

ISSN 1813-5420

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

# ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№2–2020

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

# ЕНЕРГЕТИКА

*економіка, технології, екологія*

Науковий журнал

№ 2 (60) - 2020

Виходить 4 рази на рік  
Заснований у березні 2000 року

Енергетична ефективність та енергозбереження  
Енергетика сталого розвитку  
Моніторинг, діагностика та керування енергетичними процесами та  
обладнанням  
Енергетичні системи та комплекси

---

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2020

Головний редактор – Ю.І. Якименко

Заступники

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

Відповідальний секретар – О.О. Закладний

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

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ

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

Технічний секретар Н.О. Кравчук.

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

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

Журнал внесено до Переліку фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук відповідно до наказу МОН України № 1188 від 24 вересня 2020 р. Журнал включено до баз даних «Наукова періодика України» НБУВ, Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, Джерело, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, електронного архіву наукових матеріалів ELAKPI. Підписано до друку за рекомендацією Вченої ради Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (протокол № 7 від 9 листопада 2020 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Комп'ютерна верстка О.С. Іщенко.

Відповідальний за випуск видання Н.О.Кравчук.

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

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

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

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

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

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

# POWER ENGINEERING

*economics, technique, ecology*

*ENERHETYKA:*  
*ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya*

**The Scientific Journal**

**№ 2 (60) – 2020**

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Energy efficiency and energy savings  
Sustainable energy  
Monitoring, diagnostics and management of energy processes and  
equipment  
Energy systems and complexes

---

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2020

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

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

*Deputy* O.O. Zakladnyi

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

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

Technical secretary N.O. Kravchuk

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

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

The Journal was registered approved by order of MES of Ukraine № 1188 of September 24, 2020 as an occupational edition. The Journal is included in databases «Scientific Periodicals of Ukraine», Google Scholar, Index Copernicus WorldCat, BASE, OpenAIRE, Djerelo, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, electronic archive of research materials ELAKPI. Passed for printing under recommendation of Academic Council of National Technical University of Ukraine " Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute " (protocol № 7 on November 09, 2020).

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

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

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

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

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

© Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020

## ЗМІСТ

### ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

<b>П.П. Куделя, С.В. Дубовський.</b> Енергетичний і ексергетичний підходи до проблеми раціонального використання енергії.....	7
<b>І.В. Панасюк, О.І. Єщенко, М.М. Шовкалюк.</b> Термомодернізація будівель закладів вищої освіти – проблеми та рішення. ....	17
<b>М.К. Безродний, Т.О. Місюра.</b> Високоєфективна теплонасосна система вентиляції та кондиціонування виробничого приміщення з рециркуляцією вентиляційного повітря. ....	26
<b>В. І. Дешко, І.Ю. Білоус, С.О. Крамаренко.</b> Додаткові тепловтрати в місцях примикання віконної рами до огорожувальних конструкцій. ....	36
<b>А.І. Крючков, Н.І. Жукова, С.В. Зайченко, В.Г. Смоляр.</b> Забезпечення теплозбереження будівельних конструкцій використанням відходів виробництва мінеральної вати як наповнювача керамоблоків. ....	44

### ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

<b>Г.А. Глущенко, В.В. Залозний, А.К. Давиденко.</b> Досвід практичної експлуатації сонячної електростанції в умовах Сумської області.....	50
--	----

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

<b>В.І. Хоменко, В.Б. Нізімов.</b> Особливості режимів збудження автономного синхронного генератора при значних збуреннях. ....	62
<b>О.М. Терентьев, М.І. Сергієнко, А.І. Гузан.</b> Застосування інноваційних систем для ефективного буріння свердловин на кар'єрах України. ....	71
<b>О.А. Сірий, А.С. Соломаха, Т.В. Чирка, Д.З. Пакош.</b> Особливості моделювання процесу розпилення зрідженого газу для ДВЗ. ....	79
<b>О.О. Закладний, В.В. Прокопенко, Т.В. Гребенюк.</b> Система технічного діагностування для випробувань електродвигунів. ....	88
<b>В.В. Михайленко, В.А. Святненко, Ю.М. Чуняк, В.І. Бачинський.</b> Дослідження перетворювача з п'ятнадцятизонним регулюванням напруги і активно-індуктивним навантаженням. ....	97

### ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

<b>В.А. Побігайло, В.П. Калінчик.</b> Побудова системи розпізнавання образів у пристроях обмеження струмів короткого замикання. ....	103
<b>В.С. Колісник, В.В. Кучанський.</b> Проблеми надійності автоматизованих систем обліку електричної енергії (АСОЕ).....	120
Вимоги до оформлення статей .....	127

## CONTENTS

### ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

<b>P. Kudelya, S. Dubovskyi.</b> Energy and exergy approaches to the problem of rational energy use.....	7
<b>I. Panasiuk, O. Yeshchenko, M. Shovkaliuk.</b> Thermomodernization of buildings of higher institutions education - problems and solutions .....	17
<b>M. Bezrodny, T. Misiura.</b> Highly efficient heat pump ventilation and air conditioning system of the production area with ventilation air recirculation.....	26
<b>V. Deshko, I. Bilous, S. Kramarenko.</b> Additional heat losses at the junctions of the window frames and enclosing structures.....	36
<b>A. Kryuchkov, N. Zhukova, S. Zaichenko, V. Smoliar.</b> Providing heat saving of building structures with the use of waste from the production of mineral wool as a filler for ceramic blocks .....	44

### SUSTAINABLE ENERGY

<b>H. Hlushchenko, V. Zaloznyi, A. Davydenko.</b> Practical experience of solar power plant in the Sumy region .....	50
--	----

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

<b>V. Khomenko, V. Nizimov.</b> Features of excitement modes of the autonomous synchronous generator at significant disturbances.....	62
<b>O. Terentiev, N. Sergienko, A. Huzan.</b> Use of innovative systems for efficient drilling of wells in the quarry of ukraine.....	71
<b>A. Sirij, A. Solomakha, T. Chyrka, D. Pakosh.</b> Features of liquid gas spraying process simulation for internal combustion engine.....	79
<b>O. Zakladnyi, V. Prokopenko, T. Hrebenuk.</b> Technical diagnostic system for electric motor tests .....	88
<b>V. Mihaylenko, V. Sviatnenko, J. Chunya, V. Bachinskiy.</b> Study of converter with fifteen zone regulation voltage and active-inductive loads .....	97

### ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

<b>V. Pobigaylo, V. Kalinchyk.</b> Building a picture recognition system in short circuit current devices .....	103
<b>V. Kolisnyk, V. Kuchansky.</b> Reliability problems of automated system of electricity metering (ASE) .....	120
Requirements for the articles .....	127

# ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

УДК 621.103

П.П. Куделя, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-4941-5795  
Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»  
С.В. Дубовський, д-р. техн. наук, ст. наук. співр., ORCID 0000-0001-9418-2092  
Інститут технічної теплофізики НАН України

## ЕНЕРГЕТИЧНИЙ І ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХОДИ ДО ПРОБЛЕМИ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ

*Роботу присвячено двом методам аналізу енергоперетворюючих процесів – енергетичному та ексергетичному і ролі в них термодинамічних характеристик – кількості (стала величина) та якості (змінна властивість). Основної уваги приділено ексергетичному методу і якісній характеристиці енергії, розумінню її фізичного смислу, встановленню зв'язку якості енергії з положеннями Другого закону термодинаміки, які відповідають сучасному рівню термодинамічної науки, описові універсальної міри якості різних форм енергії – ексергії і її значення для вирішення задач раціонального використання енергії. Дана робота може бути корисною для тих, хто зацікавлений в кращому розумінні положень Другого закону, основ ексергетичного методу і в його практичному застосуванні.*

**Ключові слова:** енергозбереження, Перший закон, Другий закон аналіз за другим законом термодинаміки, якість енергії, ексергія, дисипація, виробництво ентропії.

