походження та який визначає паливо для ПРД придатним до застосування. Сумішове паливо для ПРД, що одержується зі спиртів за технологічним процесом ATJ, вже наразі затверджене стандартом ASTM D7566 [4]. В даний час таке паливо, що виробляється з етанолу або проміжного продукту ізобутанолу, допускається до компаундування з нафтовим паливом для ПРД у кількості до 50 %.

**Висновки.** Історія розвитку енергетичної індустрії пройшла шлях від використання поновлюваних джерел сировини через розквіт нафтової епохи, повертаючись знову до екологічно чистої поновлюваної сировини. Однак альтернативні джерела енергії не є взаємовиключними. Історія показує, що в залежності від рівня потреби в енергії і вимог, що пред'являються до екології, необхідно знаходити раціональні шляхи використання природних ресурсів, як говорив Д.І. Менделєєв, витрачаючи їх дбайливо й економно. Запропонований перелік технологій отримання палив і цінних продуктів для нафтохімії дає всі підстави припускати, що існуючі технології переробки нафти можна замінити на альтернативні, що сприяють значному зменшенню техногенного впливу на навколишнє середовище.

Таким чином, на сьогодні у світі розробляється велика кількість альтернативних технологій виготовлення авіаційних палив з використанням як відновлюваної, так і не відновлюваної сировини. Аналізуючи ситуацію, що склалася в сучасній нафтопереробній галузі, та беручи до уваги екологічну ситуацію у світі, що постійно погіршується – перехід на альтернативні види авіаційного палива є очевидним.

Крім того, слід враховувати вимоги міжнародних організацій, таких як ICAO, IATA, CAEP, щодо екологізації цивільної авіації. Серед цих вимог слід виділити такі: зниження викидів CO<sub>2</sub> літальними апаратами, зниження токсичності їх відпрацьованих газів (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> та інші речовини).

Враховуючи ці та інші фактори, альтернативні авіаційні палива, що розробляються та використовуються сьогодні в світі мають задовольняти такі вимоги:

- бути поширеними та доступними в усьому світі з метою забезпечення міжнародних польотів;
- великий термін експлуатації ЛА (більше 30 років) вимагає альтернативні палива бути сумісними з деталями двигуна та не потребувати значних його переобладнань;
- альтернативні палива мають проходити жорстку процедуру сертифікації з метою забезпечення повної відповідності показникам якості традиційних реактивних палив;
- альтернативні авіаційні палива мають бути екологічно безпечними та здатними забезпечити постійно зростаючі потреби авіації в паливі.

#### Список використаної літератури.

1. Трофімов І.Л. Аналіз впливу авіаційного транспорту на забруднення атмосфери / І.Л. Трофімов // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2014. – №1. – С. 119 – 12
2. Grace J. Understanding and managing the global carbon cycle / J. Grace // *Journal of Ecology*. 2004. – Vol. 92. – P. 189–202.
3. Yakovlieva A. Modification of jet fuels composition with renewable bio-additives / A. Yakovlieva, S. Boichenko, K. Lejda, O. Vovk. Monograph. K.: Center for education literature. 2019. – 207 p.
4. Третьяков В. Ф. Биоэтанол-стратегия развития топливного и нефтехимического комплекса / В. Ф. Третьяков // *Химия и техника*. 2008. – № 1. – С. 8–12.
5. Boichenko S. Energy Efficient Renewable Feedstock for Alternative Motor Fuels Production: Solutions for Ukraine / S. Boichenko, A. Yakovlieva // *Systems, Decision and Control in Energy I: monograph*, Springer, Switzerland, 2020. – P. 247–259.
6. Schulz J. Conversion of ethanol over Zeolite H-ZSM-5 / J. Schulz, F. Bandermann // *Chemical Engineering and Technology*. 1994. – Vol. 17. – P. 179–186.
7. Han J. Life-cycle analysis of bio-based aviation fuels / J. Han, A. Elgowainy, H. Cai, M.Q. Wang // *Bioresources technology*. 2013. – Vol. 150. – P. 447–456.
8. Ghazanfari J. Limiting factors for the use of palm oil biodiesel in a diesel engine in the context of the ASTM standard / J. Ghazanfari. // *Cogent Engineering*. – 2017. – №1. – С. 1–17..
9. Rajagopal D. Environmental, Economic and Policy Aspects of Biofuels / D. Rajagopal, D. Zilberman: New Publishers Inc, 2008. – 115 p.
10. Fjerbeak L. A review of the current state of biodiesel production using enzymatic transesterification / L. Fjerbeak, K. V. Christensen, B. Norddahl // *Biotechnology and Bioengineering*. 2009. – Vol. 102. – No. 5. – P. 1298–1315.
11. Кузьмина Р. И., Конверсия одноатомных спиртов на поверхности Zr-модифицированных высококремнистых цеолитных системах типа zsm-5 / Р. И. Кузьмина, А. Ю. Пилипенко, Е. В. Зюмченко // *Наука 21 века: новый подход: материалы 21-й молодеж. междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых*. СПб., 2013. – С. 21–26.
12. Bezhadi S. Review : Examining the use of different feedstock for the production of biodiesel / S. Bezhadi, M.M. Farid // *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. 2007. – Vol. 2. – P. 480–486.
13. Iakovlieva A. Peculiarities of the development and implementation of aviation biofuels in Ukraine / A. Iakovlieva, K. Lejda, O. Vovk, S. Boichenko // *World Congress on Petrochemistry and Chemical Engineering. Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*. November 2013, San Antonio. – 2013. – Vol.4. – Iss.6. – P. 47.

**S. Boichenko**, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-2489-4980

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

**A. Yakovlieva**, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-7618-7129

**D. Bodnar**, master student, ORCID 0000-0003-0377-6034

**A. Hudz**, master student, ORCID 0000-0001-6003-5756

**M. Moskovchuk**, master student, ORCID 0000-0002-1555-858X

**National Aviation University**

**M. Loria**, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-5589-8351

**Volodymyr Dahl East Ukrainian National University**

#### COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNOLOGIES OF JET FUEL PRODUCTION FROM ALCOHOLS

*The article considers the question of competitive ability of technologies of alternative aviation fuels production and its application in modern transport sector that develops quickly. Modern tendencies in transport sphere concerning the necessity of transition from conventional oil-derived fuel to alternative one for both road*

and air transport are considered in the article. These tendencies are explained by the limitation of crude oil deposits, from one side and worsening of the state of environment caused by exhaust gases emissions from another side. Moreover, international aviation authorities, such ICAO, IATA determine the necessity of active development and implementation of alternative aviation fuels. The article analyzes variety of available today renewable feedstock and technological processes of its processing, which are used today for production of alternative aviation fuels. Peculiarities of direct ethanol use in blends with motor fuels are shown and necessity of its chemical conversion for use in jet fuels is substantiated. The comparative analysis of characteristics of technological processes of alternative jet fuels production based on biomass was done. Processes of alcohols (ethanol, n-butanol and iso-butanol) production from renewable plant feedstock and processes of its further conversion to alternative jet fuel are considered. Two methods of ethanol production (petrochemical and biochemical) were shown and analyzed; advantages and disadvantages of both methods were presented.

It was shown that today application of alternative aviation fuels produced from alcohols is allowed in blends with conventional oil-derived jet fuels in quantity up to 50 %.

**Key words:** biofuel, jet engine, alcohol, zeolites, aviation sphere, bioethanol, butanol, conversion, fermentation.

### References

1. Trofimov I.L. Analysis of impact of aviation on atmosphere pollution. Power engineering: economics, technologies, ecology. 2014. No 1. Pp. 119 – 12. (Ukr)
2. Grace J. Understanding and managing the global carbon cycle. Journal of Ecology. 2004. Vol. 92. Pp. 189–202.
3. Yakovlieva A. Boichenko S., Lejda K., Vovk O. Modification of jet fuels composition with renewable bio-additives: Monograph. K.: Center for education literature. 2019. 207 p.
4. Tretiakov V. F. Bioethanol – strategy of development of fuel and oil complex. Chemistry and technology. 2008. No. 1. Pp. 8–12. (Rus)
5. Boichenko S., Yakovlieva A. Energy Efficient Renewable Feedstock for Alternative Motor Fuels Production: Solutions for Ukraine. In Systems, Decision and Control in Energy I: monograph, Springer, Switzerland. 2020. Pp. 247–259.
6. Schulz J., Bandermann F. Conversion of ethanol over Zeolite H-ZSM-5. Chemical Engineering and Technology. 1994. Vol. 17. Pp. 179–186.
7. Han J., Elgowainy A., Cai H., Wang M.Q. Life-cycle analysis of bio-based aviation fuels. Bioresources technology. 2013. Vol. 150. Pp. 447–456.
8. Ghazanfari J. Limiting factors for the use of palm oil biodiesel in a diesel engine in the context of the ASTM standard. Cogent Engineering. 2017. No 1. Pp. 1–17.
9. Rajagopal D., Zilberman D. Environmental, Economic and Policy Aspects of Biofuels. New Publishers Inc, 2008. 115 p.
10. Fjerbeak L., Christensen K.V., Norddahl B. A review of the current state of biodiesel production using enzymatic transesterification. Biotechnology and Bioengineering. 2009. Vol. 102. No. 5. Pp. 1298–1315.
11. Kuzmina R.I., Pilipenko A.Yu., Zumchenko Ye.V. Conversion of mono-atom alcohols at the surface of Zr-modified high-silicium zeolite systems of type zsm-5. In Science of 21<sup>st</sup> century: new approach: Proceeding of the 21<sup>st</sup> international scientific conference of students and young scientists. St. Petersburg. 2013. Pp. 21–26.
12. Bezhadi S., Farid M.M. Review : Examining the use of different feedstock for the production of biodiesel. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. 2007. Vol. 2. Pp. 480–486.
13. Iakovlieva A., Lejda K., Vovk O., Boichenko S. Peculiarities of the development and implementation of aviation biofuels in Ukraine. In World Congress on Petrochemistry and Chemical Engineering. Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology. November 2013, San Antonio. 2013. Vol.4. Iss.6. P. 47.

Надійшла 29.09.2021

Received 29.09.2021

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

---

УДК 621.314

DOI 10.20535/1813-5420.2.2022.261403

Grudska V.P.<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4242-5536  
Golubev V.V.<sup>2</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-6447-8199

Denysenko O.S.<sup>1</sup>, student, ORCID 0000-0002-1803-9697

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

<sup>2</sup> Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine

## OPTIMIZATION OF VOLTAGE CONVERTERS OF MATRIX AND INVERTER TYPES USING SIMULATION MODELLING

*The paper presents the results of simulation modeling of functional capabilities of pulse converters of alternating voltage with free circulation of energy of two types: inverter type with intermediate link of pulsating voltage and matrix type with discharge of reactive load energy into the network. With the help of a software package OrCAD, the main modes of operation of these converters are investigated: lowering and increasing the output voltage relative to the input. The simulation results of each mode are presented in the form of diagrams of the control algorithm of the converter keys and diagrams of its electrical characteristics: input and output currents, voltage on the intermediate link (buffer capacitor) and output. On the basis of visual models for lowering and raising modes of work mathematical models and substitute electric schemes of the studied converters on intervals of their invariable structure are created. Simplified formulas for the approximate calculation of electrical parameters with sufficient accuracy for practice are proposed for both modes. Simulation models of the logic unit of the control system and the circuit of the power unit are presented separately for the three-phase matrix converter with energy reset and recovery. On the basis of visual models obtained with the help of the OrCAD software package, mathematical models and alternate electrical circuits of these converters at intervals of their constant structure were created. The conducted simulation allows to determine the most expedient areas of use of such converters and to perform optimization of their power circuits and control systems.*

**Keywords:** reversible rectifier, buffer capacitor, matrix regulator, inverter regulator, simulation model, power switch, reactive power.

**Introduction.** Pulse modulation DC-DC converters (PMDCDCC) are used in almost all industries, usually as regulators (stabilizers) of consumer voltage and in some cases as adapters between the grid and consumers to ensure their compatibility [1-4]. Due to the spread of PMDCDCC, the efficiency of electricity consumption largely depends on their work. The quality of DC energy conversion is assessed by the harmonic composition of the output voltage and input current, the input power factor, as well as technical and economic indicators. These parameters can be increased by rational construction of transformer-key structures that form the basis of PMDCDCC, and the choice of the optimal algorithm for their management. Currently, the most promising are pulse modulation DC-DC converters with free circulation of energy between the network and the load, which can be built in several directions [5]: matrix type; matrix type with discharge of reactive power of loading in a power supply network; inverter type. As each direction has its advantages and disadvantages, the choice of the perfect structure of the converter is ambiguous and requires object-oriented analysis based on theoretical information and practical experience in the field of conversion technology. In order to optimise the power circuits and control systems of PMDCDCC, it is advisable to carry out their simulation to determine the configuration of equivalent interlocking circuits at intervals of constant structure and to create a mathematical model of the inverter, divided into several simple ones in time and space.

**Purpose of work:** create visual simulation models and analyse the main modes of operation of pulsed wide-range voltage regulators of two types: inverter with an intermediate link of pulsating voltage; matrix with the discharge of reactive energy load into the network.

**Research material.** The paper presents the results of simulation modelling of the power circuit and functionality of two different types of single-phase voltage converters, developed and provided for research by specialists of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. The reliability of the simulation results is confirmed by laboratory and production tests of prototypes of these transducers. The simulation was performed using the OrCAD software package and consisted of three stages. The first stage is to test the functionality of the power circuit and control system. At this stage, the elements in the model circuit were simulated by components from the ANALOG libraries (ideal VS switches, capacitors  $C_1, C_2$ , inductors  $L_1, L_2$ , resistors); DIG\_PRIM (real digital elements DD1 – DD5); BREAKOUT (diodes). Key management algorithms were formed from digital signals at the output of Digurlock SOURCE library sources. The second stage is the gradual approximation of the parameters of the model elements to the parameters of the real elements produced by the industry. The third stage is the analysis of possible modes of operation, including emergency.

*Modelling and analysis of single-phase regulator-stabilizer of alternating voltage AC of inverter type with intermediate link of pulsating voltage.*

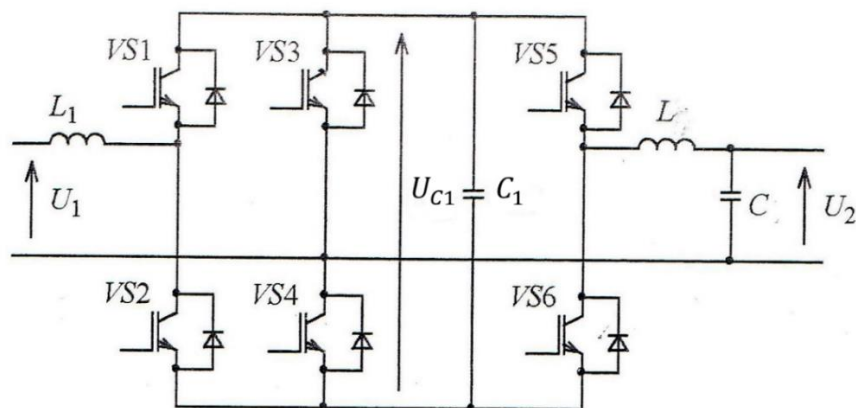


Figure 1 - Scheme of the inverter type regulator with a pulsating voltage link

The regulator in Fig.1 can work in two modes: lowering and increasing the output voltage  $U_2$  relative to the input  $U_1$ . In the lowering mode, the keys of the reversible rectifier VS1, VS2, VS3, VS4 are switched with the mains frequency, and the power switches of the half-bridge VS5, VS6 - with the increased frequency; in step-up mode, switches VS1, VS2 are switched on alternately with increased frequency, and VS3, VS4, VS5, VS6 - with network frequency. The intermediate link in the form of a buffer capacitor  $C_1$  briefly absorbs the reactive energy of the load circuit or the input choke  $L_1$ , depending on the mode of operation.

Figure 2 shows a diagram of a simulation model of such a converter in the mode of voltage reduction, Fig. 3, Fig. 4 - simulation results.

Fig. 3 shows the plots  $i_1$  and output  $i_2$  currents; current  $i_{C1}$  and voltage  $u_{C1}$  of input of the buffer capacitor, as well as the voltage on the active load  $U_{R2}$ .

Fig. 4 shows diagrams of the key control algorithm VS5; pulsations of output  $i_2$  and input  $i_1$  currents, current and voltage  $u_{C1}$  of the buffer capacitor.

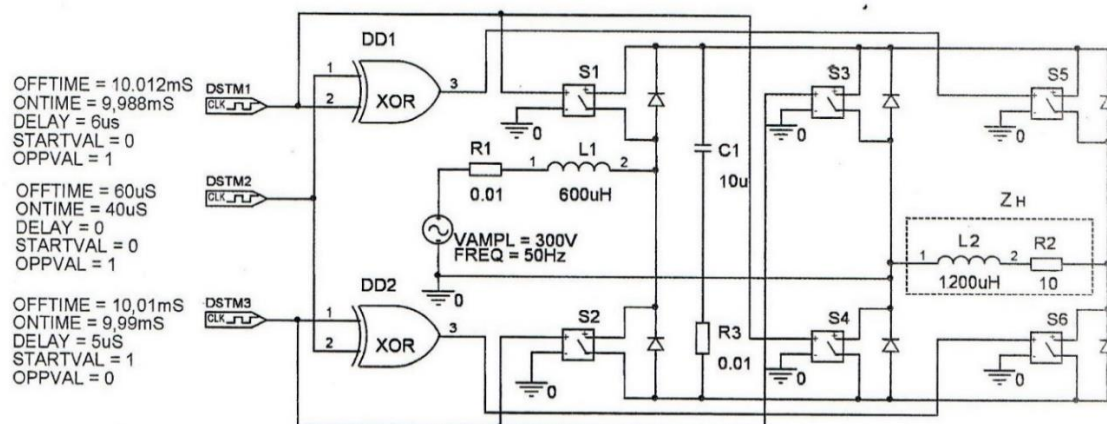


Figure 2 - Scheme of the simulation model of the inverter controller with an intermediate link of the pulsating voltage

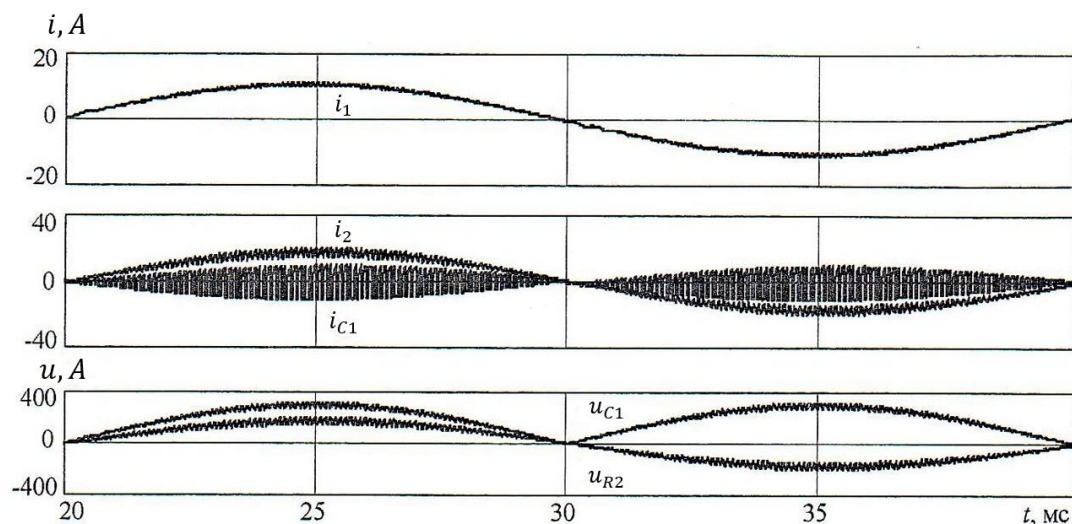


Figure 3 - Diagrams of currents and voltages of the inverter type regulator in the step-down mode

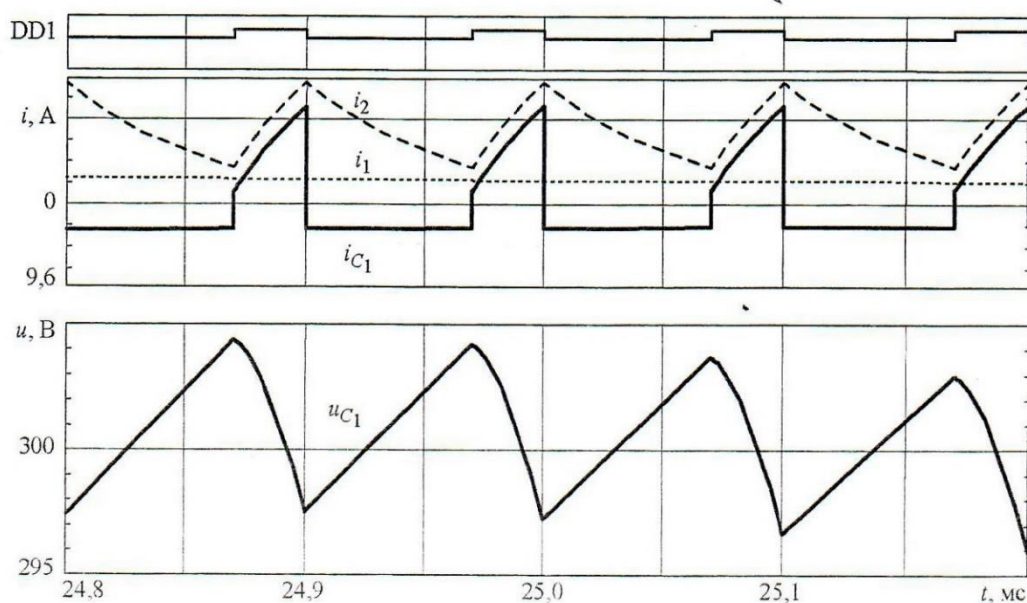


Figure 4 - Diagrams of the algorithm for controlling the key VS5 and ripple currents and voltages of the intermediate link of the inverter controller in the step-down mode

From the diagrams it follows that when the transistor VS5 is switched on, the output current  $i_2$  is the sum of the input current  $i_1$  and the capacitor current, the passage circuits of which are shown in Table T1 (interval 1). The capacitor  $C_1$  of the intermediate link is discharged to the load, and a voltage pulse is formed at the output of the converter.