### Вступ

Немає потреби доводити, що зменшення споживання енергії є одним із найважливіших завдань людства. Вирішення його має на меті збереження непоновлюваних енергоресурсів (первинних енергетичних ресурсів (ПЕР), викопних палив) і скорочення шкідливих викидів в атмосферу. Минули безповоротно ті часи, коли люди використовували природу як невичерпний склад, звідки дозволено брати все, що заманеться, і в той же час як величезне звалище, куди можна викидати все, що не потрібно. Енергозбереження прямо пов'язане з подальшим сталим розвитком суспільства (СРС), тобто з розвитком, який задовольняє сучасним вимогам, але при цьому не ставить під загрозу можливість майбутніх поколінь задовольняти свої потреби. Проблема раціонального використання первинної енергії загострюється сьогодні у зв'язку з нагальною необхідністю попередження катастрофічних наслідків глобальних змін клімату, найбільш вірогідною причиною якого є викиди парникових газів з продуктами згоряння викопного палива.

Для успішного проведення активної енергозберігаючої політики суттєво важливий науково обґрунтований аналіз всієї послідовності енергетичних процесів. Базою для такого аналізу служить сучасна термодинамічна наука про енергію і її перетворення. Закони термодинаміки в стислій формі включають в себе величезний досвід людства по вивченню властивостей енергії в процесах її перетворень.

На сьогодні переважають два підходи до ефективного використання енергії: енергетичний та ексергетичний [1-4]. Енергетичний підхід ґрунтується на Першому законі термодинаміки – Законі збереження енергії, ексергетичний – на спільному застосуванні двох основних законів термодинаміки – Першого і Другого до технічних задач. Такі підходи пов'язані з використанням двох термодинамічних характеристик енергії – кількості і якості: кількості – в енергетичному, обох – в ексергетичному [2, 5-8].

За Першим законом можливі лише перетворення одних форм енергії в інші з додержанням балансу кількості енергії. Розвиток науки і техніки змусив прийняти до уваги той факт, що врахування лише кількісної характеристики енергії необхідно, але недостатньо для вирішення проблем енергетики. Виникла потреба врахувати важливу для практики характеристику енергії – якість. Як буде показано далі, основна якісна характеристика енергії – це здатність її до перетворення в інші форми, що в свою чергу визначає придатність, економічну цінність енергії. Таку здатність відображає Другий закон, який встановлює умови перетворення енергії і являє собою по суті закон перетворення енергії.

© П.П. Куделя, С.В. Дубовський, 2020



Відмітимо, що Другий закон має фундаментальне значення. Без використання Другого закону подальший розвиток теплоенергетики, хімічної технології і багатьох інших галузей техніки і науки був би неможливий. Важливість Другого закону підкреслюється і відомим афоризмом: Перший закон у термодинаміці виконує обов'язки головного бухгалтера, Другий – директора. Це вірно в тому розумінні, що не тільки напрям усіх реальних процесів, а і можливість їх протікання визначає саме Другий закон, а Перший лише пильнує за тим, щоб зберігався баланс енергії.

Для визначення якості енергії в кількісній формі, іншими словами, для встановлення стандарту, кількісної міри якості енергії знадобилось рівняння не лише Другого закону – ентропійний баланс, а і Першого – енергетичний баланс. В результаті їх спільного рішення було одержано універсальну міру якості, яка отримала назву «ексергія» і врахувала як якісну характеристику енергії, так і кількісну. На понятті «ексергія» ґрунтується ексергетичний баланс і ексергетичний метод аналізу енергоперетворюючих процесів. Таким чином, ексергетичний аналіз являє собою застосування основних законів термодинаміки до технічних систем. Метод направлений на рішення задач найбільш ефективного використання енергоресурсів. Основи цього методу закладено в 50-х роках минулого століття в основному вченими Польщі, Росії, Германії. В США широке використання ексергетичного методу почалось після енергетичної кризи 1970-х років і особливо після дискусії в 1980 році в журналі «Energy». Всі застосування ексергетичного методу спираються на той незаперечний факт, що в енергоперетворюючих процесах енергія водночас і зберігається кількісно (Перший закон) і деградує, знижуючи свою якість – ексергію (Другий закон). Суть проблеми енергозбереження якраз і полягає в тому, щоб навчитись економно розпоряджатись якістю енергії – ексергією. З допомогою ексергетичного аналізу вдається вибирати ексергетично сприятливі процеси, тобто мало споживаючі ексергію і, крім того, уникати втрат ексергії при перетворенні первинної енергії в необхідну кінцеву енергію. На сьогодні ексергетичний метод добре обґрунтований, набув широкого визнання і не потребує доказів корисності. Приклади плідних ідей, ефективних технічних рішень, які вдалось втілити в життя з допомогою ексергетичного методу, а також приклади грубих помилок, яких вдалось би уникнути при використанні ексергетичного аналізу, детально описані в літературі [1-5, 7, 9-12]. Корисні для практики рекомендації, які направлені на зменшення втрат ексергії, а отже і на економію енергоресурсів, можна знайти в роботах [5, 10, 13].

Ексергетичному методу присвячена величезна кількість статей і книг, він вивчається на відповідних технічних спеціальностях в усіх передових навчальних закладах світу. Проте в нашій країні значна частина тих, кому ексергетичний метод може бути корисним в науковій і практичній діяльності (науковці і інженери), мають про нього досить віддалене уявлення. У вітчизняних підручниках термодинаміки ексергетичний метод ще не знайшов достатнього застосування, його наукові і методичні переваги в трактовці фундаментальних положень термодинаміки не використовуються. Діють в основному уявлення, які засновані на чисто енергетичному підході до енергетичних перетворень, в якому враховується лише одна термодинамічна характеристика енергії – кількість. Як приклад, може служити твердження, що основні втрати на теплових електростанціях відносяться до конденсатора, а отже він може бути помилково прийнятий як елемент, головним чином відповідальний за низький коефіцієнт корисної дії станції.

#### **Мета та завдання**

В даній роботі основна увага приділена розумінню фізичного смислу поняття «якість енергії», встановленню зв'язку якості енергії з положеннями Другого закону, описові кількісної міри якості енергії – ексергії і її значення для вирішення задач енергетики. Оскільки закономірності зміни якості енергії відображає Другий закон, то для його розуміння і практичного застосування виникла потреба детально опрацювати його на мікроскопічному (статична термодинаміка) і макроскопічному (класична термодинаміка) рівнях з використанням понять «дисипація енергії» і «виробництво ентропії». Дана робота може бути корисною для тих, хто зацікавлений в кращому розумінні положень Другого закону, основ ексергетичного методу і в його практичному застосуванні.

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

##### **1. Значення терміну «енергія», термодинамічні характеристики енергії**

Для того, щоб з знанням справи користуватись законами термодинаміки і впливаючими з них підходами до ефективного використання енергії, спочатку з'ясуємо, що означає термін «енергія» і які існують важливі для практики її термодинамічні характеристики.

Існування поняття енергії встановлює Перший закон. Частіше всього енергія трактується як узагальнена кількісна міра різних форм руху матерії (тіла і його мікрочастинок – молекул, атомів...). Збереження енергії означає, що при взаємних перетвореннях різних форм руху матерії кількість енергії завжди залишається сталою. Виразити смисл терміна «енергія» через інші, більш зрозумілі терміни, не вдається [14, 15]. Відомий фізик, лауреат Нобелівської премії Р.Фейман та інші стверджують, що фізиці сьогодняшнього дня невідомо, що таке енергія [14, 15]. В [15] висловлена думка, що можливо енергія, як і поезія, така реальність, яку краще зовсім не визначати: ми звикаємо до терміна «енергія» в процесі успішного його використання в усіх сферах людської діяльності. Оскільки дати точне визначення терміна «енергія» не вдається, то в [14] була запропонована обґрунтована методика виявлення значення терміна.

Суть її полягає в тому, що з різних загальнонаукових і технічних дисциплін беруться ті значення, в яких прийнято використовувати певний термін. З аналізу численних джерел, не дивлячись на деякі протиріччя висловлювань, можна встановити, що переважають такі значення терміну «енергія»: фізична величина і рух (чи форма руху) матерії [14].

Оскільки енергія входить в багато формул, які зв'язують фізичні величини, то, очевидно, вона також відноситься до категорії фізичних величин. По суті від них не відрізняються міркування, в яких використовується термін «міра» як синонім терміна «фізична величина» [14].

В багатьох випадках термін «енергія» використовують в якості синоніма терміна «рух» або «форма руху» матерії. Наприклад: електрична, теплова, механічна, хімічна, ядерна енергії, дисипація (розсіювання) енергії. Твердження, що енергія - властивість матерії справедливе, якщо під енергією розуміти рух – атрибут (невід'ємна властивість) матерії. Широко поширений термін «Закон збереження і перетворення енергії»: у поєднанні зі словом «збереження» енергія означає фізичну величину, а у поєднанні зі словом перетворення – рух. Рух може змінювати форму (перетворюватись), а фізична величина – ні до яких перетворень не здатна [14].

В залежності від того, в якому значенні використовується термін «енергія» (фізична величина чи рух), в літературі можна зустріти такі вирази: енергія упорядкованого руху і упорядкована енергія, енергія неупорядкованого (хаотичного) руху і неупорядкована (хаотична, теплова) енергія і т.ін. [8, 14, 16]. В сучасній термодинаміці термін «енергія» використовується як в значенні «фізична величина», так (і що важливо) як «рух» чи «форма руху». Такі значення терміну «енергія» приводять до поєднання у ньому двох термодинамічних характеристик енергії: кількості (завжди стала величина) і якості (змінна властивість, пов'язана зі словом «рух»).

## 2. Кількісна характеристика енергії і Перший закон термодинаміки

Енергетичний баланс є початковим пунктом кожного енергетичного аналізу. В загальному випадку в енергобалансі представляються всі форми енергії, що стосуються техніки, проте лише кількісно оціненими (Перший закон). Контрольну поверхню системи (рис.1) можуть пересікати (підводитись і відводитись) потоки теплоти  $\Sigma Q$ , роботи  $\Sigma N$ , енергії речовини  $\Sigma E_p$ . Остання складається з потоків ентальпії  $\Sigma H$ , кінетичної  $\Sigma KE$  і потенціальної  $\Sigma PE$  енергій [3, 17]. Для стаціонарних поточних систем у відповідності з законом збереження енергії завжди виконується рівність:

$$\Sigma N^{під} + \Sigma Q^{під} + \Sigma E_p^{під} = \Sigma N^{від} + \Sigma Q^{від} + \Sigma E_p^{від} \quad (1)$$

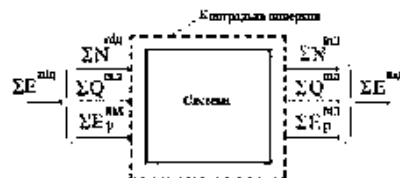


Рисунок 1 - Схема енергетичного балансу системи

Рівняння (1) служить не лише для складання і перевірки енергетичних балансів різних систем, а і для обчислення коефіцієнтів ефективності. Проте енергобаланс не враховує різну якість, технічну цінність форм енергії і зниження енергетичної ефективності реальних процесів внаслідок прояву необоротностей. Тому енергобаланс не може служити надійною основою для складання виразів об'єктивної оцінки досконалості енергоперетворюючих процесів. Після того, як Другий закон був математично оформлений, стало очевидним, що енергетичний баланс будь-якої системи повинен відповідати і його положенням, які стосуються якості різних форм енергії і напряму протікання процесів.

## 3. Якісна характеристика енергії і Другий закон термодинаміки

У всіх реальних процесах має місце безперервний ланцюг енергетичних перетворень. Як би вони не протікали, в кінцевому підсумку, внаслідок закону збереження енергії природі неминуче віддається стільки енергії, скільки від неї було забрано, але вже в іншій, «відпрацьованій» формі. Отже, значення має не кількість енергії сама по собі, оскільки вона зберігається (Перший закон), а лише природна здатність даної кількості енергії знижувати свою якість в реальних процесах [3, 4, 9, 18]. Подібну думку вперше висловив в середині XIX століття Лауреат Нобелівської премії Р.Шредінгер в книзі «Що таке життя з точки зору фізики», відмітивши, що живий організм має потребу не в енергії, яка міститься в їжі, а в здатності цієї енергії знижувати свою якість.

**Визначення терміну «якість енергії».** Виникає питання, який характерний критерій може служити основою оцінки якості енергії? Існує лише один загальний критерій якості: в якій мірі властивість будь-чого відповідає своєму призначенню, тобто вимогам споживача, суспільства. Стосовно енергії використання цього критерія у всіх випадках неминуче поєднується з можливістю перетворення енергії з однієї форми в

інші [3, 4, 9, 18]. Саме в здатності енергії до перетворень проявляються розбіжності різних форм енергії, їх якість – практична придатність.

**Класифікація форм енергії за здатністю до перетворень**

Багаторічні спостереження і дослідження привели вчених до висновку, що за ознакою перетворення різні форми енергії можна розділити на три групи: необмежено перетворювані, обмежено перетворювані і зовсім неперетворювані форми енергії [3, 9]. До енергій, що перетворюються необмежено, належить різного виду роботи, кінетична, потенціальна, електрична, ядерна енергії [3]. Обмежено перетворювана теплота, енергія текучої речовини, що пересікає границю системи - ентальпія. Зовсім не здатна до перетворень і не представляє технічної цінності енергія навколишнього середовища (повітря, морська вода ...). Ця енергія існує лише в фізичному сенсі, а в технічному вона «мертва», до перетворень не здатна, її якість дорівнює нулю (крім випадків, коли існує достатня різниця температур між частинами середовища).

Отже, основна якісна характеристика енергії – це її здатність до перетворення в інші форми. Чому існують обмеження для взаємних перетворень різних форм енергії? Яку практичну роль якість енергії відіграє в аналізі енергоперетворюючих процесів? На ці питання дає відповідь Другий закон термодинаміки. Він відображає, як уже відмічалось, якісні характеристики енергії і по суті являє собою закон перетворення енергії.

Для кращого розуміння Другого закону і його практичного застосування нижче викладено основні положення цього закону, які відрізняються від традиційних і засновані на особливостях перетворення енергії з використанням понять «дисипація енергії» і «виробництво ентропії».

**Опис Другого закону на макроскопічному і мікроскопічному рівнях.** Основи цього закону закладено у XIX столітті у вигляді принципу необоротності на основі численних макроскопічних дослідних спостережень. Кількісно виразити принцип необоротності вдалося завдяки введенню Клаузіусом в 1865 році поняття ентропії. Ця величина була відкрита суто теоретично як характеристика стану, що з'являється при математичному аналізі ефективності кругових процесів (циклів) і дозволяє в аналітичній формі сформулювати Другий закон термодинаміки. Через таємничий характер, зумовлений головним чином тим, що ентропія не діє на наші органи почуття (не існує приладу, яким її можна виміряти), фізики досить активно протидіяли запровадженню цієї нової величини. Фізичний зміст ентропії було розкрито пізніше у статичній термодинаміці, яка встановлює зв'язок між фізичними властивостями макроскопічного тіла (складається з величезної кількості мікрочастинок - молекул, атомів...) і його внутрішньою мікроскопічною будовою. Австрійський фізик Л.Больцман в кінці XIX віку вперше довів, що фізичну суть ентропії не можна розкрити на відчутному для нас макроскопічному рівні: загадкова характеристика стану – ентропія – відображає невидимий стан мікрочастинок тіла. Л.Больцман *ввів статистичне визначення ентропії, як міри неупорядкованості (хаотичності) руху мікрочастинок системи* [16, 19]. Це положення означає, що ентропія є зростаючою функцією рівня хаотичності: чим більша неупорядкованість (хаотичність) руху мікрочастинок, тим більше значення ентропії. На підставі теорії ймовірності (статистичний підхід) було доведено, що із всіх форм руху хаотичний (неупорядкований) рух мікрочастинок є найбільш ймовірним. Природно, що будь-який упорядкований рух прагне перейти в хаотичний (неупорядкований) рух (енергію хаосу, безладдя) [8, 16]. Очевидно, що зворотний перехід хаотичного руху мікрочастинок в упорядкований сам по собі (самочинно) здійснюватись не може, бо такий перехід майже неймовірний. Для термодинаміки визначення ентропії, *як міри внутрішньої неупорядкованості макротіла чи характеристики ймовірності їх станів*, має важливе значення, оскільки воно розкриває фізичний зміст цього поняття і дозволяє робити вірні якісні висновки про основні властивості ентропії та характер її зміни в різних процесах.