In the interval when the transistor VS5 is turned off, the buffer capacitor  $C_1$  is charged by the current generated by the EMF of the network and the EMF of the induction choke  $L_1$ . The output of the converter is closed by a short open transistor VS6, and the output of the regulator is formed zero shelf (pause) in the output voltage (table T1 interval 2).

Table T1 shows the replacement circuits for the down-mode of operation of the regulator and the positive polarity of the mains voltage. Bold lines show the circuits with currents in the case of coincidence of current and mains voltage, thin - otherwise. As the polarity of the mains voltage changes, the substitution schemes become symmetric with respect to the tables.

Schemes of the simulation model of the inverter-type regulator in the modes of voltage increase and decrease differ only in that the algorithms for controlling the rectifier keys VS1, VS2 and half-bridge keys VS5, VS6 mutually change.



Table 1. The replacement circuits for the down-mode of operation of the regulator and the positive polarity of the mains voltage

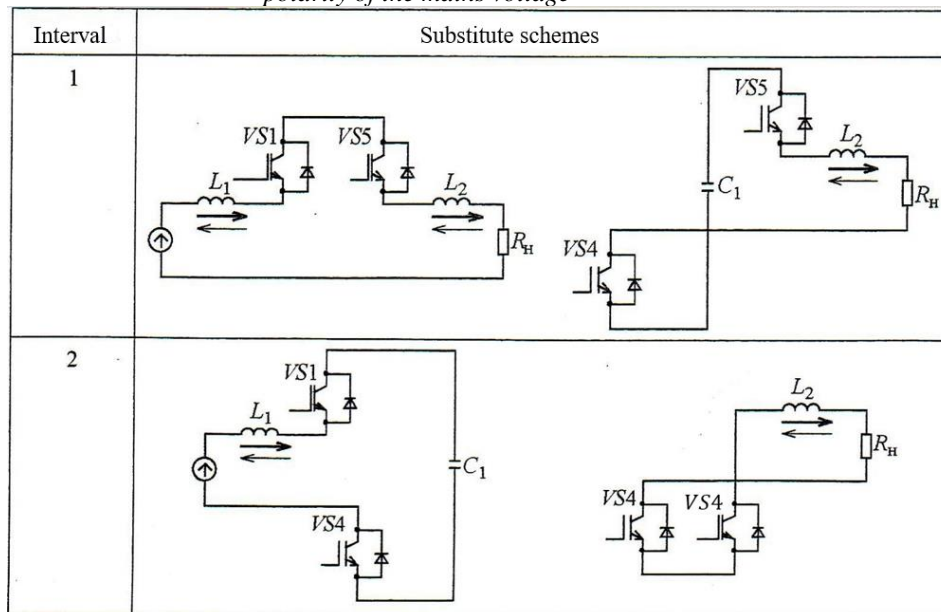


Fig. 5 shows the results of simulation of the converter in the ascending mode: diagrams of the algorithm of the key  $VS1$ , the ripple of the input current  $i_1$ , current  $i_{C1}$  and voltage  $u_{C1}$  of the buffer capacitor.

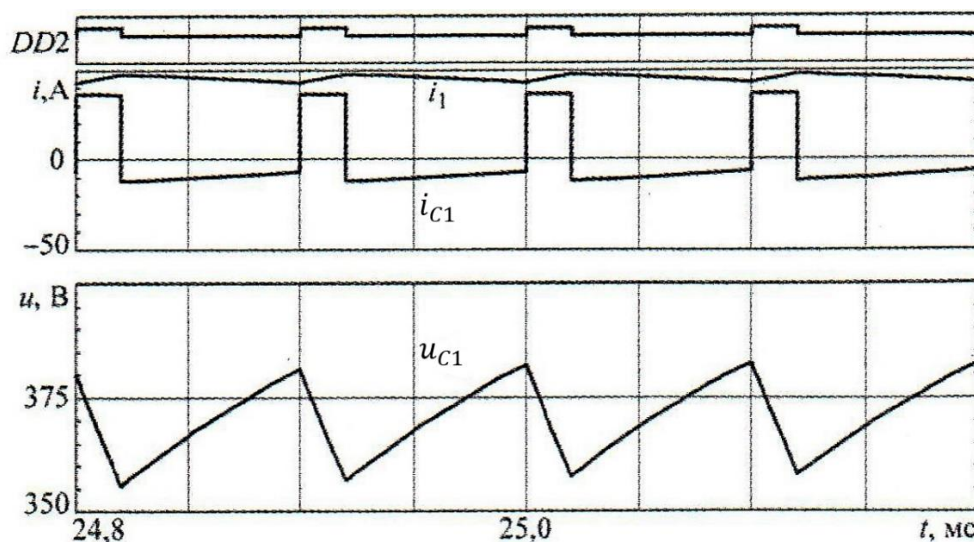


Figure 5 - Diagrams of the algorithm for the operation of the key  $VS2$  and current and voltage ripples of the intermediate link of the inverter controller in the ascending mode

Table T2 shows the alternate circuits for the two intervals of the converter in the uplink mode with a positive polarity of the mains voltage. The first (working) interval starts with  $VS2$  on and  $VS1$  off. In this interval there is an accumulation of energy in the choke  $L_1$  and the return of the buffer capacitor  $C_1$  in the energy load, the accumulation of energy during the previous interval. In the second interval ( $VS1$  on,  $VS2$  off) the capacitor  $C_1$  accumulates energy coming from two sources - mains and choke  $L_1$ . At both intervals, the output circuit  $L_2 - R_H$  is connected to the buffer capacitor  $C_1$ , so the output voltage  $u_2$  almost repeats the voltage  $u_{C1}$  (voltage drop on public switches is negligibly small).

With the help of diagrams and substitution diagrams, it is possible to calculate the characteristics and analyse in detail the electromagnetic processes in both modes of such a converter, using the method described in [6].

An approximate calculation sufficient for practice is possible according to formulas known from the theory of pulse-width control [5] and simplified by replacing the exponential sections of the curves with linear ones and taking into account the symmetry of pulsations relative to the amplitude of the fundamental harmonic curve.

Simplified formulas are summarized in table T3, where  $t_{BKЛ}$  - the duration of the working interval;  $\tau$  - regulation period;  $\gamma = t_{BKЛ}/\tau$  - coefficient of filling of control pulses;  $f_k = 1/\tau$  - frequency of regulation.

Table 2. The alternate circuits for the two intervals of the converter in the uplink mode with a positive polarity of the mains voltage

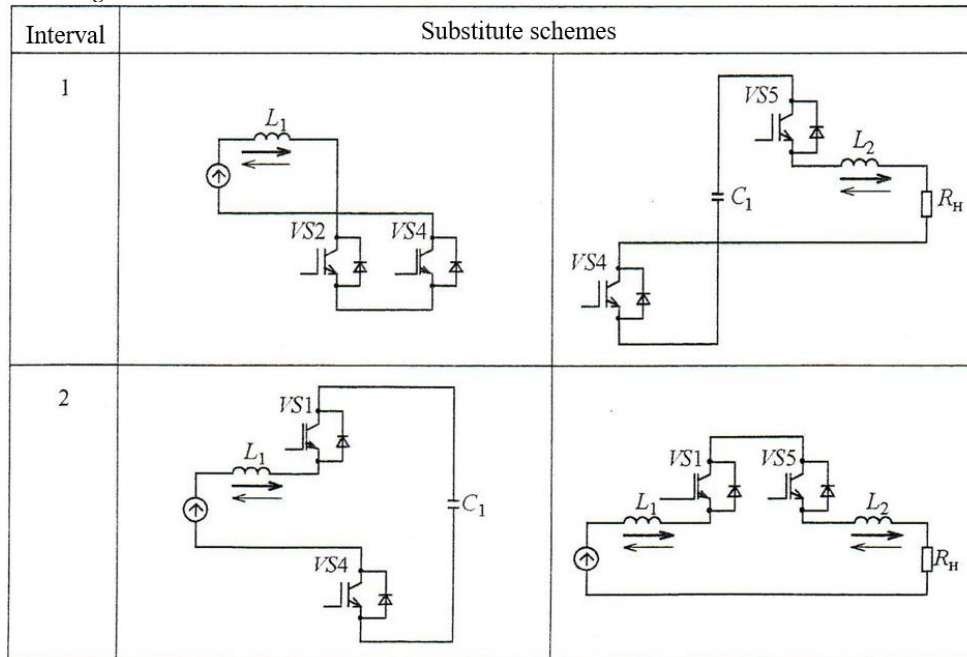


Table 3. Simplified formulas

Inverter-type converter with pulsating voltage link	Down-mode	Ascending mode
The main harmonic of the output voltage	$U_2 = \gamma * U_1$	$U_2 = \frac{U_1}{1 - \gamma}$
The main harmonic of the input current	$I_1 = \gamma * I_2$	$I_1 = \frac{I_2}{1 - \gamma}$
The maximum range of voltage pulsations on the capacitor	$\Delta U_{C1max} = \frac{U_{1max} * \gamma^2 (1 - \gamma) \tau}{R_H * C_1}$	$\Delta U_{C1max} = \frac{I_{2max} * \gamma}{f_k * C_1}$
Maximum amplitude of input current pulsations	$\Delta I_{1max} = \frac{\Delta U_{Cmax}}{2\pi f_k * L_1}$	$\Delta I_{1max} = U_{1max} * \gamma (f_k * L_1)$

Modelling and analysis of single-phase regulator-stabilizer of alternating voltage of matrix type with discharge of reactive load energy into the network (Fig. 6)

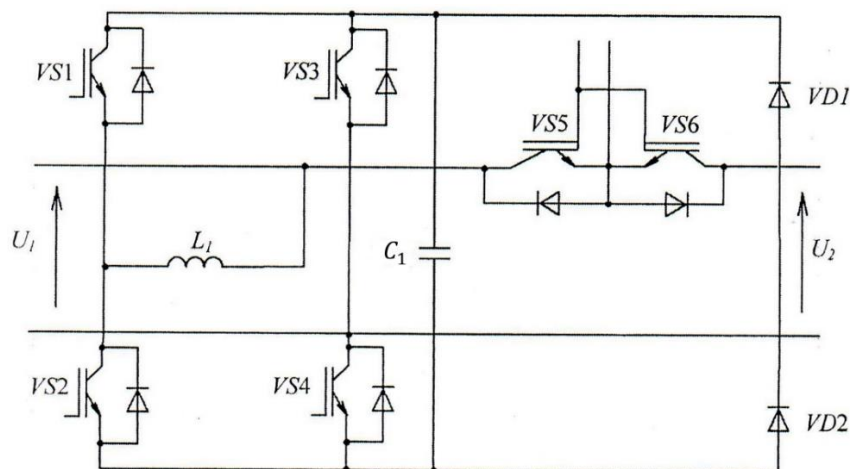


Figure 6 - Scheme of the matrix voltage regulator with the discharge of reactive load energy into the network



The composition of such a regulator includes: reversible rectifier on semi-controlled AC switches  $VS1 - VS4$ ; buffer capacitor  $C_1$ ; fully controlled power switch  $VS5, VS6$ ; reverse diodes  $VD1, VD2$  to discharge the load energy into the capacitor and the mains; input choke  $L_1$  to limit the current in the buffer capacitor when the regulator is turned on and possible voltage drops. The rectifier, in contrast to inverter regulators, conducts reactive load current in non-operating intervals (intervals of pauses in the output voltage). Longitudinal switches  $VS5, VS6$  conduct load current in working time intervals. Counter-series transistors of the longitudinal switches of the regulator have common clamps and the same control algorithm, which simplifies the control system.

Fig. 7 shows a diagram of the simulation model of this regulator; Fig.8 - the results of modelling when working on low-cosine load ( $L_2 = 40 \text{ мГн}$ ,  $R_H = 10 \text{ Ом}$ ): diagrams of voltage on the buffer capacitor  $u_{C1}$ , voltage  $u_2$  and current  $i_2$  at the output of the converter. From the diagrams in Fig.8 it is seen that there is a time zone during which the load voltage is not regulated (zone of insensitivity to control). The appearance of the insensitivity zone is due to the fact that at this time the load current is shorted to the network bypassing the power switch through the transistors of the reverse rectifier and reverse diodes. The duration of the insensitivity zone depends on the magnitude of the phase shift angle of the load current relative to the mains voltage. Due to the presence of insensitivity zones, the control characteristic of this converter is non-linear, which does not affect its operational capabilities [7-8].

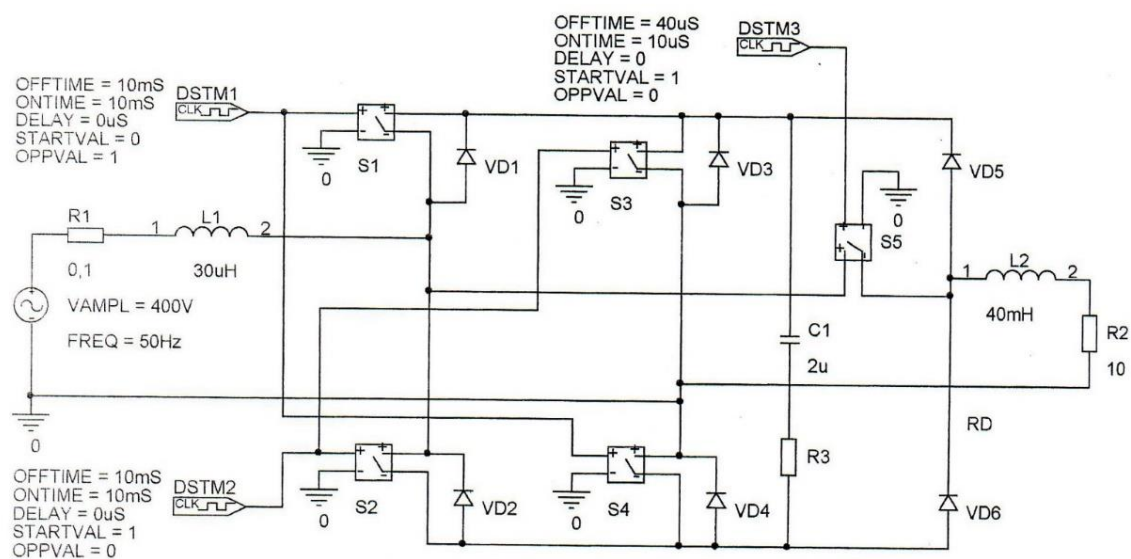


Figure 7 - Simulation model of a matrix controller with a discharge of reactive load energy into the network

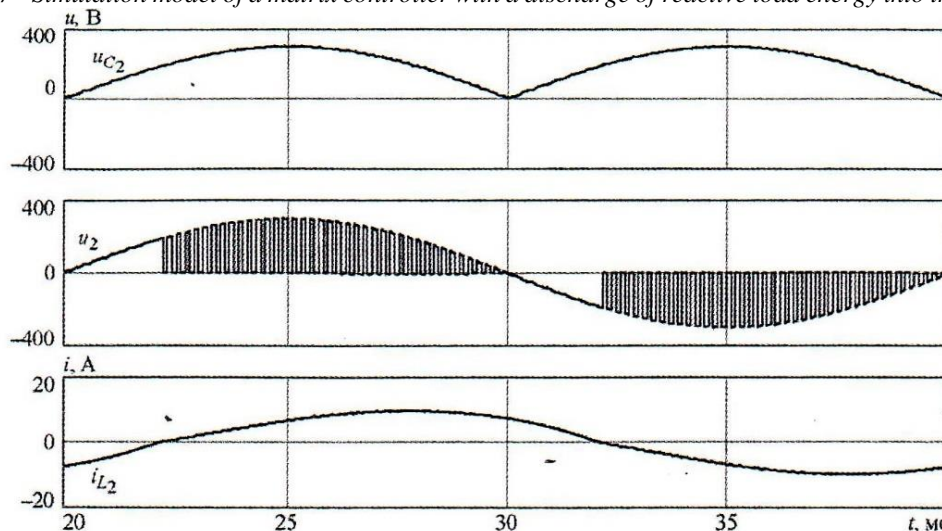


Figure 8 - Diagrams of voltages and output current of the matrix controller with energy discharge into the network

Fig. 9 shows diagrams of current pulsations in the power circuits of the regulator: input current  $i_1$ , reverse diode current  $i_{VD6}$ , output current  $i_2$ .

From the analysis of the regulator model its substitute schemes on switching intervals of invariant structure follow (table 4).