На основі опису поведінки мікрочастинок (статистична термодинаміка, мікроскопічний рівень) Другий закон припускає більш просте і фізично ясне тлумачення [8, 16]. Таке обґрунтування Другого закону виходить за рамки класичної термодинаміки (макроскопічний рівень), оскільки спирається на уявлення щодо атомно-молекулярної структури макроскопічних тіл (статистична термодинаміка). Для інженерного аналізу і проектування класична термодинаміка більш корисна ніж статистична. Проте статистична термодинаміка стає більш корисною в поясненні природи досліджуваних явищ. Щоб найбільш природним і фізично зрозумілим шляхом дійти до встановлення закономірностей Другого начала і їх практичного застосування доцільно користуватись положеннями як класичної, так і статистичної термодинаміки.

З позиції перетворюваності енергії суть Другого закону термодинаміки на мікроскопічному рівні визначається таким *явищем, яке називається дисипацією (розсіюванням) енергії* [16]: **енергія прагне розсіюватися, іншими словами – всі реальні процеси неминуче супроводжуються розсіюванням (дисипацією) енергії; дисипація – явище необоротне.**

Причина цього явища на мікрорівні обумовлена механізмом обміну енергією між величезною кількістю рухомих мікрочастинок при їх взаємних зіткненнях. В результаті енергія хаотичного руху мікрочастинок збільшується (принаймні частина впорядкованого руху переходить в хаотичний, а рівень хаотичності неупорядкованого руху зростає). Ентропія, як міра хаотичного руху мікрочастинок, при цьому виробляється (генерується)  $S_{ген} > 0$ . *Створення ентропії ( $S_{ген} > 0$ ) - найважливіша особливість усіх реальних процесів.* Суттєво, що ентропія ( $S_{ген} > 0$ ) виробляється дисипативними процесами всередині системи, а не

запозичується зовні. Теоретично в ідеальному (оборотному) процесі рівень хаотичності руху мікрочастинок був би незмінним ( $S_{ген}=0$ ), але насправді такий ідеальний процес неможливо реалізувати. Ніякий протилежний процес, тобто процес зі знищенням ентропії ( $S_{ген}<0$ ), неможливий. Дисипація приводить до таких змін енергії, які не піддаються самовідновленню і породжують необоротність перетворення енергії та, як наслідок, необоротність термодинамічних процесів. *Отже, необоротний (реальний) процес – це процес, в якому перетворення енергії відбувається з дисипацією енергії, оборотний – без дисипації.* Природне прагнення енергії до розсіювання визначає і напрям, в якому протікають фізичні і хімічні процеси.

В класичній термодинаміці на макроскопічному рівні Другий закон термодинаміки найбільш загально формулюється так [19, 20]: *про які б системи не йшла мова - ізольовані, закриті, відкриті – завжди виконується нерівність  $S_{ген} \geq 0$  ( $\delta S_{ген} \geq 0$ ), тобто вироблена ентропія завжди позитивна, знищення її ( $S_{ген} < 0$ ) неможливе.* Згідно з умовою перетворення енергії  $S_{ген} \geq 0$  маємо:

- $S_{ген} > 0$  – реальний (необоротний) процес;
- $S_{ген} = 0$  – оборотний (гранично ідеалізований);
- $S_{ген} < 0$  – неможливий процес.

З опису Другого закону слідує, що відмінність у здатності різних форм енергії до перетворення з мікроскопічних позицій (статистична термодинаміка) пов'язана з різним характером руху мікрочастинок (молекул, атомів ...) [16]. Форми необмежено перетворювальної енергії відрізняються впорядкованим (організованим) характером руху мікрочастинок, а обмежено перетворювані і неперетворювані - невпорядкованим (неорганізованим). По відношенню до ентропії організована енергія (англ. Ordered Energy, нім. Geordnete Energie) безентропійна, характеризується нульовою ентропією ( $S=0$ ). Неорганізована енергія (англ. Disordered Energy, нім. Ungeordnete Energie) – ентропійна, характеризується ентропією відмінною від нуля  $S>0$  [3, 4, 6, 8]. У відповідності з умовою перетворення енергії  $S_{ген} \geq 0$  всі форми безентропійної енергії ( $S=0$ ) здатні до необмежених перетворень. Навпроти, для ентропійної енергії ( $S>0$ ) неможливе перетворення зі знищенням ентропії ( $S_{ген} < 0$ ). Очевидно, будь-яка організована енергія ( $S=0$ ) в технічному розумінні якісніша, цінніша. Такі форми енергії – універсальні, тому що завжди можливо перетворення їх у будь-яку форму енергії. Якість упорядкованої енергії стовідсоткова. Як буде показано далі, всі необмежено перетворювані форми енергії (безентропійні), повне перетворення яких в будь-яку іншу форму припустиме за Другим законом, можна узагальнити коротким терміном «ексергія». Перетворити повністю неорганізовану енергію ( $S>0$ ) в організовану ( $S=0$ ) неможливо, оскільки при цьому ентропія повинна знижуватись ( $S_{ген} < 0$ ). Часткове перетворення можливе, але лише за умови  $S_{ген} \geq 0$ .

В процесі дисипації енергії кількість енергії зберігається, але перехід руху в більш хаотичну форму приводить до зниження якості енергії, до її знецінення, деградації в процесах енергетичних перетворень. Здатність енергії до перетворень, її якість погіршується і при відведенні в навколишнє середовище зовсім зникає. Така енергія технічної, економічної цінності не має. Отже, енергія водночас і зберігається (Перший закон) і знижує свою якість – деградує (Другий закон). Наша задача – навчитись економічно розпоряджатись якістю енергії (іншими словами, знижувати рівень виробництва ентропії). В цьому якраз і полягає Суть проблеми енергозбереження [7, 8, 10, 13, 16].

#### 4. Кількісне формулювання Другого закону, ентропійний баланс

Щоб мати можливість виконувати розрахунки, в техніці і природознавстві завжди намагаються виразити закономірності в кількісній формі, тобто у вигляді математичних співвідношень між фізичними величинами. Для Другого закону це вдалось завдяки введенню поняття ентропії. Згідно з кількісним формулюванням Другого закону ентропія може передаватись через контрольну поверхню відкритої системи з теплотою  $S_Q$  і речовиною  $S_p$ , а також виробляється всередині системи дисипативними процесами ( $S_{ген} \geq 0$ ). Це дозволяє записати рівняння ентропійного балансу для стаціонарного поточного процесу у вигляді (рис. 2) [17, 20, 21]:

$$\Sigma S_p^{під} + \Sigma S_Q^{під} + \Sigma S_{ген} = \Sigma S_p^{від} + \Sigma S_Q^{від}; \quad \Sigma S_{ген} = \Sigma S^{від} - \Sigma S^{під}, \quad \Sigma S_{ген} \geq 0. \quad (2)$$

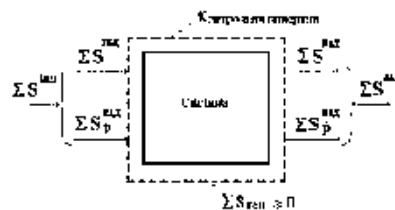


Рисунок 2 - Схема ентропійного балансу системи

Сумарна відведена ентропія  $\Sigma S^{від}$  повинна бути рівною сумарній підведеній ентропії або перевищувати її на величину генерації ентропії  $\Sigma S_{ген} \geq 0$ . Перший випадок відноситься до ідеальної

(оборотної) системи, другий – до реальної (необоротної). Якщо ж  $\Sigma S^{\text{від}} < \Sigma S^{\text{під}}$ , то  $\Sigma S_{\text{ген}} < 0$  – такий процес неможливий.

Ентропійний баланс використовується в ентропійному методі аналізу і оптимізації енергоперетворюючих технічних систем [22, 23]. Проте громіздкість, а в деяких випадках обмежені можливості ентропійного методу не завжди забезпечують знаходження правильних рекомендацій для вирішення інженерних задач [2].

### 5. Універсальний стандарт якості енергії – ексергія, ексергетичний баланс

Для змінної якості різних форм ентропійної (неупорядкованої) енергії в аналізі технічних систем виникла потреба знайти кількісну міру якості. В принципі мірою якості може бути будь-яка безентропійна (упорядкована) енергія, яку можна одержати від ентропійної (неупорядкованої) енергії. Найбільш природним і зручним стандартом якості виявилась максимальна робота, яку можна одержати з даної форми енергії в умовах даного навколишнього середовища [6]. Цей стандарт якості енергії одержав назву «ексергія». Підкреслимо, що «робота» використовується тільки як загальна міра якості енергії, а не як кінцева мета енергетичних перетворень. Ексергія є цінністю, валютою по відношенню до всіх форм енергії.

Можливість одержати роботу існує лише тоді, коли характеристики системи (тиск, температура, швидкість, хімічний склад і потенційна енергія системи) відрізняються від характеристик стану (параметрів) навколишнього середовища. Ця можливість повністю втрачається, коли система і навколишнє середовище знаходяться в рівновазі та спокої по відношенню один до одного. Звідси навколишнє середовище – нульовий рівень відліку ексергії. Величина роботи, як кількісна міра якості енергії, входить в рівняння енергетичного балансу (Перший закон термодинаміки), а умова перетворюваності  $S_{\text{ген}} \geq 0$  - в рівняння ентропійного балансу (Другий закон). Спільне рішення цих рівнянь дозволяє визначити кількісно ексергію різних форм енергії, її втрати в залежності від необоротності процесів (генерації ентропії  $S_{\text{ген}} \geq 0$ ), а також складати рівняння ексергетичного балансу різних технічних систем перетворення енергії і речовини [17, 24].

Виділення ексергії в складі енергії призвело до думки представити кількість енергії у вигляді двох складових. Одна з них – ексергія, яку можна перетворити в енергію будь-якої форми, а інша – анергія, яка в даних умовах навколишнього середовища ні до яких перетворень не здатна [21]. Для одержання ексергії необхідні цінні природні ресурси – джерела енергії, а по суті джерела ексергії (хімічне і ядерне паливо, гідроенергія і т.ін.), а також спеціальне устаткування. Ексергія в тій чи іншій формі потрібна для реалізації всіх технічних процесів. Тому ексергія завжди має вартість і витратити її слід по можливості економно. На противагу – анергія знаходиться в необмеженій кількості в навколишньому середовищі і її якість дорівнює нулю.

**Ексергетичний баланс.** Величини ексергетичного балансу включають ексергію тих форм енергії, що входять в рівняння енергетичного балансу. Як правило, це ексергія потоків теплоти  $E_Q$ , роботи  $E_N$ , речовини  $E_M$  [3, 7, 25]:

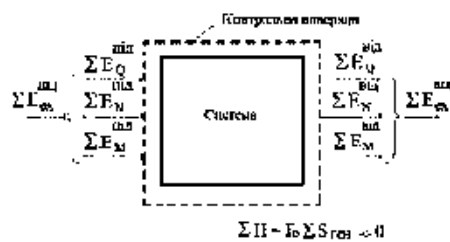


Рисунок 3. - Схема ексергетичного балансу системи

У відповідності з рис.3 для стаціонарної поточної системи рівняння ексергетичного балансу має вигляд [2, 3, 4, 17]:

$$\Sigma E_Q^{\text{під}} + \Sigma E_N^{\text{під}} + \Sigma E_M^{\text{під}} = \Sigma E_Q^{\text{від}} + \Sigma E_N^{\text{від}} + \Sigma E_M^{\text{від}} + \Sigma \Pi. \quad (3)$$

Найбільше практичне значення має ексергія потоку речовини  $E_M$  і такі її складові:

$$E_M = E_{\text{фіз}} + E_{\text{кін}} + E_{\text{пот}} + E_{\text{хім}},$$

де  $E_{\text{фіз}}$  – фізична ексергія (ексергія ентальпії),  $E_{\text{кін}}$  і  $E_{\text{пот}}$  – ексергія кінетичної і потенціальної енергії,  $E_{\text{хім}}$  – хімічна енергія - розраховуються за методиками, які приводяться в літературі [3, 6, 7, 10]. Величини  $E_{\text{пот}}$ ,  $E_{\text{кін}}$ ,  $E_N$  - це високоякісні, упорядковані (безентропійні) форми енергії і, за означенням, являють собою ексергії ( $E_{\text{кін}} = KE$ ,  $E_{\text{пот}} = PE$ ,  $E_N = N$ ).

Ексергетичний баланс за рівнянням (3) відображує зміст обох законів термодинаміки і, таким чином, враховує не лише якість, а й кількість різних форм енергії. Істотною особливістю ексергетичного балансу є

використання в ньому зіставних, якісно рівноцінних величин – ексергій. Серед складових балансу суттєве місце займає величина  $P=T_0S_{gen} \geq 0$ , де  $T_0$  – температура навколишнього середовища. Величина  $P$  має чітко виражений смисл безповоротних втрат ексергії внаслідок прояву необоротностей (дисипації енергії) в реальних процесах (тертя, теплообмін при кінцевій різниці температур, дроселювання, хімічні перетворення ...). Втрачена (знищена) ексергія перетворюється в анергію - неперетворювану складову енергії - баласт, який підлягає в подальшому відведенню в навколишнє середовище. Перетворити анергію в ексергію за Другим законом ( $P=T_0S_{gen} \geq 0$ ) неможливо. Отже, рівняння ексергетичного балансу може розглядатись як кількісне формулювання закону деградації енергії, тоді як рівняння енергетичного балансу – як кількісне формулювання закону збереження енергії.

Терміни «втрата ексергії» і «втрата енергії» мають принципово різний зміст. Втрата ексергії означає повне її знищення. Втрата енергії означає не втрату взагалі (енергія, як відомо, зникати не може), а втрату її для реалізації даної мети у випадку, коли частина енергії не використовується корисно. Реальний процес може протікати взагалі без втрат енергії, проте внаслідок прояву необоротностей (дисипації енергії) та частина ексергії, яка перетворюється в анергію, і являє собою втрату ексергії. Так, наприклад, адіабатне дроселювання робочого тіла не змінює його енергію, а знижує її якість (ексергію). В адіабатно ізолюваних теплообмінниках, вихрових трубах, камерах змішування і згорання енергія повністю зберігається, проте втрачає свою якість, енергетичну цінність, деградує.

#### **6. Ексергетичний метод – основні положення**

Необхідно чітко усвідомити, що головне в енергозбереженні з погляду Другого закону – це збереження якості енергії, іншими словами, збереження ексергії, як міри якості енергії, її технічної цінності. Ексергія має вартість і, природно, що її витрати повинні бути економічними. При перетворенні первинних енергоресурсів у необхідну кінцеву енергію важливо знати де, скільки, як і чому ексергія втрачається. Саме ексергетичний метод аналізу (включає складання матеріального, енергетичного і ексергетичного балансів) і вказує на місця, величину і джерела термодинамічної неефективності в енергоперетворюючій системі. Така інформація є необхідною і достатньою для підвищення ефективності технічної системи. Вона недоступна при використанні лише енергетичного аналізу, оскільки в ньому не враховуються якісні характеристики енергетичних потоків. Отже, головна мета ексергетичного аналізу - знаходити і кількісно оцінювати конкретні причини термодинамічної недосконалості теплових і хімічних процесів та виявляти найбільш ефективні способи їх вдосконалення. Аналіз з позиції ексергії можливий на всіх стадіях створення і експлуатації технічних систем. Об'єктами аналізу можуть бути не лише енергетичні системи (наприклад, теплосилові, теплонасосні, холодильні, криогенні установки), а й складні технічні системи перетворення енергії і речовини типу хіміко-технологічних, металургійних, енерготехнологічних. Крім того, ексергетичний метод сприяє розвитку так званого ексергетичного мислення, або в більш широкому плані - мислення на основі положень Другого закону (за американською термінологією Exergy management або Second Law mentality). Коли енергоресурси і технології розглядаються з врахуванням Другого закону через ексергію, то інженерно-енергетичне мислення переходить на більш високий творчий рівень [5,7].