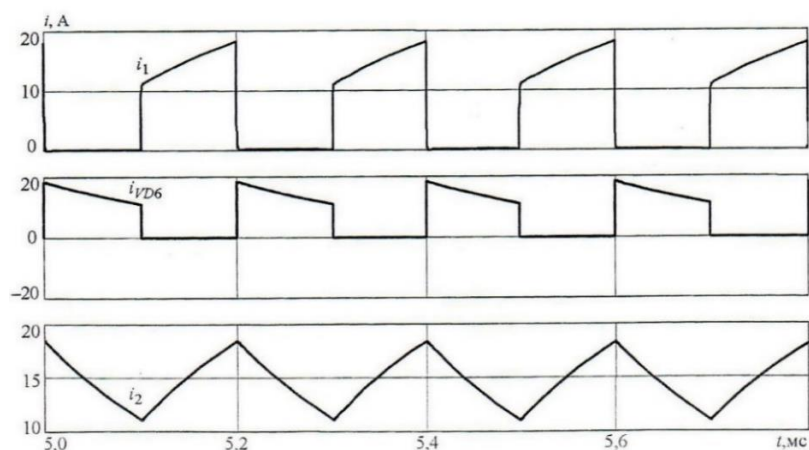


Figure 9 - Diagrams of current pulsation in a matrix controller with a discharge of energy into the network

T4 shows that at all switching intervals there is a charge-discharge circuit of the buffer capacitor  $C_1$ . The direction of current in this circuit does not depend on the state of the power switches  $VS5$ ,  $VS6$ , and the voltage on the capacitor almost repeats the mains voltage in absolute value and phase. To limit the starting current, the initial charge current of the capacitor when the regulator is connected to the mains, the capacitance of the buffer capacitor  $C_1$  is chosen to be minimal, assuming that the impedance of the circuit must be greater than the load impedance, i.e.  $p = \sqrt{L_1/C_1} \geq Z_2$ . Due to the small capacitance of the capacitor, the currents in the charge-discharge circuit of the capacitor are small, so this circuit has little effect on the course of electromagnetic processes in the regulator. The right part of table T4 shows other circuits that are formed at intervals of the constant structure of this converter with a positive polarity of the mains voltage. At the first operating interval, the load is connected to the network with power switches  $VS5$ ,  $VS6$  and according to their state, the load current passes through either the upper or lower circuit. After switching off the power switches, two variants of electromagnetic processes are possible - with or without the second interval.

The second interval occurs only in the time zone where the direction of the load current does not coincide with the direction of the mains current, i.e. in the zone of insensitivity of the controller. Two circuits are formed in this zone: load energy recovery circuit into the network; buffer capacitor recharge circuit. Two options are also possible in the third interval. If the direction of the load current does not coincide with the direction of the mains voltage, the recovery circuit remains; if it coincides, a short-circuit of the load short circuit is formed, which ensures the formation of a zero shelf in the output voltage and control of this voltage.

Table 4. Substitute schemes on switching intervals of invariant structure

Interval	Substitute schemes	
1		
2		
3		

Simplified calculation formulas for the regulator with the discharge of energy into the network are as follows: basic harmonics of output voltage  $U_2 = \gamma * U_1$ , input  $I_1 = \gamma * I_2$  and output  $I_2 = \gamma * U_1 / Z_2$  currents, maximum amplitude of output current  $\Delta I_{2max} = \frac{U_{1max}}{R_2} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{R_2 * \gamma}{f_K * L_2} \right) \right]$ .

These formulas can be used in the presence of a filter capacitor at the output of the regulator, because the optimally selected filter capacitor has almost no effect on the value and shape of the output current of the regulator. The output voltage, on the contrary, significantly depends on the capacitance of the filter capacitor. The harmonic coefficient of the output voltage is the starting point when choosing all the parameters of the regulator [9, 10].

In three-phase AC voltage regulators instead of power switches built on counter-series transistors with reverse diodes, it is advisable to use bridge diode-transistor switches, both longitudinal and transverse.

Fig. 10 shows a diagram of a three-phase matrix converter with reset and energy recovery, built on the power bridge longitudinal key VS7. When the key VS7 is closed, the load  $L_2, R_2$  is connected to the network and there is an accumulation of energy in it; when VS7 is switched off, the load is switched on the clamp of the buffer capacitor  $C_2$  and the reversing rectifier VS1-VS6. The energy accumulated in the load through the diodes of the bridge key VS7 and cut-off diodes reset VD1, VD2 enters the buffer capacitor  $C_2$ , and from there to the network through the transistors VS1-VS6 reversing rectifier. Buffer capacitor  $C_2$  performs protective functions of the "snubber"; cut-off diodes VD1, VD2 prevent short circuit of capacitor  $C_2$ .

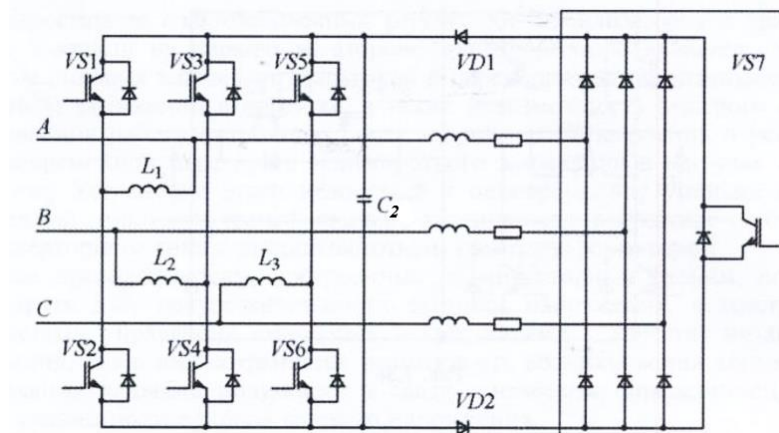


Figure 10 - Scheme of a three-phase voltage regulator with energy discharge into the network

Fig. 11 shows a simulation model of the logic unit of the control system, which forms the algorithms for cyclic switching of transistors VS1-VS7, necessary to create a direct connection of the buffer capacitor  $C_2$  with the network without the risk of short circuit.

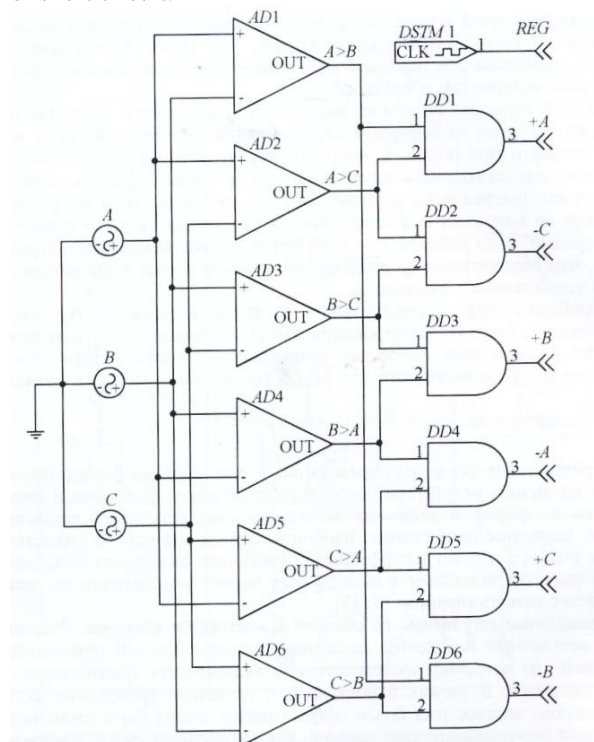


Figure 11 - Simulation model of the logic unit of the converter control system in Fig.10



Fig. 12 shows a simulation model of the power part of this converter, Fig. 13 - the results of modelling his work: diagrams of the algorithm of the control system, pulsating voltage on the buffer capacitor with the designation of individual sections; phase voltage  $U_a$  on the load.

From the diagrams in Fig. 13 it follows that the output voltage pulses  $U_a$  during the period are evenly distributed within the bypass, which repeats the voltage of phase A of the network, currents and voltages are symmetrical about the time axis. Consequently, the above regulator has a linear regulation characteristic, has a simple power section and provides the required output voltage quality and performance characteristics.

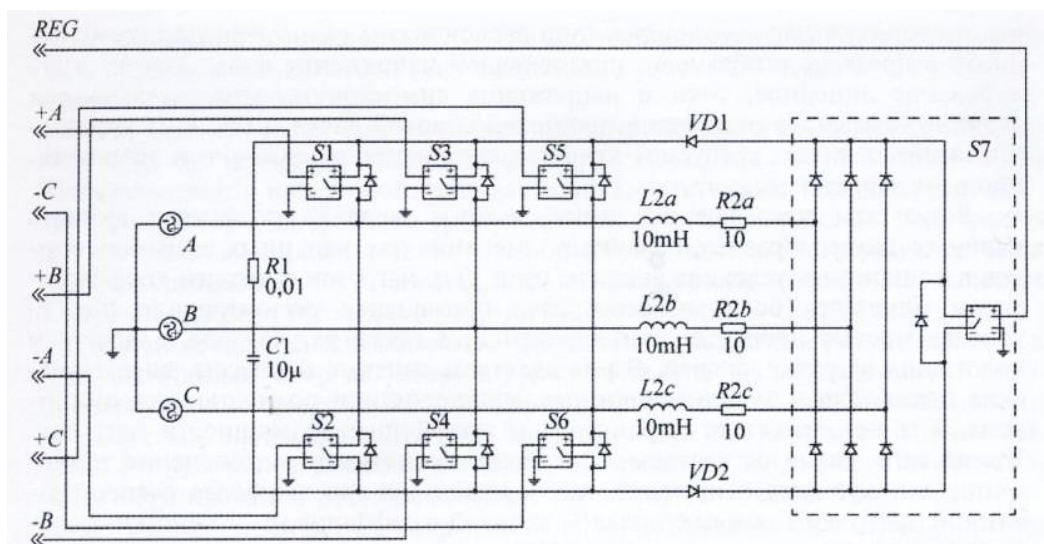


Figure 12 - Simulation model of the power part of the voltage regulator in Fig.10

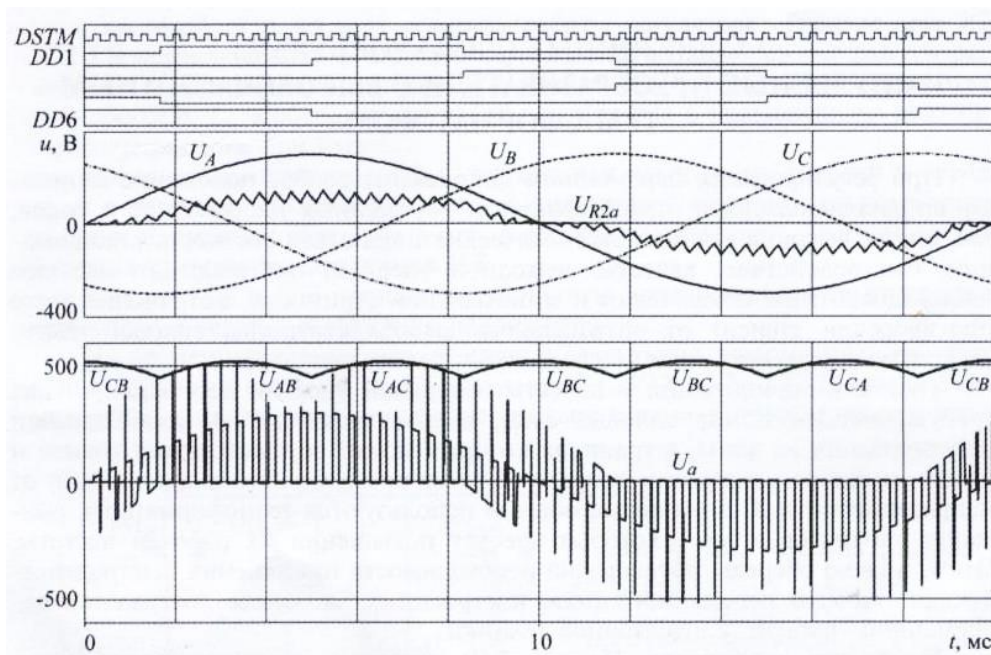


Figure 13 - The results of modelling the voltage regulator in Fig. 13

**Conclusions.** The results of research of simulation models allow identify the most appropriate areas of use of certain schemes of regulators in specific operating conditions. Thus, the inverter-type AC voltage regulator-stabilizer circuit with intermediate pulsating voltage link (Fig. 1) is the most optimal for the construction of high-efficiency wide-range dual-band voltage converters, uninterruptible units and universal general purpose sources. However, the construction of three-phase converters of this type directly from single-phase is unjustified due to the complexity of the circuit and the presence of high-frequency switches, the simultaneous inclusion of which can cause an internal short circuit in the device.

The scheme of the matrix controller with the discharge of reactive power load into the network (Fig. 6) is simple and reliable due to the lack of high-frequency switches, so it is optimal for building both single-phase and multiphase wide-range regulators and limiters of AC and voltage in the middle and especially low power. In

converters of this type, electromagnetic processes, energy performance and operational characteristics are completely determined and do not depend on the parameters and power factor of the load. In addition, such regulators provide intensive braking of induction motors (the most common load for them).

Converters of both types have reversible rectifiers, which allows you to adjust the input power factor [3].

#### References

1. Novskyi V.A., Holubiev V.V., Popov A.V. Optimal regulation of alternating voltage. // Techn. electrodynamics. Thematic issue "Problems of modern electrical engineering". - 2002.-4.6.-P.45-47.
2. Lipkivsky K.O., Novsky V.O. Voltage stabilization in the electrical network when changing line resistance and load // Prep. Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Coll. наук. пр. Energy efficiency. Kyiv: IED NASU, 2012.-p.25-35.
3. Shidlovsky A.K., Novsky V.A., Kaplichny N.N. Stabilization of electric energy parameters in distribution networks. - Kyiv: Nauk. opinion, 2002. - 313 p.
4. Novsky V.O., Grudskaya V.P., Malahatka D.O. Multifunctional transformer-key converter for complex improvement of electricity quality in three-phase system with variable and nonlinear load // Scientific Bulletin of NTUU "KPI" - 2013. - №2 - p. 17-29
5. Holubiev V.V. Pulse conversion of alternating voltage. -K.: Scientific Opinion, 2016.-245p.
6. Rudenko V.S., Zhuikov V.Ya., Koroteev N.E. Calculation of converter equipment devices. - K.: Technique, 1990.-135 p.
7. Petrusenko S.V. Calculation of energy characteristics of a wide-range pulse AC converter with an output LC filter // prep. Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine: Coll. Science. pr.- Kyiv: IED NASU, 2009. - p.106-114.
8. Stofanic Anton. An application of the two level control at the sinus output voltage inverters solving. //Power Electronics Conf. ( Budapest, 21-25 October, 2020 ). - 2020 - p. 177-186
9. Holubiev V.V. Calculation and optimization of the output L-C filter of the pulse converter of alternating voltage // Techn. electrodynamics.-2012.-No.1.-p.33-37
10. Devan Shashi B, Segsworth R. Sidney. Input and output filters design with power converter// IEEE Trans. Ind. And Gen. Appl. - 2019. - p. 378-383

<sup>1</sup>**В.П. Грудська**, канд. техн. наук, доц, ORCID 0000-0003-4242-5536

<sup>2</sup>**В.В. Голубєв**, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, ORCID 0000-0002-6447-8199

<sup>1</sup>**О.С. Денисенко**, студентка, ORCID 0000-0002-1803-9697

<sup>1</sup>**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

<sup>2</sup>**Інститут електродинаміки НАН України**

#### **ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ МАТРИЧНОГО ТА ІНВЕРТОРНОГО ТИПУ ШЛЯХОМ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

*Викладено результати імітаційного моделювання функціональних можливостей імпульсних перетворювачів змінної напруги з вільною циркуляцією енергії двох типів: інверторного типу з проміжною ланкою пульсуючої напруги і матричного типу зі скидом реактивної потужності у мережу. За допомогою пакету програм OrCAD досліджені основні режими роботи вказаних перетворювачів: пониження і підвищення вихідної напруги відносно вхідної. Результати моделювання кожного режиму подано у вигляді епюр алгоритму управління ключами перетворювача і епюр його електричних характеристик: вхідного та вихідного струмів, напруги на проміжній ланці (буферному конденсаторі) і на виході. На основі візуальних моделей для понижувального і підвищувального режимів роботи створено математичні моделі та заступні електричні схеми досліджуваних перетворювачів на інтервалах їх незмінної структури. Для обох режимів запропоновано спрощені формули наближеного розрахунку електричних параметрів з достатньою для практики точністю. Для трифазного матричного перетворювача зі скидом і рекуперацією енергії окремо представлено імітаційні моделі логічного блоку системи управління і схеми силової частини. На основі візуальних моделей, отриманих за допомогою пакету програм OrCAD, створено математичні моделі та заступні електричні схеми вказаних перетворювачів на інтервалах їх незмінної структури. Проведене імітаційне моделювання дозволяє визначити найбільш доцільні області використання таких перетворювачів і виконати оптимізацію їх силових схем і систем управління.*

**Ключові слова:** *реверсивний випрямляч, буферний конденсатор, матричний регулятор, інверторний регулятор, імітаційна модель, силовий ключ, реактивна енергія.*

Надійшла 31.05.2022

Received 31.05.2022

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ПРИВОДУ МОТОР-БАРАБАНУ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

*В роботі представлено методику розрахунку максимальної потужності приводу конвеєра за умови максимальної температури нагріву елементів. Для дослідження теплового режиму приводу обрано привод за схемою мотор-барабан. Особливістю даного приводу є відсутність вентилятора і повітряного охолодження, що може призвести до його перегріву. Основними складовими, які генерують теплову енергію є асинхронний двигун з коротко замкнутим ротором і редуктор. Простір мотор-барабана заповнено робочою рідиною, яка виконує функції мащення і охолодження складових системи. Аналіз конструкції приводу мотор-барабана дозволив встановити кількісні характеристики джерел теплового випромінювання окремих складових приводу з врахуванням особливостей взаємодії складових елементів. Кількісні характеристики джерел теплового випромінювання окремих складових приводу дозволили встановити взаємні впливи різних частин об'єкту дослідження на його температурний стан. Рівняння теплового балансу застосовано за умови рівномірного розподілу теплового поля по поверхні елементів приводу. Рівняння теплового балансу системи мотор-барабан-оточує середовище дозволяє визначити межові значення потужності приводу при відомих геометричних параметрах системи. Для визначення повного коефіцієнту теплопередачі системи робоче середовище-барабан-оточуюче середовище використані коефіцієнти конвективного теплообміну між робочим середовищем і стінкою барабана та стінкою барабана і оточуючим середовищем. Аналіз отриманих даних свідчить про суттєве обмеження необхідної потужності приводу. Обмежена потужність приводу не дозволяє застосовувати даний вид приводу для конвеєрів великої довжини. Підвищення потужності приводу за даною схемою можливо забезпечити шляхом примусового охолодження робочої рідини або зміни конструкції приводу шляхом збільшення поверхні, що контактує з робочим середовищем.*

**Ключові слова:** конвеєр, мотор-барабан, потужність приводу, температура, повний коефіцієнт теплопередачі

**Вступ.** Великі можливості підвищення продуктивності праці, зниження собівартості продукції, а також створення сприятливих умов для комплексної механізації та повної автоматизації транспортних процесів на виробничих підприємствах відкриває застосування потокових видів транспорту, в основному конвеєрного. Із існуючих типів конвеєрів найбільшого поширення набули стрічкові конвеєри традиційної конструкції. Вони є основним засобом безперервного транспорту в основних галузях виробництва України.

Характерною тенденцією сучасного розвитку стрічкових конвеєрів в Україні і світі є значне збільшення їхньої продуктивності, довжини та потужності. Це збільшенням вантажопотоків і довжини транспортування. Так для забезпечення сучасних шахтних та кар'єрних вантажопотоків вітчизняною промисловістю випускаються конвеєри продуктивністю до 5000-6000 м<sup>3</sup>/год. На гірських підприємствах України експлуатуються конвеєрні лінії довжиною 3 км і більше, а світовій практиці відомі конвеєрні лінії довжиною понад 100 км при довжині одного конвеєра 8-10 км [1-4].

Системи приводів є базовими системами стрічкових конвеєрів. Різноманітність трас конвеєрів, що перевозяться вантажів призвело до появи широкого спектра різноманітних типів приводів та їх конфігурацій. Кожному з цих типів відповідає власний метод проектування та специфічні обмеження застосування. Для української промисловості найбільшого розповсюдження знайшли приводи з рознесеною редукторною компоновкою: електродвигун, редуктор, барабан. Про те дана компоновка має свої недоліки, до основних з яких необхідно віднести:

- Великі габарити;
- Низький коефіцієнт корисної дії;
- Високий рівень шуму;
- Металоємність конструкції.

Поряд з цим, набуває більшого поширення в промисловості різноманітні конструкції мотор-барабанів. Данні схеми приводу конвеєрів позбавлені вказаних недоліків. Мотор-барабан є

альтернативним типом приводу стрічкового конвеєра, відмінним від редукторної схеми. Мотор-барабан є відрізком труби, закритим з обох кінців кришками, всередину якого вміщено електродвигун і редуктор. Сам виріб встановлюється нерухомо на цапфи підшипники, при цьому барабан при подачі на нього живлення обертається в нерухомих цапфах. Особливість конструкції даного приводу забезпечують ряд переваг:

- Довгий термін служби;
- Простий монтаж;
- Висока енергоефективність;
- Високий коефіцієнт корисної дії;
- Низька вартість володіння;
- Низький рівень шуму;
- Компактність;
- Підвищений захист від впливу агресивного середовища;
- Низький знос.

Дані переваги привели до широкого застосування мотор-барабанів для конвеєрів харчової і торговельної промисловості. Але слід відмітити, що потужність даних приводів обмежується сотнями Вт, що не викликає проблем, що до охолодження складових елементів. Разом з цим, застосування даної компоновки для приводів великої потужності при певних умовах може призвести до перегріву елементів, зокрема ущільнень, ізоляції, підшипників і швидкого виходу з працездатного і справного станів[5-6].

При вирішенні задачі забезпечення надійної роботи приводу мотор-барабану стрічкового конвеєра для випадків реалізації великої потужності необхідно розглянути процеси теплоутворення і тепло переносу системи: мотор-барабан-оточує середовище. Таким чином для визначення теплового стану об'єкта необхідно проаналізувати цілий комплекс теплових втрат для окремих складових приводу і на основі встановлених даних створити рівняння теплового балансу системи: мотор-барабан оточує середовище. Детальний розгляд системи дозволить мінімізувати теплові витрати приводу, що дозволить знизити температуру привода в цілому.

**Мета і завдання дослідження.** Метою даного наукового дослідження є розробка нової методики визначення температурного режиму приводу мотор-барабану стрічкового конвеєра на основі аналізу комплексу теплових втрат для окремих складових приводу і розгляду рівняння теплового балансу системи: мотор-барабан оточує середовище.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувались наступні задачі:

- Розробка структурної схеми джерел теплового випромінювання окремих складових приводу мотор-барабану стрічкового конвеєра з врахуванням особливостей взаємодії складових елементів, що дозволить встановити взаємні впливи різних частин об'єкту дослідження на його стан;
- Створити рівняння теплового балансу системи: мотор-барабан оточує середовище;
- Встановити рекомендації, що до мінімізувати теплої дії на елементи приводу, що дозволить знизити температуру привода в цілому.

**Матеріал і результати дослідження.** При розробці структурної схеми джерел теплового випромінювання окремих складових приводу мотор-барабану стрічкового конвеєра розглянемо типову конструкцію яка знайшла найбільшого застосування промислових підприємствах України. Прототипом приводних станцій за схемою мотор барабан стала конструкція фірм ВП Трансвугілля та Interroll[1-4, 6-8]. Перетин мотор-барабана даної конструкції представлено на рис. 1. Дана лінійка мотор-барабанів у якості джерела енергії використовує асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. На вихідному валу асинхронного барабану розташовано шестерня яка має зчеплення зубчатим колесом. Характерною особливістю даного приводу є відсутність вентилятора і повітряного охолодження. В даному випадку простір мотор-барабана заповнено робочою рідиною, яка виконує функції мащення і охолодження складових системи. Для перетворення крутного моменту можливо використання двох варіантів редукторів: планетарного і циліндричного двохступінчастого, варіант якого зображено на схемі. Для передачі крутного моменту на барабан використовується зубчате колесо з внутрішнім зачепленням. Барабан даної схеми приводу при необхідності може мати оребрення або покритий гумою для кращого зчеплення з гумою. Зі схеми видно, що за певних умов можливе перегрівання елементів приводу з причини недостатнього охолодження.

Розглянемо головні джерела випромінювання теплової енергії. До джерел випромінювання теплової енергії системи мотор-барабан них можна віднести асинхронний двигун і редуктор.

Потужність теплового випромінювання асинхронного двигуна:

$$P_a = \sqrt{3} IU(1 - \eta_a), \quad (1)$$

де  $I$  і  $U$  – струм і напруга асинхронного двигуна;  $\eta_a$  – коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором.

Залежно від потужності асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором звичайно складає (0,70...0,90). Причому двигуни більшої потужності мають, як правило, кращий номінальний ККД ніж

двигуни малої потужності. Враховуючи, що асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором на виробництві переважно працюють при певному недовантаженні, їх проектують таким чином, щоб мав максимальне значення 0,75.

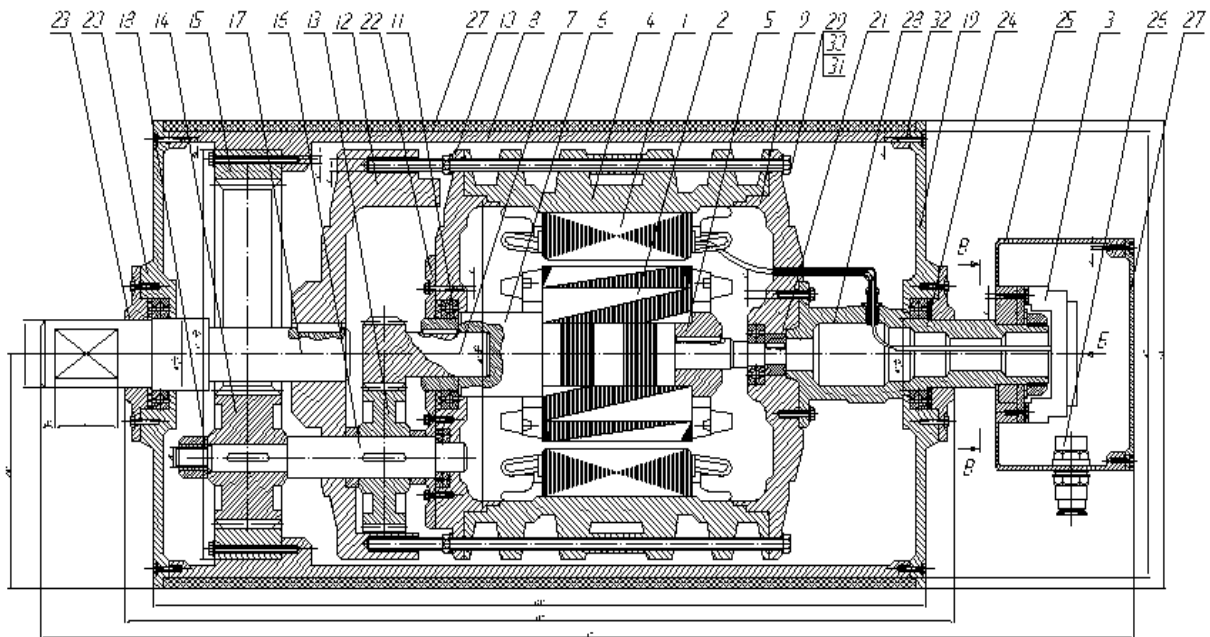


Рисунок 1 – Перетин приводу мотор-барабану стрічкового конвеєра:

1 – Статор; 2 – Ротор; 3 – Клемний зажим; 4 – Станіна; 5 – Втулка ротора; 6 – Вал ротора; 7 – Зубчастий вал; 8 – Корпус барабана; 9 – Передній щит двигуна; 10 – Задній щит двигуна; 11 – Втулка зубчастого валу; 12 – Корпус редуктора; 13 та 14 – Зубчасті колеса; 15 – Зубчастий вінець; 16 – Вал редуктора; 17 – Вал барабану; 18 – Фіксатор; 19 – Передній фланець; 20 – Задній фланець; 21 – Передня кришка двигуна; 22 – Задня кришка двигуна; 23 – Сальник; 24 – Вал наскрізний; 25 – Клемна коробка; 26 – Кабельний ввід; 27 – Підведення; 28 – Пішипник.

Потужність теплового випромінювання редуктора [9]:

$$P_r = \sqrt{3} IU \eta_a \cos \varphi (1 - \eta_r), \quad (2)$$

де  $\eta_r$  – коефіцієнт корисної дії редуктора.

Загальна теплова потужність мотор-барабана:

$$P_b = \sqrt{3} IU ((1 - \eta_a) + \eta_a \cos \varphi (1 - \eta_r)) \quad (3)$$

В стані теплового балансу кількість теплової енергії яка генерується елементами мотор-барабана  $P_b$  дорівнює кількості енергії яка випромінюється корпусом оболонки барабана  $Q_b$ :

$$P_b = Q_b \quad (4)$$

Енергія яка випромінюється корпусом оболонки барабана  $Q_b$ , за умови рівномірного розподілу теплового поля по поверхні елементів привода:

$$Q_b = K \left( \pi DB + \frac{\pi D^2}{2} \right) (t - t_0), \quad (5)$$

де  $K$  – повний коефіцієнт теплопередачі системи робоче середовище-барабан-оточуюче середовище;

$D$  – діаметр барабана;  $B$  – ширина барабану;  $t$  – температура робочого середовища в середині барабану;  $t_0$  – температура оточуючого середовища (20 – 40°C).

Повний коефіцієнт теплопередачі системи робоче середовище-барабан-оточуюче середовище [10]:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (6)$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнти конвективного теплообміну між робочим середовищем і стінкою барабана та стінкою барабана і оточуючим середовищем (900 і 20  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$ );

$\lambda$  – теплопровідність сталеної оболонки 50  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$ ;  $\delta$  – товщина стінки барабану (0,01-0,02м).

Перетворюючи рівняння 6 повний коефіцієнт теплопередачі системи робоче середовище-барабан-оточуюче середовище 19,7  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$ .



Використовуючи отримані залежності 3 і 5 можливо знайти межові значення потужності приводу при відомих геометричних параметрах системи:

$$\sqrt{3} IU = \frac{K \left( \pi D B + \frac{\pi D^2}{2} \right) (t - t_0)}{((1 - \eta_a) + \eta_a \cos \varphi (1 - \eta_r))}, (5)$$

На рис. 2 зображено зміну максимальної потужності приводу, яка забезпечує температуру приводу 80°C для різних типорозмірів приводу, з шириною барабана 1 м і 2 м.

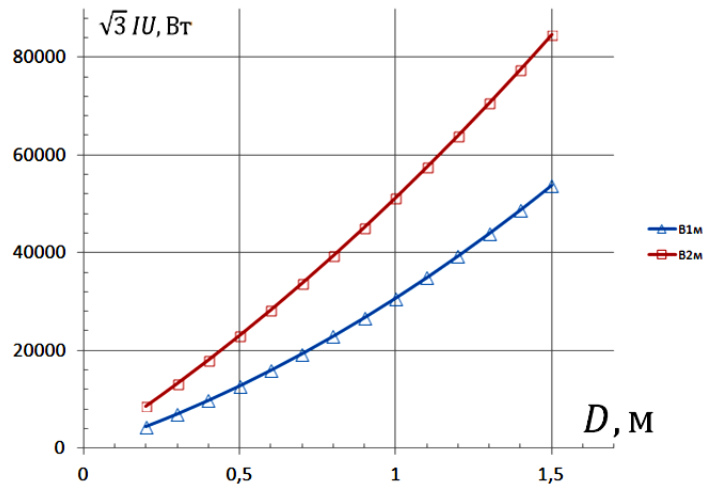


Рисунок 2 – Графік зміни максимальної потужності приводу за умови обмеження по температурі (80°C):

△ △ △ △ – ширина барабану 1м; □ □ □ □ – ширина барабану 2м

Аналіз отриманих даних свідчить про суттєве обмеження необхідної потужності приводу, що дозволяє застосовувати даний вид приводу для конвеєрів малої довжини. Також у випадку застосування футерованих барабанів коефіцієнт теплопередачі системи суттєво знизиться, що знизить теплопередачу і максимальне значення потужності. Підвищення потужності приводу за даною схемою можливо забезпечити шляхом примусового охолодження робочої рідини.

#### Висновки

1. На основі аналізу конструкції приводу мотор-барабану встановлено кількісні характеристики джерел теплового випромінювання окремих складових приводу з врахуванням особливостей взаємодії складових елементів, що дозволило встановити взаємні впливи різних частин об'єкту дослідження на його стан;
2. На основі рівняння теплового балансу системи мотор-барабан оточує середовище встановлено межові значення потужності приводу при відомих геометричних параметрах системи. Аналіз отриманих даних свідчить про суттєве обмеження необхідної потужності приводу, що дозволяє застосовувати даний вид приводу для конвеєрів малої довжини. Так для діаметру 1 м і ширині 1 м потужність складає 30758 Вт, що не достатньо для забезпечення руху конвертера довжиною більше 300 м;
3. Підвищення потужності приводу за даною схемою можливо забезпечити шляхом примусового охолодження робочої рідини.

#### Список використаної літератури

1. Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г. Теория и расчет ленточных конвейеров // М.: Машиностроение. – 1987. – Т. 336. – С. 6.4.
2. Визначення впливу зміни проектного положення профілю стрічкового конвеєра на навантаження роликів / А. В. Данілін, С. В. Зайченко, С. П. Шевчук, Н. І. Жукова, І. М. Пасічник // Геоінженерія : науково-технічний журнал. – 2020. – Вип. 3. – С. 20–25.
3. Шевчук С. П., Зайченко С. В., Вапничная В. В. Обоснование массогабаритных параметров роликов ленточных конвейеров по критерию надежности // Перспективы развития восточного Донбасса. – 2016. – с. 221–228.
4. Волошин Г. М. Обґрунтування параметрів конструкції елементів конвеєрних роликів за критерієм енергоефективності // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2016. – №. 88. – с. 40–46.
5. Зайченко С. В., Вовк О. О., Шевчук Н. А. Обґрунтування параметрів конструкції елементів конвеєрних роликів за критеріями довговічності // Вісник національного технічного університету України кийський політехнічний інститут. серія: Гірництво. – 2016. – №. 31. – с. 65–73.

6. Hamacher S. The Drum Motor. – Springer Berlin Heidelberg, 2020.
7. Uttrup P. Interroll drum motors: hygienic and energy efficient //Trends in Food Science & Technology. – 2009. – №. 20. – С. S17-S18.
8. Uttrup P. Interroll drum motors: hygienic and energy efficient //Trends in Food Science & Technology. – 2009. – №. 20. – С. S17-S18.
9. Киркач Н. Ф., Баласанян Р. А. Расчет и проектирование деталей машин //Х.: Основа. – 1991.
10. Середюк М. Д., Якимів Й. В., Лісафін В. П. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів//Івано-Франківськ: Кременчук. – 2001. – Т. 517.

**Vitaliy Pobigailo**, Associate Professor, Ph.D., ORCID 0000-0003-2673-7329

**Stefan Zaichenko**, prof. Dr., ORCID 0000-0002-8446-5408

**Natalia Zhukova**, Associate Professor, Ph.D., ORCID 0000-0002-4215-6981

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

**Vadim Shalenko**, Associate Professor, Ph.D., ORCID 0000-0002-6984-0302

**Kyiv National University of Construction and Architecture**

#### RESEARCH OF THE THERMAL REGIME OF THE BELT CONVEYOR MOTOR-DRUM

*The paper presents a method for calculating the maximum power of the conveyor drive under the condition of the maximum heating temperature of the elements. To study the thermal regime of the drive, the drive was selected according to the motor-drum scheme. The peculiarity of this drive is the lack of fan and air cooling, which can lead to overheating. The main components that generate heat energy are an induction motor with a short-circuited rotor and a reducer. The space of the motor-drum is filled with working fluid, which performs the functions of lubrication and cooling of the system components. Analysis of the design of the motor-drum drive allowed to establish the quantitative characteristics of the sources of thermal radiation of the individual components of the drive, taking into account the peculiarities of the interaction of the components. Quantitative characteristics of the sources of thermal radiation of the individual components of the drive allowed to establish the mutual influences of different parts of the object of study on its temperature state. The heat balance equation is applied under the condition of uniform distribution of the heat field on the surface of the drive elements. The equation of thermal balance of the system motor-drum-environment allows to determine the limit values of the drive power at known geometric parameters of the system. Coefficient of convective heat transfer coefficients between the working medium and the drum wall and the drum wall and the environment are used to determine the total heat transfer coefficient of the working medium-drum-environment system. Analysis of the obtained data shows a significant limitation of the required drive power. Limited drive power does not allow this type of drive to be used for long conveyors. Increasing the power of the drive according to this scheme can be provided by forcibly cooling the working fluid or changing the design of the drive by increasing the surface in contact with the working medium.*

**Key words:** conveyor, drum motor, drive power, temperature, total heat transfer coefficient

#### References

1. Shahmejster L. G., Dmitriev V. G. Teoriya i raschet lentochnyh konvejerov //M.: Mashinostroenie. – 1987. – Т. 336. – С. 6.4.
2. Viznachennya vplyvu zmini proektnogo polozhennya profilu strichkovogo konveera na navantazhennya roliskoop / A. V. Danilin, S. V. Zajchenko, S. P. SHEvchuk, N. I. ZHukova, I. M. Pasichnyuk // Geoinzheneriya : naukovu-tekhnichnij zhurnal. – 2020. – Vip. 3. – С. 20–25.
3. Shevchuk S. P., Zajchenko S. V., Vapnichnaya V. V. Obosnovanie massogabaritnyh parametrov rolikov lentochnyh konvejerov po kriteriyu nadezhnosti //Perspektivy razvitiya vostochnogo Donbassa. – 2016. – s. 221-228.
4. Voloshin G.M. Obruntuvannya parametriv konstrukcii elementiv konveernih roliv za kriteriem energoefektivnosti //Girnichy, budiveln, dorozhni ta meliorativni mashini. – 2016. – №. 88. – s. 40-46.
5. Zajchenko S. V., Vovk O. O., SHEvchuk N. A. Obruntuvannya parametriv konstrukcii elementiv konveernih roliv za kriteriyami dovgovichnosti //Visnik nacional'nogo tekhnichnogo universitetu Ukraïni kiïvs'kij politekhnichnij institut. seriya: Girnictvo. – 2016. – №. 31. – s. 65-73.
6. Hamacher S. The Drum Motor. – Springer Berlin Heidelberg, 2020.
7. Uttrup P. Interroll drum motors: hygienic and energy efficient //Trends in Food Science & Technology. – 2009. – №. 20. – С. S17-S18.
8. Uttrup P. Interroll drum motors: hygienic and energy efficient //Trends in Food Science & Technology. – 2009. – №. 20. – С. S17-S18.
9. Kirkach N. F., Balasanyan R. A. Raschet i proektirovanie detalej mashin //H.: Osнова. – 1991.
10. Seredyuk M. D., YAKimiv J. V., Lisafin V. P. Truboprovodnij transport nafti i naftoproduktiv//Ivano-Frankivs'k: Kremenuchuk. – 2001. – Т. 517.