Історія розвитку термодинаміки і її застосування нерозривно зв'язана з показниками ефективності перетворення енергії. Базою для оцінки ефективності слугують рівняння енергетичні і ексергетичні показники ефективності перетворення енергії. На цих рівняннях базуються енергетичні і ексергетичні показники ефективності перетворення енергії. Такі показники визначаються як відношення корисного ефекту до затрат на реалізацію цього ефекту. В класичній термодинаміці показники ефективності визначаються лише кількісною оцінкою енергетичних потоків. Як правило, такі безрозмірні показники ефективності в літературі відносились до коефіцієнтів корисної дії (ККД) [2, 4, 26, 27]. Під назвою ККД використовувались різноманітні показники термодинамічної ефективності, в яких зіставляються якісно неоднорідні величини, наприклад, теплота і робота. Ігнорування якісних характеристик енергії приводить до плутанини в ККД в енергетиці і в результаті – до невірних рішень і економічних втрат[2].

Введення поняття ексергії дозволило застосувати для всіх форм енергії єдину якісну характеристику і ввести універсальне визначення ККД як відношення якісно однорідних величин (ексергій). Такі ККД, змінюючись в межах від 0 до 1 (що цілком логічно), показують ступінь наближення до термодинамічно ідеального процесу і називаються ексергетичним ККД (в англійській літературі Exergy Efficiency або Second Law Efficiency). Ексергетичний ККД дозволяє оцінити енергетичну досконалість процесу на основі Першого і Другого законів термодинаміки, врахувати при цьому не лише кількість, а і якість енергії. Це дозволяє зіставляти рівень енергетичної досконалості різних процесів, робити обґрунтований вибір найкращого, визначати принципову можливість і способи удосконалення процесу. Всі коефіцієнти ефективності, в яких якість енергії не враховується, почали називати Coefficient of performance, скорочено COP, дослівно – коефіцієнт виконання, в нашій літературі – коефіцієнт перетворення енергії (КПЕ) [3]. Загальний ексергетичний підхід до визначення ККД не виключає використання COP. Значення COP дає корисну для практики інформацію, показуючи кількісно скільки за даних умов одержується корисної енергії на одиницю затраченої, тобто як система виконує своє призначення. Разом з тим COP, на відміну від ексергетичного ККД, не дає об'єктивну інформацію щодо рівня енергетичної досконалості технічних

систем. Причина в тому, що у визначені COP якість енергії (Другий закон термодинаміки) не береться до уваги і результати невірно відображають рівень досконалості енергоперетворюючих процесів. Так, енергетичний показник ефективності – термічний ККД (КПЕ) геотермальних і атомних станцій, в яких використовується теплота від джерел з відносно низькою температурою, суттєво нижчий, ніж у станцій, які працюють на органічному паливі (при тому ж або більш високому рівні технічної досконалості), тобто цей ККД, на відміну від ексергетичного, дає викривлену інформацію [3, 4, 26, 27]. Енергетичний показник ефективності ідеального вугільно-кисневого паливного елемента (ПЕ) перевищує 120%, а ідеального воднево-кисневого ПЕ чуть вище 80%. Природно, що ексергетичний ККД в обох випадках дорівнює 100% [2].

Результати ексергетичного аналізу дають можливість по-іншому оцінити і вплив процесів в окремих елементах установки на її загальну ефективність. Наприклад, по даним енергетичного аналізу низька ефективність паросилової установки (ПСУ) обумовлена значною кількістю теплоти, яка відводиться в конденсаторі в навколишнє середовище. Ця невикористана теплота складає більше 50% від теплоти, яка виділяється при спалюванні палива. Але її не можна розглядати як суттєву втрату згідно з Другим законом термодинаміки. Доля ексергії в цій теплоті складає всього декілька відсотків (3-5%). Результати енергетичного і ексергетичного аналізів суттєво відрізняються і в оцінці втрат в парогенераторі (ПГ) і в оцінці його ефективності. Так, при енергетичному ККД (КПЕ) котла 0,85-0,9 його ексергетичний ККД, який характеризує досконалисть процесів в ПГ, не перевищує 45% [21, 28]. Більше половини ексергії палива втрачається внаслідок необоротності процесів згорання і теплопередачі. Парогенератор, таким чином, являється джерелом великих ексергетичних втрат, що взагалі не знаходить відображення в енергетичному ККД (КПЕ). Тому основна увага при підвищенні енергетичної ефективності ПСУ приділяється заходам, які підвищують ексергетичний ККД ПГ: підвищення початкових параметрів пари, регенеративний підігрів живильної води, повторний перегрів пари і т.ін. [21, 28].

Відмінність між показниками ефективності КПЕ і ексергетичним ККД має фундаментальне значення, оскільки її ігнорування веде до неправильних рішень. Ексергетичний ККД тепер широко використовується в світі як в теоретичних роботах, так і на практиці в енергетиці і в других зв'язаних з нею галузях [3, 4, 6, 7, 11].

Загальний напрямок зниження ексергетичних втрат – це зменшення необоротності процесів (зменшення виробництва ентропії). З такого загального положення витікає багато прийомів зниження втрат ексергії, починаючи з найпростіших методів (таких, як збільшення поверхні теплообмінників) до внесення кардинальних змін в технологію. Так, в одній із хімічних технологій простими засобами вдалось знизити затрати енергії в три рази в порівнянні з класичною технологією [5]. Інформація про необоротності допомагає також зрозуміти ідеї, які лежать в основі дії енергоперетворюючих систем, і тенденції їх розвитку [5, 7].

*Таким чином, економія енергоресурсів завжди зводиться в кінцевому рахунку до збереження якості енергії - ексергії, до боротьби проти виробництва ентропії. Наше завдання – навчитись економію розпоряджатись якістю енергії (ексергією).*

Термодинамічно ідеальним є оборотне перетворення енергії без втрат ексергії (якості). Проте практично досягнути його неможливо, оскільки при цьому незмірно зростають затрати на устаткування. В реальних процесах при зменшенні необоротностей (втрат ексергії), з одного боку, досягається економія паливно-енергетичних ресурсів, з іншого – ростуть затрати на устаткування і навпаки. Оскільки зменшення втрат ексергії вимагає, як правило, додаткових інвестиційних затрат, то технічно і економічно найбільш сприятливе рішення допускає певні втрати ексергії, які відповідають мінімальним затратам на устаткування і його експлуатацію. Поєднання економічного аналізу з ексергетичним реалізується у відносно новій і перспективній науці, яка називається термoeкономією (ексергоекономією) [3, 6, 7, 10]. Ексергетичний метод при його правильному використанні надасть суттєву допомогу при вирішенні важливих задач економії енергетичних і матеріальних ресурсів [2, 29].

### **Висновки**

Показано, що значення терміну «енергія» поєднує дві термодинамічні характеристики енергії: кількість і якість. Аналіз закономірностей перетворення енергії змусив прийняти той факт, що раціональне використання енергії зводиться в кінцевому рахунку до збереження якості енергії. Приведено визначення якості енергії, встановлено зв'язок якості енергії з положеннями Другого закону, який детально опрацьовано на мікро- і макроскопічному рівнях. Описано універсальну міру якості енергії – ексергію. На понятті ексергії ґрунтується ексергетичний баланс і ексергетичний метод аналізу енергоперетворюючих процесів. Обговорено переваги ексергетичного методу в порівнянні з традиційним енергетичним

### **Список використаної літератури**

1. Low exergy systems for high-performance buildings and communities. Annex 49 summary report IEA ECBCS. – Fraunhofer IBR. -2011. Режим доступу: [www.annex49.com](http://www.annex49.com).
2. Бродянский В.М. Классическая термодинамика на рубеже XXI века: состояние и перспективы развития. Изв. РАН. Энергетика. – 2001.-№5. – с.17-43.

3. Эксергетические расчеты технических систем: Справ. пособие Бродянский В.М., Верхивкер Г.П., Карчев Я.Я. и др.: под ред. Долинского А.А., Бродянского В.М. АН УССР, Ин-т технической теплофизики.-Киев: Наук. думка, 1991. – 360 с.
4. Brodyanskyi W.M., Sorin M.V. and Le Goff P. The efficiency of industrial processes: exergy analysis and optimization. Amsterdam. Elsevier, 1994. - 487p.
5. Лейтес И.Л. Второй закон и его 12 заповедей. Популярная термодинамика и химическая энерготехнология. – М.: Изд-во МГУ, 2002.-176 с.
6. Kotas T.J. The exergy method of thermal plant analysis. Krieger publishing Company. Malabar, Florida, 1995,- 328 p.
7. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалец К. Эксергетический метод и его приложения. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
8. Эрдеи-Груз Т. Химические источники энергии. Пер. с нем. - М.: Мир, 1974.-304 с.
9. Fratcher W., Brodyanskyi V., Michalek K. Exergy. Theory and anwendung. Leipzig. VEB Deutcher Verlag fur Grundstoff Industrie. Leipzig.1986. - 331 S.
10. Szargut J. Exergy method: technical and ecological application. Wit Press, Southampton, Boston, 2005, -160 p.
11. Szargut J., Moris D.R., Steward F.R. Exergy analysis of thermal chemical and metallurgical processes. Hemisphere Publ. Corp, 1988, New York - 332 p.
12. Сажин Б.С., Булеков А.П., Сажин В.Б. Эксергетический анализ работы промышленных установок. – М., Москов. гос. текст. ун-т, 2000. – 297 с.
13. Fratcher W., Stephan K. and others. Strategy of Waste Energy Usage and the Conception of Entropy Economics. Berlin Brandenburg Academy of Sciences and Humanities, 2000. – 39 p.
14. Гомоюнов К.К. Совершенствование преподавания общественных и технических дисциплин. Методологические аспекты анализа и построения учебных текстов. Изд. 2-е. – СПб: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 1993. – 252 с.
15. Янтовский Е.И. Поток энергии и эксергии. М.: Наука, 1988. – 144 с.
16. Эткинс П. Порядок и беспорядок в природе. – М.: Мир, 1987. – 224 с.
17. 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>.
18. Бродянский В.М. Энергия: проблема качества. // Наука и жизнь. – 1982.-№ 3. с.88-95.
19. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. Пер. с англ. – М.: Мир, 2002. - 461 с.
20. Baehr H.D. Thermodynamik. Eine Einführung in die Grundlagen und ihre technischen Anwendungen. Vierte, Neunte Auflage – Berlin: Springer, 1996. – 460 S.
21. Бэр Г.Д. Техническая термодинамика. Перев. с нем., Изд-во «Мир», М.: 1977. – 518 с.
22. Гохштейн Д.П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок. М.: Энергия, 1969. – 367 с.
23. Bijan A. Entropy Generation through Heat and Fluid Flow. Wiley, New York, 1994. – 248 p.
24. Kenneth Wark Jr. Advanced Thermodynamics for Engineers. McGraw-Hill, 1994, - 564 p.
25. Костенко Г.Н. Эксергетический анализ тепловых процессов и установок (теоретические основы вопроса). Политехн. ин-т. – Одесса: 1964. – 32 с.
26. Костенко Г.Н. Термодинамически объективная оценка эффективности тепловых процессов.// Пром.теплотехника. 1983. – т.5, N 4, - с.70-75.
27. Бродянский В.М. О терминологической базе современной инженерной термодинамики. – Изв. РАН, М.: 2007, - с.21-27.
28. Александров А.А. Термодинамические основы теплоэнергетических установок. Изд-во МЭИ, 2004. – 158 с.
29. Бродянский В.М. Эксергетический метод и перспективы его развития. //Теплоэнергетика, № 2, 1988 – с.14-17.

**P. Kudelya**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID 0000-0003-4941-5795**  
**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**  
**S. Dubovskiy**, Dr. Eng. Sc., SRF, **ORCID 0000-0001-9418-2092**  
**Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine**

## **ENERGY AND EXERGY APPROACHES TO THE PROBLEM OF RATIONAL ENERGY USE**

*The work is devoted to two methods of analysis of energy-converting processes - energy and exergy and the role of thermodynamic characteristics in them - quantity (constant value) and quality (variable property). The main attention is paid to the exergetic method and qualitative characteristics of energy, understanding of its physical meaning, establishing the connection of energy quality with the provisions of the Second Law of Thermodynamics, which correspond to the modern level of thermodynamic science, describing the universal quality of various forms of energy – the exergy and its importance for solving problems of rational energy use. This work can be useful for those who are interested in a better understanding of the provisions of the Second Law, the basics of the exergetic method and its practical application.*



**Keywords:** *energy saving, First law, Second law, Second law analysis, energy quality, exergy, dissipation, entropy production.*

#### REFERENCES

1. Low exergy systems for high-performance buildings and communities. Annex 49 summary report IEA ECBCS. – Fraunhofer IBR. -2011. Rezhim dostupu: [www.annex49.com](http://www.annex49.com).
2. Brodyanskiy V.M. Klassicheskaya termodinamika na rubezhe HHI veka: sostoyanie i perspektivy razvitiya. Izv. RAN. Energetika. – 2001.-#5. – s.17-43.
3. Eksergeticheskie raschetyi tehnikeskih sistem: Sprav. posobie Brodyanskiy V.M., Verhivker G.P., Karchev Ya.Ya. i dr.: pod red. Dolinskogo A.A., Brodyanskogo V.M. AN USSR, In-t tehnikeskoy teplofiziki.-Kiev: Nauk. dumka, 1991. – 360 s.
4. Brodyanskiy W.M., Sorin M.V. and Le Goff P. The efficiency of industrial processes: exergy analysis and optimization. Amsterdam. Elsevier, 1994. - 487p.
5. Leytes I.L. Vtoroy zakon i ego 12 zapovedey. Populyarnaya termodinamika i himicheskaya energotekhnologiya. – M.: Izd-vo MGU, 2002.-176 s.
6. Kotas T.J. The exergy method of thermal plant analysis. Krieger publishing Company. Malabar, Florida, 1995,- 328 P.
7. Brodyanskiy V.M., Fratsher V., Mihalek K. Eksergeticheskiy metod i ego prilozheniya. M.: Energoatomizdat, 1988. – 288 s.
8. Erdei-Gruz T. Himicheskie istochniki energii. Per. s nem. - M.: Mir, 1974.-304 s.
9. Fratcher W., Brodyanskiy V., Michalek K. Exergy. Theory and anwendung. Leipzig. VEB Deutcher Verlag fur Grundstoff Industrie. Leipzig.1986. - 331 S.
10. Szargut J. Exergy method: technical and ecological application. Wit Press, Southampton, Boston, 2005, -160 p.
11. Szargut J., Moris D.R., Steward F.R. Exergy analysis of thermal chemical and metallurgical processes. Hemisphere Publ. Corp, 1988, New York - 332 p.
12. Sazhin B.S., Bulekov A.P., Sazhin V.B. Eksergeticheskiy analiz raboty promyshlennykh ustanovok. – M., Moskov. gos. tekst. un-t, 2000. – 297 s.
13. Fratcher W., Stephan K. and others. Strategy of Waste Energy Usage and the Conception of Entropy Economics. Berlin Brandenburg Academy of Sciences and Humanities, 2000. – 39 p.
14. Gomoyunov K.K. Sovershenstvovanie prepodavaniya obschestvennykh i tehnikeskikh distsiplin. Metodologicheskie aspekty analiza i postroyeniya uchebnykh tekstov. Izd. 2-e. – SPb: Izd-vo S.-Peterburgskogo un-ta, 1993. – 252 s.
15. Yantovskiy E.I. Potoki energii i eksergii. M.: Nauka, 1988. – 144 s.
16. Etkins P. Poryadok i besporyadok v prirode. – M.: Mir, 1987. – 224 s.
17. Kudelya P.P. Metodi termodinamicheskogo analiza ustanovok ta sistem [Elektronniy resurs]: navchalniy posibnik /P.P.Kudelya, G.B.Varlamov. - Kiyv: NTUU «KPI», Rezhim dostupu: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/453>.
18. Brodyanskiy V.M. Energiya: problema kachestva. // Nauka i zhizn. – 1982.-# 3. s.88-95.
19. Prigozhin I., Kondepudi D. Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigateley do dissipativnykh struktur. Per. s angl. – M.: Mir, 2002. - 461 s.
20. Baehr H.D. Thermodynamik. Eine Einführung in die Grundlagen und ihre technischen Anwendungen. Vierte, Neunte Auflage – Berlin: Springer, 1996. – 460 S.
21. Ber G.D. Tehnicheskaya termodinamika. Perv. s nem., Izd.-vo «Mir», M.: 1977. – 518 s.
22. Gohshteyn D.P. Sovremennyye metody termodinamicheskogo analiza energeticheskikh ustanovok. M.: Energiya, 1969. – 367 s.
23. Bijan A. Entropy Generation through Heat and Fluid Flow. Wiley, New York, 1994. – 248 p.
24. Kenneth Wark Jr. Advanced Thermodynamics for Engineers. McGraw-Hill, 1994, - 564 p.
25. Kostenko G.N. Eksergeticheskiy analiz teplovykh protsessov i ustanovok (teoreticheskie osnovy voprosa). Politehn. in-t. – Odessa: 1964. – 32 s.
26. Kostenko G.N. Termodinamicheski ob'ektivnaya otsenka effektivnosti teplovykh protsessov.// Prom.teplotekhnika. 1983. – t.5, N 4, - s.70-75.
27. Brodyanskiy V.M. O terminologicheskoy baze sovremennoy inzhenernoy termodinamiki. – Izv. RAN, M.: 2007, - s.21-27.
28. Aleksandrov A.A. Termodinamicheskie osnovy teploenergeticheskikh ustanovok. Izd-vo MEI, 2004. – 158 s.
29. Brodyanskiy V.M. Eksergeticheskiy metod i perspektivy ego razvitiya//Teploenergetika, # 2, 1988 – s.14-17.