Надійшла 31.05.2022

Received 31.05.2022

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНОСУМІСНІ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ З РЕЛЕЙНИМ КЕРУВАННЯМ

*Розвиток промисловості призводить до зростання нелінійних навантажень, які є генераторами вищих гармонік у мережу. Існує багато пристроїв для фільтрації вищих гармонік. Використання активних випрямлячів у складі напівпровідникових джерел живлення, вирішує проблему генерації небажаних гармонік в мережу та забезпечує коефіцієнт потужності рівним 1. Розроблено 6 варіантів трифазних та однофазних джерел живлення працюючих в режимі джерела струму. Всі схеми складаються з двох частин: активного випрямляча та DC-DC перетворювача. Сфера використання таких джерел різноманітна: електропривод постійного струму, електроенергетична система вітряків, електрична система літаків. Система керування такими перетворювачами релейна, вона забезпечує формування струму та граничну швидкодію у відпрацюванні збурень. Цифровим моделюванням отримані осцилограми які підтверджують працездатність запропонованих джерел, електромагнітну сумісність джерел живлення з мережею та значення коефіцієнта потужності близьким до одиниці. Дослідження електромагнітних процесів дозволило отримати аналітичні вирази для частоти релейного режиму, ємності конденсаторів та умов працездатності джерел. Розроблена програма дозволяє отримати значення параметрів для вибору силових елементів схеми. Якість споживаного струму проаналізовано за допомогою розрахунку коефіцієнта гармонійних спотворень THD. Для усіх розглянутих джерел значення THD менше 5%, що задовольняє стандартам на якість споживаного струму.*

**Ключові слова:** джерело струму, електромагнітна сумісність, релейне керування, активний випрямляч

**Вступ.** Розвиток промисловості призводить до зростання нелінійних навантажень, які є генераторами вищих гармонік у мережу. Внаслідок цього проблема якості електроенергії ще більше загострюється. Економічні втрати через невідповідність якості електроенергії вимогам стандартів обчислюються мільярдами євро. Тому проблема електромагнітної сумісності (ЕМС) нелінійних навантажень з мережею стоїть на першому місці при розробці джерел живлення (ДЖ).

Техніко-економічні показники споживачів електроенергії багато в чому залежать від можливості джерел живлення реалізувати вимоги, які пред'являються до них з боку споживача: діапазон регулювання та стабілізація параметрів (струм, напруга, потужність), нечутливість до дії збурень

Одним із класифікаційних ознак джерел живлення є вид їх зовнішньої характеристики, відповідно до якого реалізуються режими джерела напруги, джерела струму або джерела потужності. Джерело живлення повинне максимально точно реалізувати умови:  $U = \text{const}$ , або  $I = \text{const}$ , або  $P = \text{const}$ .

Джерела напруги є загальноприйнятим при виробництві, перетворенні, розподілі та споживання електричної енергії, але існує багато областей техніки, в яких використання джерел струму  $I = \text{const}$  дозволяє отримати кращий ефект і принципово нові можливості в порівнянні з джерелом напруги.

Сучасні джерела живлення мають право на існування, якщо вони відповідають не тільки вимогам споживачів, але й при цьому вплив напівпровідникових джерел на мережу живлення не повинен виводити показники якості електроенергії за межі допустимих значень.

Показники якості електроенергії як напруги так і струму, споживаного з мережі, встановлюються як вітчизняними (ГОСТ 13109-97, ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2004, ДСТУ ІЕС 61000-3-12:2009 [1-3]), так і міжнародними стандартами (Std IEC 61000-3-12, Std IEEE-519 [4-5]).

**Мета та задачі.** Мета – розробка та дослідження трифазних та однофазних напівпровідникових джерел струму електромагнітно сумісних з мережею живлення з можливістю регулювання вихідного параметра за величиною, формою та частотою.

Для поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

- розробка принципів побудови джерел живлення, які працюють у режимі джерела струму;
- розробка системи керування;
- розробка цифрових моделей джерел струму;
- проведення цифрового моделювання, для підтвердження працездатності розроблених джерел;
- проведення аналізу електромагнітних процесів в джерелах живлення в трифазному та однофазному виконанні;
- отримання аналітичних виразів для розрахунку основних параметрів джерел;
- проведення гармонійного аналізу;
- розробка програми розрахунку параметрів для всіх схемотехнічних рішень.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Зарубіжні стандарти, оцінюючи показники якості електроенергії (ПЯЕ), передбачають збереження параметрів як напруги, так і струму в межах норми. Вважається, що найбільші спотворення у форму струму вносять потужні промислові нелінійні навантаження, однак зараз доводиться зважати на вплив спотворення форми споживаного струму малопотужною технікою, що містить у своєму складі випрямлячі. При цьому ця техніка сама пред'являє жорсткі вимоги до якості електроенергії [6].

Найпростішим методом покращення якості електроенергії є фільтрації вищих гармонік за допомогою пасивних фільтрів, які складаються з конденсаторів та індуктивностей. Відомі недоліки цих фільтрів не дозволяють їм забезпечити високу якість електроенергії по цілому ряду ПЯЕ, вирішується практично одне завдання - компенсація однієї найбільш вираженої гармоніки [7].

Поява повністю керованих напівпровідникових приладів (IGBT, IGCT, GTO) дозволило розробити новий перспективний клас пристроїв, які дозволяють найбільш ефективно покращувати якість споживаної електроенергії – активні фільтри [8]. Робота активних фільтрів заснована на виробленні антигармонік у протифазі гармонікам, які генеруються нелінійним навантаженням, тобто. реалізується режим компенсації гармонік. У всіх випадках таке управління вимагає багатьох вимірювальних, перетворювальних та обчислювальних процедур, що ускладнює алгоритм та схемотехніку систем управління [9,10]. Наявність додатково введеного фільтра призводить до ускладнення ще й силової частини перетворювача. Найбільш перспективним є використання активних випрямлячів у складі джерел живлення [11,12].

**Матеріал і результати досліджень.** Виробництво якісних напівпровідникових джерел живлення можливе лише на основі замкнених систем регулювання. При виборі відповідних структур і алгоритмів управління можливо досягти більш високих показників якості управління, зниження взаємного впливу системи мережа-споживач і забезпечити низьку чутливість до дії збурень [13].

Сучасні системи автоматичного регулювання (САР) працюють в умовах постійно діючих на них різноманітних збурень (коливання напруги мережі, зміни параметрів каналів управління об'єкта і т.д.), які істотно погіршують якість роботи САР. Зменшити ступінь впливу останніх, вдається шляхом надання САР тим чи іншим способом властивостей інваріантності.

Для зменшення чутливості САР до дії збурень запропоновано релейний принцип управління, який дозволяє забезпечити практично миттєву реакцію на відхилення від завдання, то запропоновано покращувати якість електроенергії не шляхом компенсації гармонік, а примусовим, з максимально можливою точністю, наближенням дійсного струму до величини та форми струму завдання. Точність відтворення (відстеження) сигналу завдання визначатиметься шириною петлі гістерезису релейних регуляторів.

В таблиці 1 зведені силові схеми розроблених джерел живлення реалізуючих режим джерела струму. Всі схеми складаються з двох частин активного випрямляча та DC-DC перетворювача [13-18]. Схема DC-DC перетворювача однакова для всіх, відрізняється схемотехніка активних випрямлячів.

Сфера використання таких джерел живлення різноманітна, вони можуть використовуватися для живлення електродвигунів постійного струму, в системах живлення вітряків, в електричних системах літаків [17-19].

Між активним випрямлячем та DC-DC перетворювачем знаходиться ланка постійного струму з напругою  $U_c$ . У схемах 1 та 5 знаходиться один конденсатор у ланці постійного струму, в схема 2,4 два конденсатора, середня точка яких приєднана до нейтралі мережі. В схемах 3 та 6 середня точка конденсаторів під'єднана до фази мережі.

Система керування забезпечує формування споживаних з мережі струмів синусоїдальної форми та стабілізацію струму навантаження у всьому діапазоні його регулювання. Вона складається з релейних регуляторів струму та системи розподілення імпульсів на транзистори.

Модель системи керування для схеми 1 та 2 представлена рисунку 1. Для схем 3 та 4 у системі керування відсутній канал «fasa C». Для однофазної 5 та 6 є тільки канал «fasa A».

Формування величини амплітуди струму мережі здійснюється наступним чином: на вхід  $\Delta U_c$  приходить сигнал різниці напруги на конденсаторах між реальним значенням та завданням і цей сигнал надходить на вхід Transfer Fcn1 для згладжування пульсацій, після цього сигнал додається до величини струму завдання навантаження 7. Сформований сигнал надходить на входи множників кожної фази.

Робота каналу "fasa A" описується наступним чином – на вхід 2 надходить сигнал із датчика напруги, за допомогою блоку Gain цей сигнал масштабується для отримання одиничного синусоїди. Далі сигнал поступає на вхід фазової автопідстроювання частоти (ФАПЧ) блок «1 phase PLL». Після цього, сигнал множиться на величину завдання струму мережі. Сформований сигнал завдання струму мережі надходить на вихід 3 та на вхід блоку Relay1. На вхід 1 надходить сигнал з релейного елемента фази A. З допомогою логічних елементів AND і NOT формуються імпульси управління, що надходять на виходи 1 і 2, сигнали з яких поступають на пару транзисторів однієї стійки. Алгоритм роботи цієї пари транзисторів організований так, що один транзистор бере участь у формуванні позитивної напівхвилі струму (у цей час інший транзистор закритий), а інший негативною (перший транзистор закритий). При зміні полярності

може виникнути ситуація коли один транзистор не встиг закритися із-за інерційності, а інший вже відкрився. Запропоновано організацію безструмової паузи, завдяки якій у момент зміни полярності струму одночасна робота обох транзисторів виключена. Величина паузи залежить від ширини петлі гістерезису релейного елемента, індуктивності дроселів і величини сумарної напруги на конденсаторах.

Таблиця 1. Схемотехніка трифазних та однофазних джерел живлення

№	Схема	№	Схема
1		4	
2		5	
3		6	

Робота каналів "faza B", "faza C" здійснюється аналогічно роботи каналу "faza A".

З входу 7 вхід блоку Relay1 подається величина струму завдання, де визначається знак сигналу. На вхід 8 надходить сигнал релейного елемента. З допомогою логічних елементів AND і NOT формуються імпульси управління, з виходів 11, сигнали 10 надходять на транзистори DC-DC перетворювача.

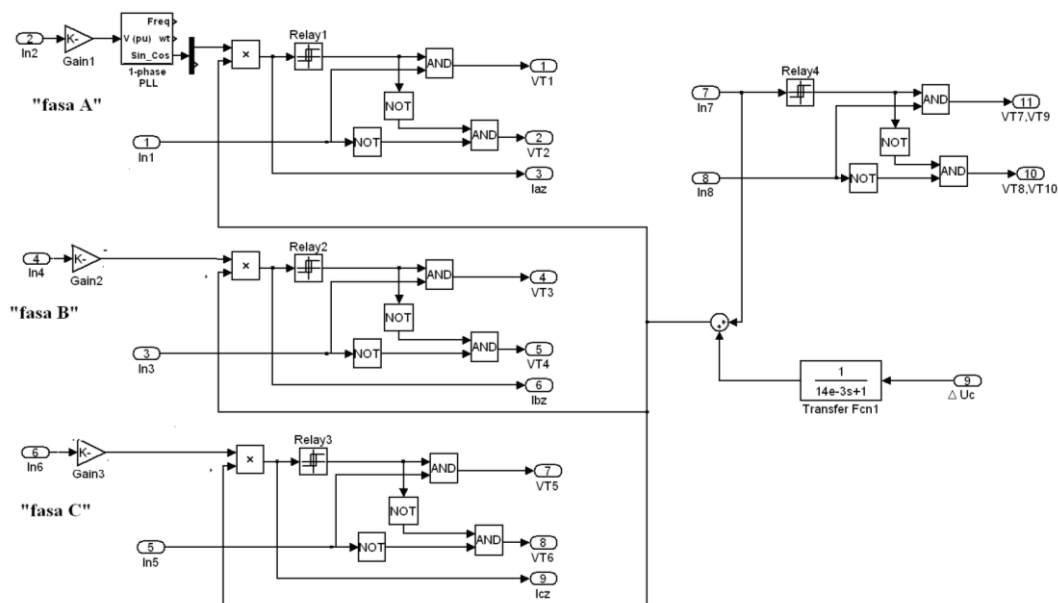


Рисунок 1 - Модель системи керування

Цифровим моделюванням отримані осцилограми роботи для схеми 2.

Моделювання проводилося за наступними значеннями параметрів: фазна напруга  $U_m = 310$  В, активний опір навантаження  $R_H = 10$  Ом, індуктивність навантаження  $L_H = 10$  мГн, індуктивність фазних дроселів  $L_A = L_B = L_C = 10$  мГн, активний опір фазних дроселів  $R_A = R_B = R_C = 0,1$  Ом, ємність конденсатора  $C1 = 2000$  мкФ,  $a = b = 0,2$  А,  $U_{C1} = U_{C2} = 350$  В.

На осцилограмах представлені криві напруги мережі  $u_A, u_B, u_C$ , криві струмів  $i_A, i_B, i_C$ , споживаних з мережі, струму навантаження  $I_H$ , робота релейних регуляторів у системі управління фази А  $u_{pe1}$  та навантаження  $u_{pe4}$  (рис.2). Під дією напруги на конденсаторі  $U_C$  показано стабілізацію струму навантаження та реакцію зміну величини опору навантаження. У час  $t=0.047$  с зменшився опір

навантаження, частота релейного режиму струму навантаження збільшилася (рис.2б) на фрагменті (рис 2а) ділянки 0,0455 – 0,049.

Аналогічні результати отримані і для інших трифазних схем.

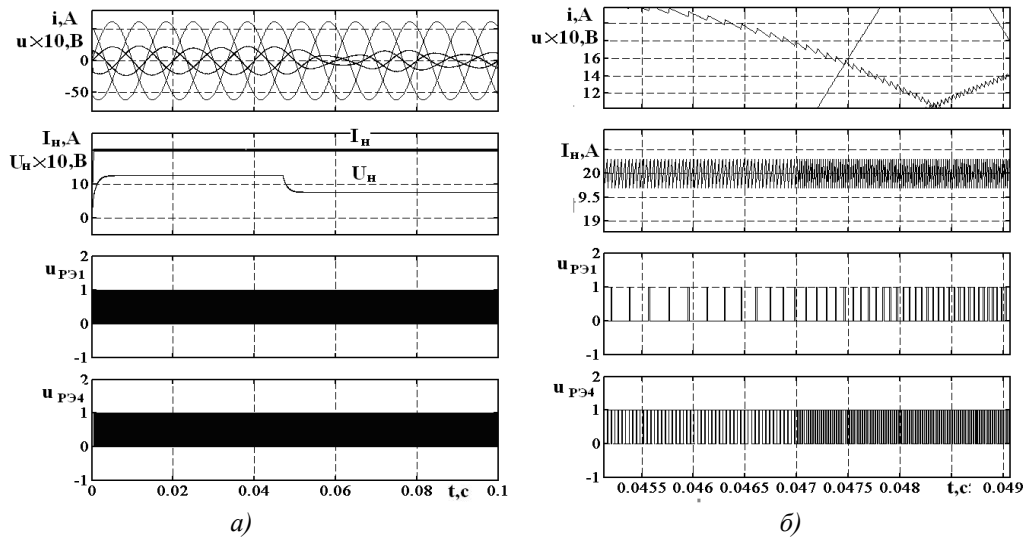


Рисунок 2 – Осцилограми процесів (а) і фрагмент (б)

При роботі потужних споживачів електричної енергії можливе спотворення кривої напруги в момент переходу її через нуль, що призведе до неправильної синхронізації системи керування з мережею живлення перетворювача (система не відчуває істинний момент переходу кривої напруги через нуль) (рис 3).

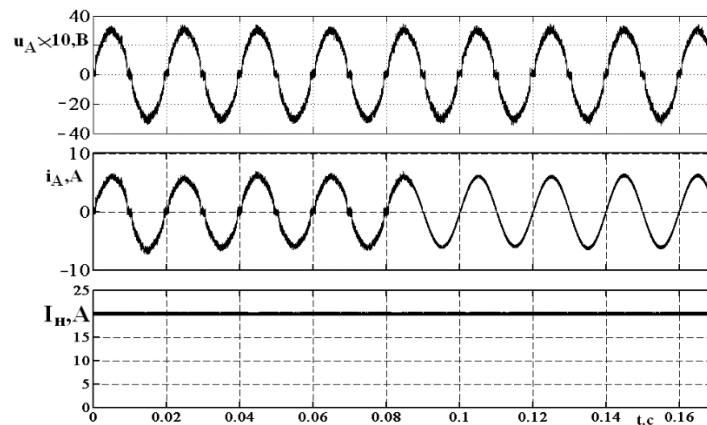


Рисунок 3 - Вплив роботи ФАПЧ

З урахуванням швидкодії джерела струму, крива струму повністю повторює спотворену криву напруги (THD=6,88%) (рис.4). Поліпшити якість кривої струму можливо за допомогою застосування пристрою фазового автопідстроювання частоти. У момент часу  $t = 0,087с$  ФАПЧ підключається до системи, що призводить до значного поліпшення кривої струму, THD зменшився в 13 разів і дорівнює 0,52%.

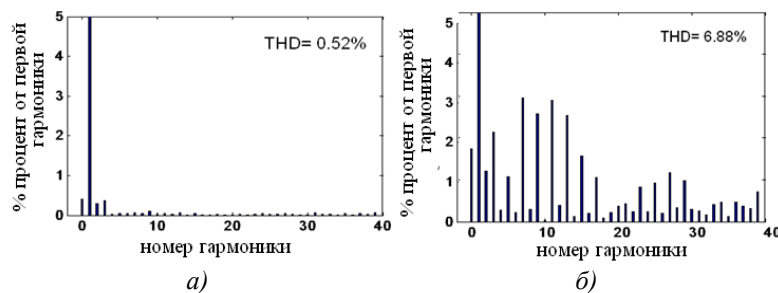


Рисунок 4 - Гармонійний склад струму з ФАПЧ (а) та без нього (б)

Рисунок 5а демонструє, на прикладі схеми 2, процес формування споживаних з мережі струмів і струму навантаження, а також реакція на зміну напруги мережі.

Аналіз осцилограми показує, що споживані з мережі струми мають синусоїдальну форму за відсутності фазового зсуву між напругами і струмами ( $\varphi=0$ ,  $\cos\varphi=1$ ). При зміні величини напруги живлення синусоїдність струмів і  $\varphi=0$  зберігаються, тобто. система не чутлива до дії такого обурення та електромагнітно сумісна з мережею. При дії збурень фазний струм змінює своє значення для встановлення балансу потужності.

Релейний принцип керування дозволяє реалізувати режими роботи при якому струм у навантаженні з високим ступенем точності повторює форму задаючих завдань. У якості прикладу представлено відпрацювання закону виду  $i_n = I_m \sin \omega t$

У якості навантаження можна використовувати ємнісне навантаження ( $C_n = 2000 \mu\text{кФ}$ ). Зростання напруги на конденсаторі є збуренням для джерела живлення. Осцилограми показують, що джерело струму нечутливе до дії збурень, струм заряду стабільний, споживаний з мережі струм синусоїдальний при  $\cos\varphi=1$ .

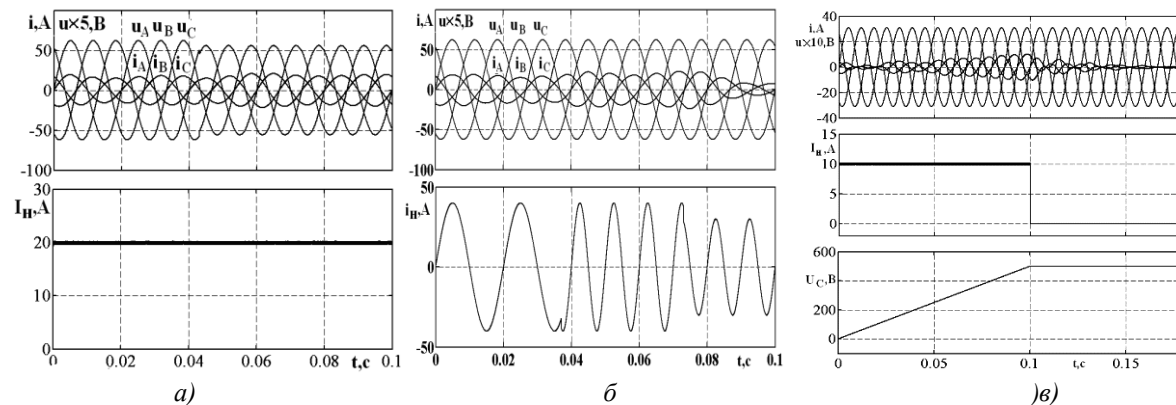


Рисунок 5 – Осцилограми роботи схеми 2:

а) реакція на зміну напруги, б) формування синусоїдного струму навантаження, в) заряд конденсатора навантаження

Аналогічні результати отримані і для інших трифазних схем.

Рисунок 6 демонструє роботу однофазної схеми 5. Показано наростання струму в навантаженні під дією повної напруги рівної напрузі на конденсаторі  $U_C=400 \text{ В}$ , стабілізація струму навантаження та реакція на зміни величини опору навантаження (рис.6 а) та напруги мережі живлення (рис.6 б). Синусоїдність струму зберігається при відсутності фазового зсуву в обох випадках, система не чутлива до цих збурень.

Також можливо формування змінного струму в навантаженні як і для трифазних перетворювачів, в такому випадку джерело струму працює як однофазний перетворювач частоти.

Аналогічні результати отримані і для схеми 6.

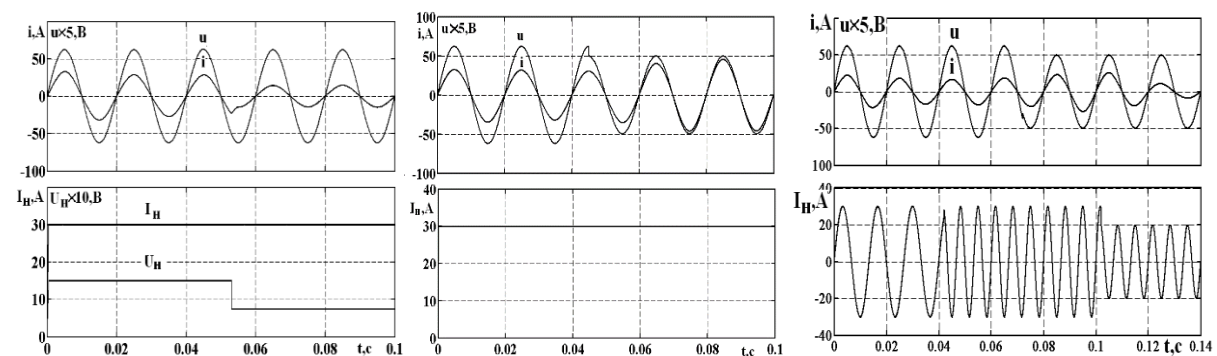


Рисунок 6 – Осцилограми роботи схеми 5:

а) реакція на зміну напруги, б) реакція на змінення опору навантаження, в) формування синусоїдного струму навантаження,

При формуванні струму навантаження, при відсутності збурень діючих на систему, при заданому значенні струму постійна і залежить від параметрів навантаження та схеми. А у контурі формування синусоїдального струму, з змінення величини струму буде змінюватися частота релейного режиму.

Дослідження електромагнітних процесів в джерелах живлення дозволили отримати вирази для частоти релейного режиму та умови працездатності джерел [13,16,17].



В таблицю 2 зведені вирази для визначення максимальних та мінімальних значень частот які залежать від параметрів схеми та ширини петлі гістерезису  $a$ , значення напруги в ланці постійного струму  $U_d$

Умовою працездатності джерел є підтримання релейного режиму, він зупиниться якщо напруга на конденсаторі буде дорівнювати або стане менше мінімальної напруги. Це підтверджується виразами визначення мінімальної частоти. Перед початком роботи треба зарядити конденсатори до напруги вищою за мінімальну.

Аналіз показує що, найбільше значення мінімальної напруги ланки постійного струму буде в схемі 3, найменше значення серед трифазних схем у 1 схемі, а у однофазній у 5. Відповідно до цього частоти релейного режиму будуть істотно відрізнятись.

Таблиця 2. Параметри джерел струму

	Напруга на конденсаторах	Напруга звена постійного струму	Частота релейного режиму	
			Мінімальна частота, Гц	Максимальна частота, Гц
1	$U_C > \sqrt{3}U_m$	$U_d = U_C$	$f_{\min} = \frac{U_C}{12aL_A} - \frac{9(U_m - I_m R_A)^2}{16aU_C L_A}$	$f_{\max} = \frac{U_C}{6aL_A} - \frac{9(U_m - I_m R_A)^2}{32aU_C L_A}$
2	$U_{C1} > U_m$	$U_d = U_{C1} + U_{C2}$	$f_{\min} = \frac{U_{C1}^2 - (U_m - I_m R_A)^2}{2aL_A U_C}$	$f_{\max} = \frac{U_{C1}^2}{2aL_A U_C}$
3	$U_{C1} > \sqrt{3}U_m$	$U_d = U_{C1} + U_{C2}$	$f_{\min} = \frac{U_{C1}^2 - 3U_m^2}{2aL_A U_C}$	$f_{\max} = \frac{U_{C1}}{4aL_A}$
4	$U_{C1} > U_m$	$U_d = U_{C1} + U_{C2}$	$f_{\min} = \frac{U_{C1}^2 - (U_m - I_m R_A)^2}{2aL_A U_C}$	$f_{\max} = \frac{U_{C1}^2}{2aL_A U_C}$
5	$U_C > U_m$	$U_d = U_C$	$f_{\min} = \frac{U_C^2 - (U_m - I_m R_{\partial p})^2}{4aU_C L_{\partial p}}$	$f_{\max} = \frac{U_C}{4aL_{\partial p}}$
6	$U_{C1} > U_m$	$U_d = U_{C1} + U_{C2}$	$f_{\min} = \frac{U_{C1}^2 - (U_m - I_m R_{\partial p})^2}{4aU_C L_{\partial p}}$	$f_{\max} = \frac{U_{C1}}{4aL_{\partial p}}$

Для розрахунку основних параметрів джерел живлення був розроблений алгоритм та програма розрахунку параметрів для вибору силових елементів схеми.

У програмі необхідно задати напругу на конденсаторах, пульсації напруги на конденсаторах, амплітудне значення напруги мережі, струм навантаження, опір навантаження, потужність навантаження, індуктивність вхідних дроселів, ширину петлі гістерезису релейного елемента в контурі формування споживаних з мережі.

Перед початком розрахунку вибираємо відповідну схему. Якщо розрахунок ведеться за заданою потужністю навантаження, відзначити «розрахунок за заданою потужністю» (тоді не потрібно вказувати опір навантаження, у графі опір ставимо «0»). Зазначаємо, якщо необхідно розрахувати вхідну індуктивність, або максимальну частоту, треба в рядку параметр якого ми шукаємо задаємо «0». Натискаємо кнопку "Розрахунок". У відповідних вікнах з'являються значення: ємності конденсаторів, амплітудного значення струму мережі, максимальної частоти релейного режиму вхідного струму або індуктивності вхідних дроселів.

Рівень гармонік струму оцінено коефіцієнтом THD, отримані графіки залежностей від струму навантаження для всіх схем (рис 8)

Для схем 2-3 THD практично у всьому діапазоні змінення струму навантаження THD близько 1%, Для схем 4-6 THD у всьому діапазоні становить 2,5-2%, що спричинено наявністю пульсацій напруги на конденсаторах, зменшити величину яких можна налаштуванням фільтра на виході датчика напруги конденсатора. Для схеми 1 THD найбільший, це спричинено тим що в системах без нульового проводу відбувається взаємодія між фазами.



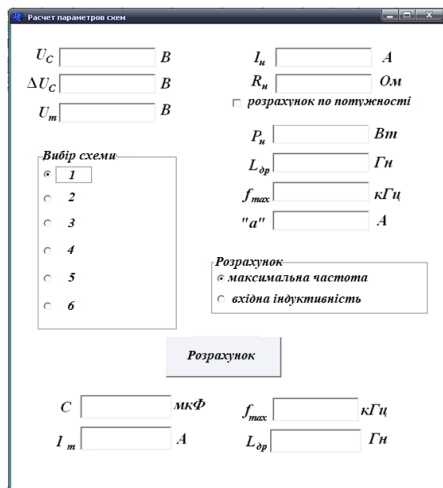
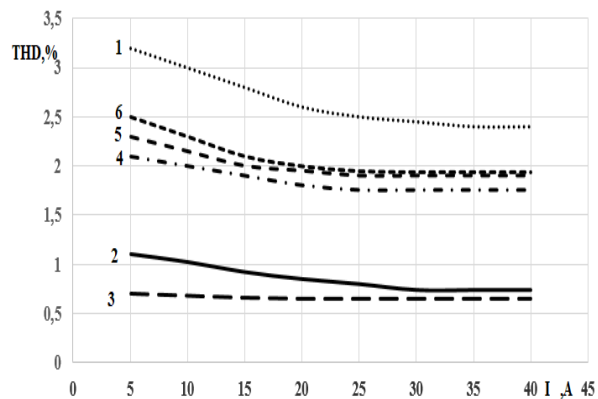


Рисунок 7 – Вікно програми

Рисунок 8– Залежності  $THD=f(I_n)$ 

**Висновки.** Розроблено та досліджено трифазні та однофазні напівпровідникові джерела живлення з релейним керуванням працюючих в режимі джерела струму. Представлено 6 схемотехнічних рішень джерел. Релейний принцип керування дозволив реалізувати граничну швидкість у відпрацюванні завдання та реакції на збурення, при цьому струм у навантаженні з високим ступенем точності повторює форму сигналу завдання.

Моделюванням підтверджено, що розроблені системи мають розширені функціональні можливості, реалізуючи наступні режими роботи:

- перетворення трифазної змінної напруги постійної частоти і амплітуди в постійний струм з можливістю регулювання його величини і стабілізації на заданому рівні;
- перетворення трифазної змінної напруги незмінної частоти і амплітуди в однофазний струм різної форми і регульованої частоти;

За результатами дослідження електромагнітних процесів у розглянутих системах отримано аналітичні вирази для розрахунку частот релейного режиму, умов працездатності джерел.

Розроблено програму для розрахунку основних параметрів джерел живлення для вибору силових елементів схем.

#### Список використаної літератури

- 1) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97: – [Действительный 21.11.1997]. – Минск, 1997. – 35с.
- 2) Електромагнітна сумісність. Частина 3-12. Норми. Норми на гармоніки струму, створені обладнанням із номінальним входним струмом силою понад 16 А та до 75 А включно на фазу, підключеним до низьковольтних електропостачальних систем загальної призначеності (IEC 61000-3-12:2004, IDT): ДСТУ IEC 61000-3-12:2009 : – [Действительный 01.04.2012]. – Киев, 2012. – 38с.
- 3) Електромагнітна сумісність. Частина 3-2. Норми. Норми на гармоніки струму, створені обладнанням із номінальним входним струмом силою до 16 А включно на фазу, підключеним до низьковольтних електропостачальних систем загальної призначеності (IEC 61000-3-2:2004, IDT): ДСТУ IEC 61000-3-2:2004 : – [Действительный 01.01.2007]. – Киев, 2007. – 24с.
- 4) CEI, 61000-1-1 : Electromagnetic compability (EMC), Part 1 : General, section 1 : application and interpretation of fundemantal definitions and terms, 2001.
- 5) IEEE-519. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems,.- W.: JSC, 2014.- 65 p.
- 6) Куско А. Качество энергии в электрических сетях / А. Куско, М. Томпсон: пер. с англ. Рободзея А.Н. М.: Додэка-XXI, 2008. - 336 с
- 7) Akagi H. Modern Active Filters and Traditional Passive Filters. / H. Akagi // Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences, 2006. – Vol. 54, No.3. – P. 255-269.
- 8) Akagi H. Active Filters and Energy Storage Systems for Power Conditioning in Japan / Akagi H. // Power Electronics Systems and Applications, 2004 Hong Kong, China, 2004 – p.80-88.
- 9) Kalarathi, M. & N., Rathina. (2020). Multilevel Parallel Active Power Filter Based on ANFIS Controller for Harmonic Alleviation. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering. 45. 10.1007/s40998-020-00384-8.

- 10) K. Kalyan, M. S. Rao and S. Gawre, "Improvement of Power Quality Using Series Active Power Filter(SAPF)," 2020 IEEE International Students' Conference on Electrical,Electronics and Computer Science (SCEECS), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/SCEECS48394.2020.151.
- 11) Kolar J. W. The essence of three-phase PFC rectifier systems–Part 1 / J. W. Kolar, T. Friedli // IEEE Trans. Power Electron.,2013. – vol. 28 – P. 176–198.
- 12) Gonçalves JT, Valtchev S, Melicio R, Gonçalves A, Blaabjerg F. Hybrid Three-Phase Rectifiers with Active Power Factor Correction: A Systematic Review. Electronics. 2021; 10(13):1520. <https://doi.org/10.3390/electronics10131520>
- 13) Высокоэффективные источники электропитания: Монография / Ю. П. Самчелев, В. Г. Дрючин, Г. С. Белоха, Н. И. Андреева. – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – 219 с.
- 14) Пат. 63609, МПК H02M 7/12. Регульоване джерело живлення / Белоха Г.С. Дрючин В.Г., Самчелев Ю.П., Шевченко И.С.; заявник та патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №U201103998; заявл. 04.04.2011; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.
- 15) Пат. 87224, МПК H02M 7/00. Регульоване джерело живлення / Белоха Г.С. Дрючин В.Г., Самчелев Ю.П., Шевченко И.С.; заявник та патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №U201310643; заявл. 03.09.2013; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 24.
- 16) Бекбаев А.Б. Система стабилизации тока, электромагнитно совместимая с сетью. / А.Б. Бекбаев, Ю.П. Самчелев, В.Г. Дрючин, Г.С. Белоха, Е.А. Серсанбаев // Вестник КазНТУ, Алматы. – 2014. - №1(101). – с. 93-100.
- 17) Самчелев Ю.П. Универсальный высокоэффективный источник питания для электроприводов постоянного и переменного тока. / Ю.П. Самчелев, В.Г. Дрючин, Г.С. Белоха // Вісник національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХП», 2013. - №36(1009). – С.317-321.
- 18) H. Bielokha and I. Shevchenko, "Active Rectifiers in the Electrical System of Aircraft," 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598724.
- 19) Г. Белоха, «Перетворювач частоти в системі генерування енергії вітроенергетичних установок», VisnikSNU/, вип. 7 (263), с. 35-39, Груд 2020.

**Н. Bielokha, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4277-367X  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

## **ELECTROMAGNETIC COMPATIBLE CURRENT SOURCES WITH RELAY CONTROL**

*The development of industry leads to an increase in nonlinear loads, which are generators of higher harmonics in the network. The quality indicators of voltage and current consumed from the network are established by international standards for the quality of electricity. The simplest method of filtering harmonics is passive filters, lack of low quality harmonic compensation. The use of active filters improves the quality of the current. But active filters have a complex control system. The use of active rectifiers as part of semiconductor power supplies solves the problem of generating higher harmonics in the network and provides a power factor equal to 1.*

*Six variants of three-phase and single-phase power supplies have been developed. They operate as a current source. All circuits consist of two parts: an active rectifier and a DC-DC converter. The scope of use of such sources is different: a direct current electric drive, an electric power system of wind turbines, an electric system of aircraft. The control system of the relay converters provides the formation of current and the maximum speed in the processing of disturbances.*

*Oscillograms of the current sources are obtained by digital modeling. They confirm the efficiency of the proposed sources, the electromagnetic compatibility of the power sources with the mains and the value of the power factor close to unity. Current sources are invariant to the action of disturbances: changes in load resistance, mains voltage. The study of electromagnetic processes made it possible to obtain analytical expressions for the maximum and minimum frequency of the relay mode, the capacitance of the capacitors and the operating conditions of the sources.*

*The developed program allows you to get the parameters for choosing the power elements of the circuit: inductance, capacitance, switching frequency of transistors.*

*The quality of the consumed current is analyzed by calculating the total harmonic distortion (THD). For all considered sources, the THD value is less than 5%, which meets the quality standards for the consumed current.*

**Keywords:** current source, electromagnetic compatibility, relay control, active rectifier

**References**

- 1) Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Quality standards for electric train energy in general-purpose power supply systems: GOST 13109-97: - [Valid 11/21/1997]. - Minsk, 1997. -- 35p.
- 2) Electromagnetic compatibility. Part 3-12. Norms. Current harmonics standards established by equipment with a rated input current of more than 16 A and up to and including 75 A per phase connected to low-voltage general-purpose power supply systems (IEC 61000-3-12: 2004, IDT): DSTU IEC 61000-3 -12: 2009: - [Valid 01.04.2012]. - Kiev, 2012. - 38c.
- 3) Electromagnetic compatibility. Part 3-2. Norms. Current harmonic standards established by equipment with a rated input current of up to 16 A inclusive per phase connected to low-voltage general-purpose power supply systems (IEC 61000-3-2: 2004, IDT): DSTU IEC 61000-3-2: 2004: - [Valid 01.01.2007]. - Kiev, 2007. - 24p.
- 4) CEI, 61000-1-1 : Electromagnetic compatibility (EMC), Part 1 : General, section 1 : application and interpretation of fundamental definitions and terms, 2001.
- 5) IEEE-519. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, - W.: JSC, 2014.- 65 p.
- 6) Cusco A. Quality of energy in electrical networks / A. Cusco, M. Thompson: trans. with English Robodeya AN M.: Dodeka-XXI, 2008. - 336 p
- 7) Akagi H. Modern Active Filters and Traditional Passive Filters. / H. Akagi // Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences, 2006. – Vol. 54, No.3. – P. 255-269.
- 8) Akagi H. Active Filters and Energy Storage Systems for Power Conditioning in Japan / Akagi H. // Power Electronics Systems and Applications, 2004 Hong Kong, China, 2004 – p.80-88.
- 9) Kalarathi, M. & N., Rathina. (2020). Multilevel Parallel Active Power Filter Based on ANFIS Controller for Harmonic Alleviation. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering. 45. 10.1007/s40998-020-00384-8.
- 10) K. Kalyan, M. S. Rao and S. Gawre, "Improvement of Power Quality Using Series Active Power Filter (SAPF)," 2020 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/SCEECS48394.2020.151.
- 11) Kolar J. W. The essence of three-phase PFC rectifier systems—Part 1 / J. W. Kolar, T. Friedli // IEEE Trans. Power Electron., 2013. – vol. 28 – P. 176–198.
- 12) Gonçalves JT, Valtchev S, Melicio R, Gonçalves A, Blaabjerg F. Hybrid Three-Phase Rectifiers with Active Power Factor Correction: A Systematic Review. Electronics. 2021; 10(13):1520. <https://doi.org/10.3390/electronics10131520>
- 13) Highly efficient power supplies: Monograph / Yu. P. Samcheleev, V. G. Dryuchin, G. S. Belokha, N. I. Andreeva. - Alchevsk: DonSTU, 2013. -- 219 p.
- 14) Pat. 63609, IPC H02M 7/12. Adjustable power supply / Belokha GS Dryuchin VG, Samcheleev YP, Shevchenko IS; applicant and patent owner Donbass State Technical University. - 201U201103998; stated 04.04.2011; publ. 10/10/2011, Bull. № 19.
- 15) Pat. 87224, IPC H02M 7/00. Adjustable power supply / Belokha GS Dryuchin VG, Samcheleev YP, Shevchenko IS; applicant and patent owner Donbass State Technical University. - №U201310643; stated 03.09.2013; publ. 27.01.2014, Bull. № 24.
- 16) Bekbaev A.B. Current stabilization system, electromagnetically compatible with the network. / A.B. Bekbaev, Yu.P. Samcheleev, V.G. Dryuchin, G.S. Belokha, E.A. Sersanbaev // Bulletin of KazNTU, Almaty. - 2014. - No. 1 (101). - With. 93-100.
- 17) Yu.P. Samcheleev Universal high efficiency power supply for AC and DC drives. / Yu.P. Samcheleev, V.G. Dryuchin, G.S. Belokha // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of Science Works. Series: Problems of an automated electric drive. Theory and practice. - Kh.: NTU "KhPI", 2013. - No. 36 (1009). - S.317-321.
- 18) H. Bielokha and I. Shevchenko, "Active Rectifiers in the Electrical System of Aircraft," 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598724.
- 19) G. Belokha, "Frequency converter in the energy generation system of wind turbines", VisnikSNU /, vol. 7 (263), p. 35-39, Dec 2020.

Надійшла 20.12.2021

Received 20.12.2021

## **AUTOMATED SYSTEM FOR PROVIDING POWERFUL COMPUTING SYSTEMS WITH A COMPLEX OF EQUIPMENT**

*With the development of the cryptocurrency market, the need for automated support for mining hardware is growing. At present, there are practically no flexible systems for selecting equipment to fully meet the complex needs of providing complex features of mining processes, and software has not been developed that could take into account all the features of cryptocurrency developers. The purpose of this work is to develop the principles and algorithm for solving the problem of organizing the provision and selection of the necessary equipment for complex and powerful computing systems in the form of an automated system for the procurement and supply of the main computing and additional related equipment, organizing its installation, monitoring the conditions and characteristics of operation and subsequent output out of operation after the resource has been depleted or in order to increase the computational characteristics of mining farms and their cooling systems. Modern powerful computing systems are a huge amount of interconnected diverse equipment, located at different sites and interacting with each other by high-speed neural connections. The success of creating such complexes depends on the level of training of a team of specialists, which must have comprehensive and deep knowledge on the issues of building the engineering infrastructure of a computing complex, reasonable equipment with the necessary equipment, calculating the maximum energy load and providing such objects with a cooling system for computing elements and the system as a whole. Computing power is realized with the help of Data-centers, mining farms with more than 5000 computing modules. The problem of ensuring the quality of power supply of mining farms, a high level of efficiency in the use of power sources, protecting expensive equipment from overheating while ensuring high computing performance is very relevant, it requires constant attention and the use of special equipment and technologies. The developed system described in this paper relates to the management and optimization of resources of large computing centers, namely, to the organization of mass purchases of equipment, its installation and effective maintenance during operation, ensuring the efficient operation of cooling systems and the decommissioning of mining farms after completion. their work. This system allows users to create their own equipment catalogs in the form of models and then effectively organize the planning and management of devices in the form of an abstract model that consolidates all devices. Such a model is easy to control, find and perform actions on related objects, scale and make changes as needed. On the practical side, this developed product is simple in terms of the graphical interface and does not require much time for staff training and use in practice.*

**Keywords:** computer systems, mining processes, efficiency, cooling, automated equipment selection system

**Introduction.** Modern powerful computing systems (CS) are a huge number of diverse resources that are located on different sites and interact with each other. They are created by a team of specialists who have comprehensive and in-depth knowledge and experience in the construction of engineering infrastructure, as well as equipping facilities with information devices and technologies. Computing capacities of large computing centers are realized with the help of Data-centers, mining farms with the number of computing modules in the range of 300-5000 units. The mining farm is equipped with technical equipment that facilitates the extraction of cryptocurrency. It includes a large number of computers that perform a complex computational task - the development of cryptocurrency. The cost of mining is determined by the cost of equipment and electricity consumption for operations. A factor hindering the development of industrial mining is the significant specific energy consumption of computing modules with the simultaneous release of significant amounts of thermal energy. The problem of ensuring the quality of power supply of mining farms in terms of efficiency of electricity consumption, protection against overheating of expensive electronic equipment, as well as the need for energy savings in creating a set of farm connections for industrial mining is very important. To solve it, you need to use special equipment and special compact and energy-efficient heat dissipation technologies.

It is known that the quality and reliability of mining farm equipment, especially power sources, are affected by transients in the power supply network, which sometimes have short-term exceedances (usually within a few milliseconds) of currents and voltages that differ from nominal (passport) values and can be due to external and (or) internal reasons during the work of the CS. As a result of transients, voltage changes can reach from a few volts to tens of kilovolts, and current jumps - tens of kiloamperes [1].

Heating and energy consumption of mining farms largely depend on the presence of higher harmonic components in the curves of currents and voltages in the power supply networks.

Appropriate filters must be used to reduce them. In addition, there may be short-term power outages, defined as the complete absence of mains voltage or current due to loads lasting up to 1 ... 2s, which may be due primarily to the operation of the safety equipment of the mains. Such short breaks in work can lead to failures in the work of the CS and even to the failure of costly equipment.

The efficiency and operability of mining farms directly depend on the quality of electricity they receive. Another important aspect of the productivity of mining farms is the efficiency of heat dissipation from fuel elements into the environment. Currently, there are various ways to implement this process.

**1.The purpose and objectives of the study.** The analysis showed that in the construction of farms consisting of 100-300 computing modules (CM), preference is given to air cooling with the principle of cold and hot corridors.

If this amount of CM is exceeded, it is advisable to use liquid cooling of farms (liquid immersion cooling) with the predominant use of equipment with such capabilities.

Immersion cooling systems are considered to be the most efficient for megafarms [2]. There are two types of immersion systems (two-phase and single-phase): with modules immersed in a liquid with low temperatures and "boiling" systems using liquids with low (30... 50 K) boiling points. After heating, the liquid evaporates, taking with it excess heat, then due to heat dissipation condenses and flows back into the tank. Such cooling technologies are very efficient, can significantly reduce operating costs by 70... 95%. It is important that this technology allows you to create energy-intensive heat dissipation systems and create new directions and approaches to the configuration and capacity of cooling systems based on prefabricated immersion cooling systems.

The most efficient cooling system for computing components in CS is a closed system, in which both computing and cooling components are concentrated [3]. Such closed cooling systems [3] with immersion of computing components in a cooled low-boiling liquid (more than 100 computing boards with a size of 300x400 mm can be placed in one Data block (Fig.1,a) are easily assembled into powerful mobile Data Centers (Fig.1,b). Data Centers can be mounted in easily transportable containers, capable of providing high cooling efficiency with ambient air in the temperature range of +40°C ... -40°C with the achievement of PUE (Power Utilization Efficiency) [4] at the level of 1.015...1.02.

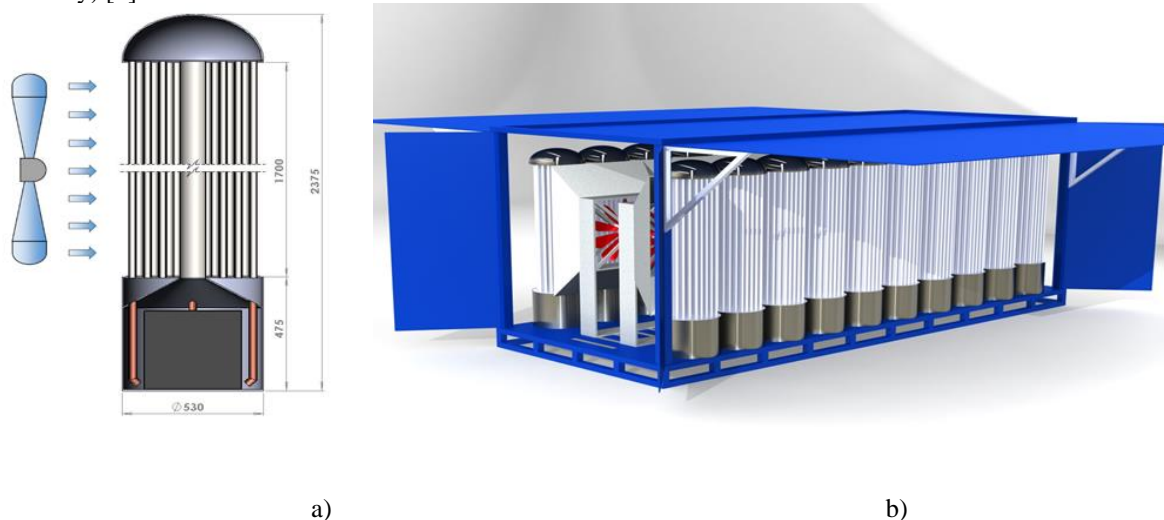


Figure 1 - General view of the computing Data-block (a) and the layout of 20 Data-blocks into a powerful computing Data-Centre (b)

Based on modeling studies, it has been shown that CSs in the form of Data Centers can be flexible in installation and not tied to a specific socket, case or type of computing components, can be installed in hard-to-reach places and provide efficient heat removal from heated components [5-8].

At the moment, there is no flexible software that can fully satisfy the complex requirements of mining processes while ensuring the optimal selection of equipment according to computing characteristics and the required thermal power of its cooling system. Therefore, the development of such systems seems expedient for realizing the possibility of implementing innovative solutions within the framework of this subject area.

Therefore, the relevance of this work is that with the development of the cryptocurrency market, the need for automated hardware support for mining processes is growing. This is necessary in order to be able to easily run mining software on tens, hundreds and thousands of farms, which in turn reduces the time to set up infrastructure and speeds up the profits from the sale of developed cryptocurrencies.

The purpose of this work is the task of organizing and using resources, creating an automated system that will serve for the organization of mass procurement of equipment, installation, further maintenance and

decommissioning of mining farms and cooling systems. This system can be used for public or private network, as well as for an exclusive blockchain or blockchain consortium.

Tasks to be solved:

- develop and propose new effective methods of orchestration of processes;
- design and implement a server application for planning and management of computing nodes of blockchain networks, which is able to work with a large amount of data and has the ability to further expand and implement;
- to design a client system for planning and use of blockchain networks by computer nodes;
- develop architecture, encode business logic, design and encode the interface with the server part of the CS.

**Strategy, algorithm and research results.** The system is proposed to be implemented according to the "Client-server" architecture using Java, server-side ecosystem, and JavaScript language using the React.js library on the client side. The system being designed requires ACID principles. This requirement can be met by using the PostgreSQL relational database, Java programming language, Spring Framework for creating web applications and working with the database. The choice of these technologies is justified by the need to ensure the speed of development of the system and the architecture of its applications, the constant development of the above technologies.

The system provides for the organization of processes of accounting for computing resources, resource configuration management, maintenance management and procurement of equipment. To select the necessary hardware, a detailed catalog is available, which allows for effective rapid urgent planning. This concept of the catalog, or in other words, the dictionary of devices, allows a group of users who are knowledgeable in their field, to effectively manage the accounting of devices in the system: mining farms, cooling systems for mining farms, exhaust systems, air conditioners, fans [9]. The processes are described in the form of orders. Operations that can be performed on orders include creating, editing, changing the status of a user with certain rights and access. Each status is compared to a certain phase of the life cycle. Lifecycle techniques allow you to run specific code with actions at different stages of the component lifecycle. For example: `componentDidMount` is executed after the initial check of components. This method is often used to retrieve data from a remote source via the API. The `componentDidMount` lifecycle method is shown in Fig.2.

The user can perform certain actions according to the order status and his rights in the system to change the order status. An order is an aggregate structure that is created from a catalog of devices and with the ability to perform further actions on it.

The system was developed using the Client-Server architectural approach based on the Java implementation for the server part and the corresponding ecosystem on the server side, Typescript (JavaScript) using the React.js library and functional approaches on the client side. The choice of technologies is justified according to the possibilities of modular development, the availability of all necessary libraries and modules. The constant development of the above technologies allows you to quickly find all the necessary solutions.

It should be noted that existing systems that can solve the problem of optimized use of resources for blockchain networks exist in the form of proprietary systems (such systems are usually created for specific subject areas and sold at a high price). ERP is an information system that allows you to store and process most of the critical data for the company's work, to record and maintain all necessary resources. As a close alternative to ERP systems, it is possible to cite BPM solutions that allow you to model processes instead of connecting them to real entities. Examples of BPM solutions are: ELMA BPM Suite and Bizagi BPM Suite, which are currently popular and in demand.

```
const refetchOrders = () => {
  setError(null);

  return fetchOnPremiseDevices({
    deviceType: DeviceRequestMap[activeDevice],
    devicePurpose: activePurpose,
    sortBy: 'amount',
  })
    .then(setDevices)
    .catch(setError);
};

useEffect(() => {
  refetchOrders();
}, [activePurpose, activeDevice]);
```

Figure 2 - Example of life cycle use

In addition, these solutions are largely functionally similar. This situation requires independent research, modeling of processes and further implementation in an automated system. ERP systems can be characterized by certain common features. Only a technician or developer can make changes to the platform code, and this system is closed to users and they do not have access to the code. The data that users are working on is stored in a database



or other remote storage. Components are connected to the platform as needed. They all work with a single database and use basic functionality (if necessary). In another module, the components work independently of each other and can be connected and turned off without problems if the need for them has disappeared.

The disadvantages of ERP systems are, first of all, the difficulty of building the right architecture to ensure the lack of connectivity of modules. In practice, this leads to a large number of abstractions, which greatly increases the time to add new functionality and refactoring existing ones. More qualified specialists are needed to maintain such a code base.

The advantage of ERP-systems is the ability to scale, connect additional modules if necessary, to implement the approach of creating a system in the form of "designer".

**3.Description of the automated system database.** For the data warehouse, it is proposed to use a relational database PostgreSQL, which contains 17 normalized tables. Tables store information about users and their roles; equipment in the form of dictionaries and entities that link equipment data to each other. The physical model of the database is presented in a condensed form in Fig.3.

**4.Description of system architecture.** The server system is presented in the form of a monolithic server with a three-layer architecture. Each layer is divided into Java packages, which include the classes responsible for accessing packages at the client level, business logic, and database, respectively. The project was divided into packages so as to ensure maximum structuring of classes. In the project, a package called "controller" includes classes that process incoming HTTP requests and pass them for further management to classes that are contained in a package called "service" and in which business logic is already directly implemented.

Repository classes that work with a Java-level database are injected into service classes. In addition, the existing configuration package includes classes that are adapters, factories, and configuration classes and essentially run at server startup. They "conPicture" dependency inversion container objects, "conPicture Swagger", and class that handles exceptions and generates a processed response to an HTTP request.

The security package includes classes responsible for setting up authentication and authorization, processing JWT tokens, configuring servlets and filters when executing HTTP requests.

The "consts" package aggregates all the constants used in the service.

The utils package also includes utility helper classes for pagination and processing of JWT tokens, object converters, and a test data loader on a test environment.

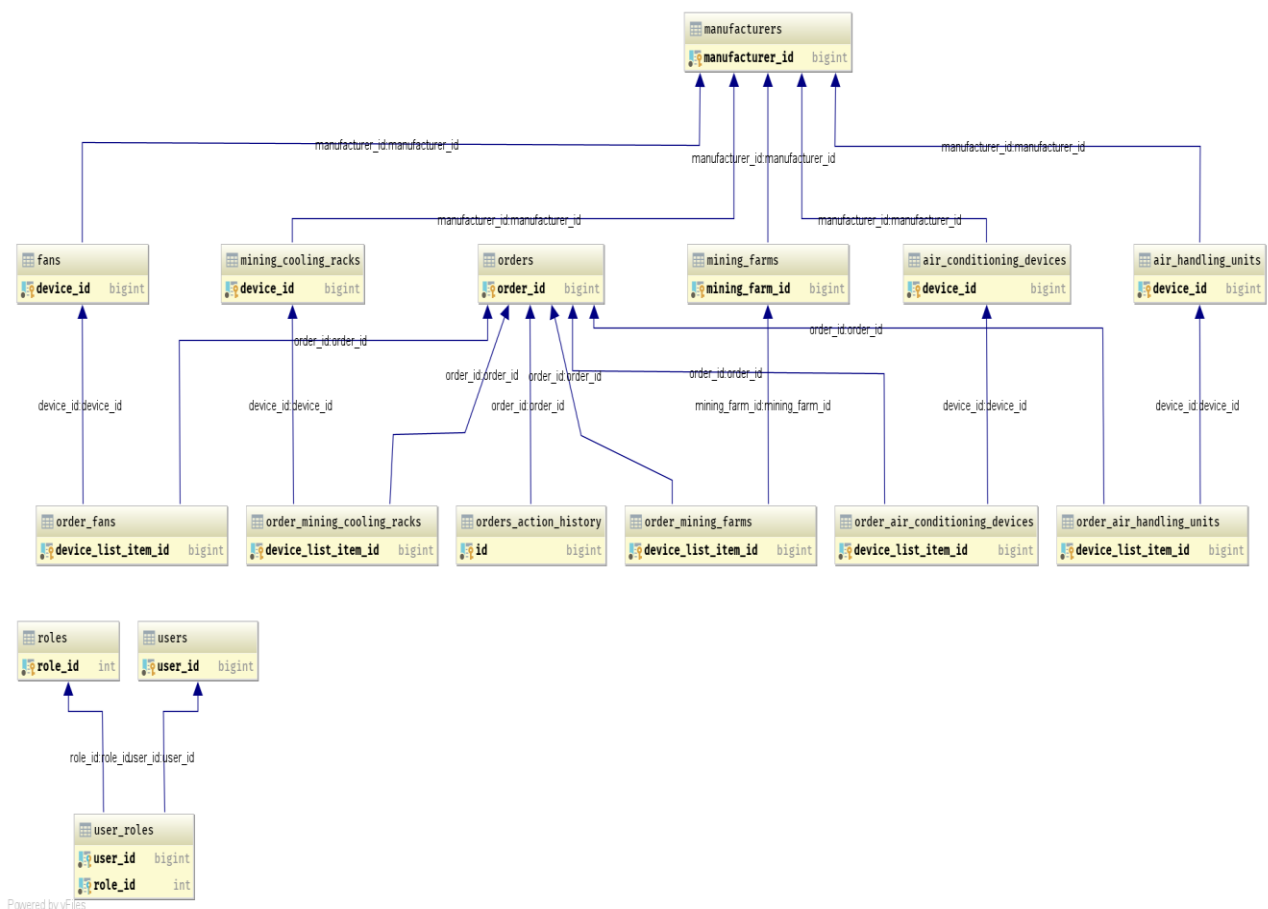


Figure 3 - Condensed physical database model

The model package includes classes that display database tables and allow you to operate on Hibernate information at the object level, not tables.

Model classes describe classes that display: dictionary tables, user-related tables, and order-related tables.

The "dto" package contains HTTP request and response templates.

The "target" folder contains an executable .jar archive that allows you to run the server locally. In addition, there is also a file to start the server as a Docker container and a Docker Compose file in conjunction with the PostgreSQL container.

The structure of the project (service) is shown in Fig.4.

Authentication and authorization in the system is implemented using JWT-tokens based on tables users, roles, user\_roles.

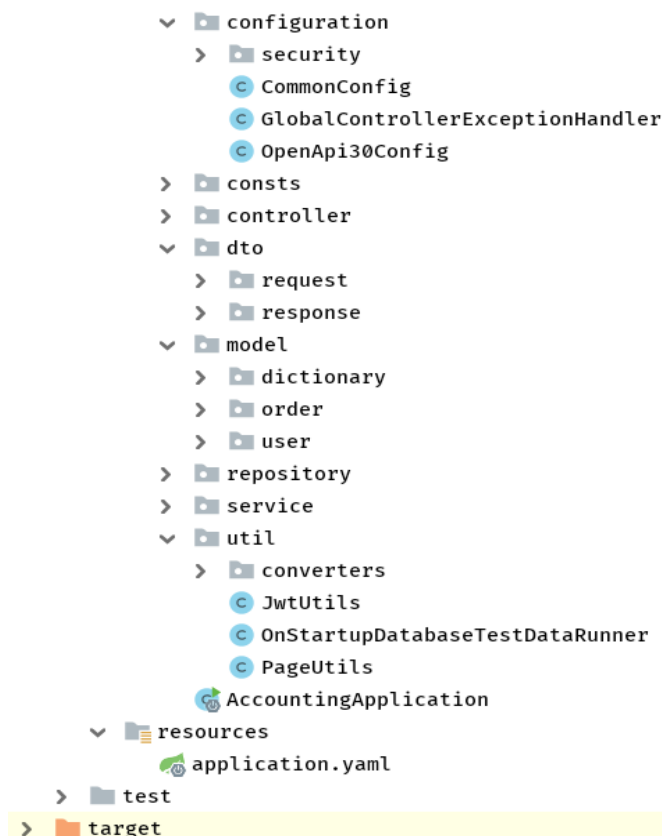


Figure 4 - Service structure

The "SecurityConfiguration" class is "conPictured" to work with JWT tokens, the "AuthTokenFilter" class accepts HTTP requests and as a filter performs token processing, recognizes the user and gives him access rights to the API server.

Swagger was used for API documentation. It allows you to test the API, find examples of queries and answers. Examples of the Swagger API are shown in Fig.5. and Fig.6.

The client system is presented in the form of an application that uses a component approach, the so-called atomic design (English atomic design) [10]. The level of services which includes abstraction for work with API-authorization is taken out separately. The component approach is to reuse components in terms of their complexity, as shown in Fig.7.

In general, atomic design contains 5 levels:

- "atom": this is the smallest component that can be reused in the application. An example of an atom is a button that contains a certain stylization, text, a description of how to act on certain events, such as clicking. It is appropriate to bring to the atom those buttons that contain the same stylization and behavior;
- "molecule": a combination of atoms, or atoms with some more complex or complex logic. An example of a molecule is input (search box) with a button to "clear" the field;
- "organism": it is a composition of atoms, molecules with a certain complex logic. The drop-down menu, which contains a search box molecule, a checkbox atom, and its own logic with the ability to select all flags or clear all flags, is an example of an organism;
- "template": this is a certain stylization of some components, which describes their relative position. It is appropriate to separate the header deviations from the page fill in the template. Only the page can use templates. Templates do not contain any logic, except for the position of the components;



- "page": this is a container that contains all other levels. Almost always the page contains all the necessary logic to obtain data and the functions that lead this data to those interfaces that use other level.

```
SignupRequest {
  username* string
    maxLength: 256
    minLength: 3
  email* string
    maxLength: 256
    minLength: 0
  role
    [
      uniqueItems: true
      string
    ]
  password* string
    maxLength: 256
    minLength: 6
}
```

Figure 5 - Example of a query in the Swagger API

POST /api/v1/auth/signup

Parameters Try it out

No parameters

Request body **required** application/json

Example Value | Schema

```
{
  "username": "string",
  "email": "string",
  "role": [
    "string"
  ],
  "password": "string"
}
```

Responses

Code	Description	Links
200	OK	No links

Media type: application/hal+json

Controls Accept header.

Example Value | Schema

```
{}
```

Figure 6 - Example of query testing via the Swagger API



Figure 7 - Example of the concept of atomic design

The application is built using an architectural approach to atomic design, it allows you to easily modify any level of abstraction of components and reuse them to create new pages, or expand existing ones.

### 5. System catalog description

Hardware catalog is a list of specific equipment used in cryptocurrency mining. The user is able to add new equipment to the catalog or update information as needed. All equipment available in the catalog can be used for further accounting or planning. Each order is closely related to the catalog. Because the directory is a so-called "dictionary", orders are able to retrieve information from the catalog and already create specific objects based on catalog data. The catalog includes the operation of such devices as: fans, air conditioners, hoods, mining farms, cooling systems for mining farms, etc. Any equipment can be added to the order. The order has its own life cycle and can go to different depending on what actions the user performs.

**Methods of user work** with the software system demonstrates examples of program work simultaneously at the level of the graphical user interface and the server system. The example in Fig.8. shows a table of mining farms where the user can create new objects, search for them, delete and edit objects.

## Mining Farm

<input type="text" value="Search for mining farm"/> <input type="button" value="Clear"/> <input type="button" value="Search"/> <input type="button" value="Add new"/>											
	#	Model	Release date	Size	Weight	Power	Price usd	Manufacturer	Created when	Created by	Modified when
<input type="button" value="Edit"/> <input type="button" value="Delete"/>	1	A11 Pro ETH (2000Mh)	2021-07	-	-	2500W	700	Innosilicon	25-01-2022 08:27	catalogAdmin	-
<input type="button" value="Edit"/> <input type="button" value="Delete"/>	2	KD5	2021-03	200 x 264 x 290mm	8500g	2250W	400	Goldshell	25-01-2022 08:27	catalogAdmin	-
<input type="button" value="Edit"/> <input type="button" value="Delete"/>	3	A10 Pro+ ETH (750Mh)	2020-12	136 x 285 x 362mm	8100g	1350W	1000	Innosilicon	25-01-2022 08:27	catalogAdmin	-

Figure 8 - Mining farms page

Fig.9 and Fig.10 show tables of air conditioners and cooling systems where the user can search for the required equipment configuration.

## Air conditioning device

<input type="text" value="Search for devices"/> <input type="button" value="Clear"/> <input type="button" value="Search"/> <input type="button" value="Add new"/>											
	#	Model	Power	Weight	Size	Price usd	Web reference	Created when	Created by	Modified when	Modified by
<input type="button" value="Edit"/> <input type="button" value="Delete"/>	1	MSZ-FH35VE/MUZ-FH35VE	3.5 kWt	13,5 kg	30.5x92.5x23.4 sm	1321	<a href="https://bt.rozetka.com.ua/mitsubishi_electric_msz-fh35ve_muz-fh35ve/p381980/">https://bt.rozetka.com.ua/mitsubishi_electric_msz-fh35ve_muz-fh35ve/p381980/</a>	25-01-2022 08:27	catalogAdmin	-	-
<input type="button" value="Edit"/> <input type="button" value="Delete"/>	2	SEZ-M35DA/SUZ-KA35VA	1130 kWt	21 kg	99x70x20 sm	2300	<a href="https://bt.rozetka.com.ua/248450467/p248450467/">https://bt.rozetka.com.ua/248450467/p248450467/</a>	25-01-2022 08:27	catalogAdmin	-	-
<input type="button" value="Edit"/> <input type="button" value="Delete"/>	3	SEZ-M25DA/SUZ-KA25V	1130 kWt	21 kg	79x70x20 sm	2000	<a href="https://bt.rozetka.com.ua/248450455/p248450455/">https://bt.rozetka.com.ua/248450455/p248450455/</a>	25-01-2022 08:27	catalogAdmin	-	-

Figure 9 - Air conditioners page

## Cooling Rack

Search for mining farm

Clear

Search

Add new

	#	Model	Power	Weight	Size	Price usd	Web reference	Created when	Created by	Modified when	Modified by
<div>EditDelete</div>	1	For 3	-	33kg	800x600x900	1800	https://simplex-group.com.ua/product/ustanovka-dlya-mayninga-na-3-antminer-s17/	25-01-2022 08:27	catalogAdmin	-	-
<div>EditDelete</div>	2	For 3 without body kit	-	33kg	800x600x900	400	https://simplex-group.com.ua/product/ustanovka-dlya-mayninga-na-3-antminer-s17-bez-obvesa/	25-01-2022 08:27	catalogAdmin	-	-
<div>EditDelete</div>	3	For 3 Air-cooled Dry-Cooler	-	33kg	800x600x900	1800	https://simplex-group.com.ua/product/ustanovka-dlya-mayninga-na-3-antminer-s17-s-vozdushnym-ohlazhdeniem-dry-cooler/	25-01-2022 08:27	catalogAdmin	-	-

Figure 10 - Cooling systems page

Fig.11 shows the order page, where the user can search for specific equipment, create a new order, edit (where allowed), and perform further processing.

## Order Page

Search for orders

Clear

Search

Add new

	#	Status	Type	Name	Waiting action from	Action history	Mining Farms	Cooling Racks	Air Condition Devices																									
<div>Process</div> <div>Edit</div>	1	Planned	Installation	Installation 1	orderAdmin	<table> <tr> <th>Executing #</th> <th>date</th> <th>Execution username</th> <th>Status from</th> <th>Status to</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>25-01-2022 08:27</td> <td>orderAdmin</td> <td></td> <td>Planned</td> </tr> </table>	Executing #	date	Execution username	Status from	Status to	1	25-01-2022 08:27	orderAdmin		Planned	<table> <tr> <th>Amount</th> <th>Device purpose</th> <th>Mining Farm #</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>Installation</td> <td>1</td> </tr> </table>	Amount	Device purpose	Mining Farm #	1	Installation	1	-	<table> <tr> <th>Amount</th> <th>Device purpose</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>Installation</td> </tr> </table>	Amount	Device purpose	1	Installation					
Executing #	date	Execution username	Status from	Status to																														
1	25-01-2022 08:27	orderAdmin		Planned																														
Amount	Device purpose	Mining Farm #																																
1	Installation	1																																
Amount	Device purpose																																	
1	Installation																																	
<div>Process</div> <div>Edit</div>	2	Cancelled	Maintenance	Maintenance 2	-	<table> <tr> <th>Executing #</th> <th>date</th> <th>Execution username</th> <th>Status from</th> <th>Status to</th> </tr> <tr> <td>2</td> <td>25-01-2022 08:27</td> <td>orderAdmin</td> <td></td> <td>Planned</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>25-01-2022</td> <td>orderAdmin</td> <td>Planned</td> <td>In progress</td> </tr> </table>	Executing #	date	Execution username	Status from	Status to	2	25-01-2022 08:27	orderAdmin		Planned	3	25-01-2022	orderAdmin	Planned	In progress	<table> <tr> <th>Amount</th> <th>Device purpose</th> <th>Mining Farm #</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>Maintenance</td> <td>2</td> </tr> </table>	Amount	Device purpose	Mining Farm #	1	Maintenance	2	-	<table> <tr> <th>Amount</th> <th>Device purpose</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>Maintenance</td> </tr> </table>	Amount	Device purpose	1	Maintenance
Executing #	date	Execution username	Status from	Status to																														
2	25-01-2022 08:27	orderAdmin		Planned																														
3	25-01-2022	orderAdmin	Planned	In progress																														
Amount	Device purpose	Mining Farm #																																
1	Maintenance	2																																
Amount	Device purpose																																	
1	Maintenance																																	

Figure 11 - Order page

### Conclusions

During the implementation of this work, a thorough analysis of the subject area was conducted. Industrial mining farms consume a lot of electricity. Today, on average, the cost of mining electricity is about 30% of the

available currency. The productivity of mining farms depends on the efficiency of heat dissipation from fuel elements.

It should be noted that existing systems that are able to solve the problem of optimized use of resources for blockchain networks and could fully meet the requirements of mining processes, are proprietary systems that may not be specific to the specific subject area and have a high cost. Therefore, the requirements were analyzed, technologies were selected, the system architecture was developed, precedents and internal processes of the software product were modeled, and the program code was written.

The developed system belongs to the sphere of management and optimization of resources of large computer centers, namely - to the organization of mass purchases of equipment, its installation and maintenance during operation, decommissioning of mining farms and cooling systems.

This system allows users to create their own catalogs of equipment in the form of models and then effectively organize the planning and management of devices in the form of orders for an abstract model that consolidates devices. This model makes it easy to control, locate, and perform actions on related objects.

From a practical point of view, this product is simple in terms of graphical interface and does not require much time to train staff to use it.

It should also be noted that the models in the system scale quickly and it is quite easy to make changes to them as needed (for example, as needed by users).

### References

1. Samokhin V. I., Samokhin D. V., Babkin E. E., Petrov I. M. Relevance of energy saving issues on mining farms. URL: [https://www.researchgate.net/publication/334126812\\_Relevance\\_of\\_power\\_saving\\_at\\_mining\\_farms](https://www.researchgate.net/publication/334126812_Relevance_of_power_saving_at_mining_farms)
2. Varlamov G.B. Varlamov D.G. Multi-channel thermosyphon with vertical evaporation chamber. Patent of Ukraine for utility model № 122371, January 25, 2018, bldg. № 2.
3. Segeda I., Jiang Jianguo. Leveling up the process of visualizing the heat of video cards with victories of immersive cooling. Steel development - XXI century. Discussions 2020: collective monograph / National University "Kyiv-Mohyla Academy" / ed. prof. Khlobistova E.V. - Kiev, 2020. - P. 320-325. — Electronic vision. ISBN: 978-617-7668-22-91.
4. Varlamov G.B., Segeda I. W., Jiang Jianguo. The potential of data processing centers in the minds of the digital economy. Implementation of the policy of modernizing the economic system in modern minds: materials of the scientific and practical conference (Dnipro, 25 April 2021). - Dnipro. NO "Perspective", 2021.-P.86-90.
5. Sitnik D., Jiang Jianguo, Varlamov G. The main directions of solving the problem of cooling powerful computer systems. // Modern problems of scientific support of energy: Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students 2020. In 2 volumes - K.: KPI them. Igor Sikorsky, 2020. - Vol. 1.p.188.
6. Varlamov GB, Romanova KO, Jiang Jianguo. Features of achieving high efficiency of cooling systems of computer systems // Environmental safety: problems and solutions: Coll. Science. Articles of the XVI International Scientific and Practical Conference (Kharkiv, September 14-18, 2020) / UKRNDIEP. - PE "Style-Izdat", 2020. P. 50-57.
7. Jiang Jianguo, Varlamov G. Romanova K., Liu Xiyang, Liu Jigang. Estimation of efficiency of cooling of the air condenser at change of thermal resistance of tubes / Power engineering: economy, technologies, ecology.-№4 2021, - P.32-39.
8. Lokotarov Yevhenii. AN ANALYSIS OF THE USAGE COMPUTING RESOURCES IN BLOCKCHAIN NETWORKS // Modern science: problems and innovations. Abstracts of the 10th International scientific and practical conference. SSPG Publish. Stockholm, Sweden. 2020. Pp. 21-27. URL: <https://sci-conf.com.ua/x-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-modern-science-problems-and-innovations-13-15-dekabrya-2020-goda-stokgolm-shvetsiya-arhiv/>
9. Brad Frost Atomic Design. Chapter 2: Atomic Design Methodology URL: <https://bradfrost.com/blog/post/atomic-web-design/>

**Г.Б. Варламов**, докт. техн. наук, професор, ORCID 0000-0002-4818-2603

**І.В. Сегеда**, канд. екон. наук, доцент, ORCID 0000-0003-1958-4985

**Є.О. Локоторьов**, магістр комп. наук, ORCID 0000-0003-0554-1968

**Цзян Цзяньго**, аспірант, ORCID 0000-0003-2559-4071

**І. Мітченко**, аспірант, ORCID 0000-0002-6361-9471

**Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»**  
**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗБОРУ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ**  
**ПОТУЖНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ**

*Проаналізовано предметну область з урахуванням проблеми забезпечення надійності енергоживлення майнінгових ферм криптовалют та ефективності використання систем охолодження важливих джерел*

виділення теплоти з урахуванням необхідності захисту їх від перегріву під час роботи. Досліджено важливий аспект продуктивності майнінг-ферм, який залежить від ефективності відведення теплоти від тепловиділяючих елементів обчислювальних комплексів в процесі високошвидкісних обчислень. Актуальність роботи полягає у необхідності створення надійних обчислювальних системних комплексів з автоматизованим підтриманням теплового режиму потужного майнінгу комп'ютерних систем, нарощування потужності яких пов'язане зі зростанням попиту на ринку криптовалют. Успішне впровадження таких умов роботи забезпечить надійний запуск програмного забезпечення для майнінгу на десятках, сотнях і тисячах ферм, що в свою чергу зменшить час на налагодження інфраструктури та прискорить отримання прибутку від продажу криптовалют. Запропоновано та описано функціонування автоматизованої системи контролю та оптимізації підбору апаратного забезпечення для великих обчислювальних центрів. Впровадження цієї системи в компанії, що виробляють криптовалюту, дозволить успішно вирішити проблему вибору необхідного обчислювального обладнання для майнінг-ферм та їх систем охолодження, його швидкого компонування та встановлення на об'єкті, простоти обслуговування як під час монтажу та введення в експлуатацію, так і під час обслуговування із досягнення мінімальних значень P.U.E.

**Ключові слова:** комп'ютерні системи, майнінг-процеси, ефективність, охолодження, автоматизована система підбору обладнання

#### **Список використаної літератури**

1. Самохин В. И., Самохин Д. В., Бабкин Е. Е., Петров И. М. Актуальность вопросов энергосбережения на майнинг-фермах URL: [https://www.researchgate.net/publication/334126812\\_Relevance\\_of\\_power\\_saving\\_at\\_mining\\_farms](https://www.researchgate.net/publication/334126812_Relevance_of_power_saving_at_mining_farms)
2. Varlamov G.B. Varlamov D.G. Багатоканальний термосифон з вертикальною камерою випаровування. Патент України на корисну модель № 122371, 25.01.2018 р., бюл. № 2.
3. Сегеда І.В., Цзян Цзяньго Нівелювання процесу виділення тепла відеокарт з використанням іммерсійного охолодження. Сталій розвиток — ХХІ століття. Дискусії 2020: колективна монографія / Національний університет "Києво-Могилянська академія" / за ред. проф. Хлобистова Є.В. — Київ, 2020. — С. 320-325. — Електронне видання. ISBN: 978-617-7668-22-91.
4. Варламов Г.Б., Сегеда І. В., Цзян Цзяньго. Потенціал можливостей центрів обробки даних в умовах цифрової економіки. Реалізація політики модернізації економічної системи в сучасних умовах: матеріали науково-практичної конференції (м. Дніпро, 25 вересня 2021 р.).-Дніпро. НО «Перспектива», 2021.-С.86-90.
5. Ситник Д.С., Цзян Цзяньго, Варламов Г.Б. Основні напрямки вирішення задачі охолодження потужних комп'ютерних систем. // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів 2020 року. У 2 т. — К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. — Т. 1.с.188.
6. Варламов Г. Б., Романова К. О., Цзян Цзяньго. Особливості досягнення високих показників ефективності роботи систем охолодження обчислювальних комплексів // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей XVI Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 14–18 вересня 2020 р.) / УКРНДІЕП. – ПП «Стиль-Іздат», 2020. С. 50–57.
7. Цзян Цзяньго, Г.Б. Варламов, К.О. Романова, Лю Сюсянг , Лю Джиганг. Оцінка ефективності охолодження повітряного конденсатора при зміні термічного опору трубок / Енергетика: економіка, технології, екологія.-№4 2021,- С.32-39.
8. Lokotarov Yevhenii. AN ANALYSIS OF THE USAGE COMPUTING RESOURCES IN BLOCKCHAIN NETWORKS // Modern science: problems and innovations. Abstracts of the 10th International scientific and practical conference. SSPG Publish. Stockholm, Sweden. 2020. Pp. 21-27. URL: <https://sci-conf.com.ua/x-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-modern-science-problems-and-innovations-13-15-dekabrya-2020-goda-stokgolm-shvetsiya-arhiv/>
9. Бред Фрост. Атомарный дизайн. Глава 2: Методология атомарного дизайна URL: <https://bradfrost.com/blog/post/atomic-web-design/>

Надійшла 21.06.2022

Received 21.06.2022

## 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 двома мовами: українською та 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.), **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) і англійською, відповідно до вимог IEEE style

**У разі відсутності або низького рівня перекладу англomовної версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!**

Для надання відомостей про авторів англійською слід використовувати загальноприйнятну лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

**Англomовна анотація за обсягом рекомендується більшою за українську 1700-2000 знаків,** оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

**У разі відсутності або низького рівня перекладу англomовної анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!**

**В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:**

(Анкети подаються 2 мовами (укр., англ.). Вказується повна назва організації або установи, 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)