Надійшла 21.05.2020  
Received 21.05.2020

**І.В. Панасюк**, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-6671-4266  
**Київський національний університет технологій та дизайну**  
**О.І. Єщенко**, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-3915-486X  
**М.М. Шовкалюк**, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-1898-3493  
**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

## **ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЯ БУДІВЕЛЬ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ – ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕННЯ**

*Витрати на утримання будівель бюджетних установ в Україні в 2-3 рази вищі, ніж подібні витрати у країнах Європейського Союзу, причому через низку причин, пов'язаних із застарілим станом зовнішніх огорожень та інженерних мереж, санітарно-гігієнічні вимоги у приміщеннях не дотримуються. В роботі розглянуто результати енергетичного обстеження навчально- адміністративного корпусу КНУТД з метою визначення шляхів зниження витрат на енергозабезпечення та покращення мікроклімату в будівлі. Проаналізовано енергетичний стан корпусу, структуру витрат енергоресурсів. З метою розробки комплексу заходів з енергозбереження проведені вимірювання фактичних енергетичних витрат для визначення базового рівня під час виконання техніко-економічних розрахунків. Енергоаудит проведено із застосуванням інструментальних методів та з фотофіксацією візуального обстеження. Уточнені геометричні, теплотехнічні та енергетичні характеристики будівлі. Для підвищення рівня енергоефективності будівлі запропонована комплексна термомодернізація, яка включає роботи щодо збільшення термічного опору зовнішніх огорожувальних конструкцій та модернізацію інженерних систем, виконано фінансово-економічне обґрунтування ефективності запропонованих енергоефективних заходів.*

**Ключові слова:** вищий навчальний заклад, енергоаудит, енергоефективність, енергоспоживання, термомодернізація, термін окупності.

### **Вступ.**

Комплекси будівель закладів освіти України історично пов'язані з їх будівництвом у післявоєнний період: 47% з них збудовано до 1970 року, 20% – у 1970-1980 р.р., 30% – у 1980-1996 р.р. і тільки 3% збудовано після 2007 р. Архітектурні рішення при проектуванні та обрані технології будівництва не передбачали існуючих на теперішній час вимог з енергоефективності [1] з огляду на невпинне зростання цін на енергоносії та рівня вимог до параметрів мікроклімату приміщень. Інтегральна оцінка сучасного стану енергоспоживання у будівлях освітніх закладів [2,3]:

- основні витрати енергоресурсів пов'язані з системами опалення, гарячого водопостачання та вентиляції;
- незадовільний стан теплового комфорту через недотопи та перетопи приміщень в опалювальний період [4];
- низька ефективність використання теплової енергії через фізично і морально застаріли системи опалення (спосіб підключення до теплових мереж, гідравлічне і теплове розбалансування, відсутність автоматичного регулювання потреби в тепловій енергії і т.д.);
- рівень термозахисту зовнішнього огороження не відповідає вимогам діючих нормативів [1];
- відсутність моніторингу і контролю для ефективного управління енергоспоживанням, а також ігнорування проблеми необхідності підвищення інформованості споживачів та мотивації персоналу [5];
- облік енерговитрат не реалізовано на 100 % для всіх вищих навчальних закладів (ВНЗ), що унеможливило статистичний аналіз та оперативне реагування.

Україна взяла на себе зобов'язання щодо імплементації вимог ЄС [6] у сфері енергоефективності. Заклади освіти в Україні являються утримувачами матеріальної бази і в умовах економії бюджетних коштів повинні самостійно вирішувати питання ефективного управління енергоспоживанням [7]. Київський національний університет технологій та дизайну (КНУТД) – це великий господарюючий комплекс, який складається з 45 будівель різного, насамперед освітнього, призначення. Проблема енергозбереження та підвищення енергоефективності будівель є однією з найважливіших, що гостро стоїть перед колективом в сучасних складних економічних умовах.

В Україні на сьогодні на державному рівні ведеться співпраця з міжнародними фінансовими організаціями для залучення іноземних інвестицій в рамках міжнародних проектів [8], проте для отримання

фінансування заходів з підвищення енергоефективності потрібно попередньо здійснити енергообстеження будівель, виконати ґрунтовний аналіз енергоспоживання з урахуванням різних впливових факторів [9] та розробити інвестиційний проєкт [10].

**Мета та задачі**

Метою дослідження є виявлення потенціалу енергозбереження об'єктів університету на основі енергетичних обстежень структурних підрозділів, будівель і споруд в рамках розробки Програми «Підтримка заходів з енергозбереження та енергоефективності КНУТД», що направлена на ефективне управління використанням паливно–енергетичних ресурсів та поширення знань та навичок енергоощадності серед працівників та студентів. В даній статті наведено методи визначення базового енергоспоживання та подано результати енергетичного обстеження будівлі 4 корпусу КНУТД з метою визначення шляхів зниження грошових витрат на енергозабезпечення та покращення мікроклімату.

**Матеріал і результати досліджень**

На виконання поставленої задачі проведено комплексне енергетичне обстеження навчально-адміністративного корпусу університету з розробкою технічно обґрунтованих заходів для підвищення рівня його енергоефективності

В ході обстеження були виконані наступні дослідження:

- проаналізовано споживання енергетичних ресурсів будівлею з виконанням розрахунків базового рівня;
- проведено вимірювання споживання електроенергії та теплової енергії та проаналізовані впливи зовнішніх та внутрішніх факторів;
- проведено вимірювання параметрів мікроклімату в приміщеннях;
- проведено обстеження огорожувальних конструкцій, в т. ч. тепловізійна зйомка;
- проведено обстеження інженерних мереж будівель;
- запропоновано та економічно обґрунтовано рекомендації щодо покращення ефективності енергоспоживання та підвищення комфорту перебування відвідувачів та персоналу.

Нижче наведено характеристику об'єкта дослідження (табл.1, 2).

*Таблиця 1 – Характеристика системи теплозабезпечення будівлі*

Теплове навантаження, Гкал/год	1,757
- в т.ч. опалення / гаряче водопостачання / вентиляція	0,78 / 0,095 / 0,882
Теплопостачання	Централізоване, залежна схема (елеватор)
Схема подачі теплоносія від зовнішнього джерела	Двотрубна
Тип внутрішньої системи опалення	Одно/двотрубна
Подача теплоносія в системі опалення будівлі	Змішана
Вид опалення	радіатори та повітряне опалення
Наявність балансувальних клапанів / автоматики	Немає / відсутня

*Таблиця 2 – Розрахункові тепловтрати будівлі*

Найменування	Гкал
Тепловтрати через стіни	1034
Тепловтрати через вікна	343
Тепловтрати з інфільтрацією	335
Підігрів припливного повітря	1116
Тепловтрати через дах і підлогу	149
Загалом	2977

Система гарячого водопостачання (ГВП) є закритою, виконана по одноступеневій схемі з пластинчастим теплообмінником. Зважаючи на дефіцит коштів на роботу системи опалення, в будівлі спостерігаються суттєві недотопи; в більшості приміщень температура значно нижча, ніж 18 °С. Система опалення корпусу не передбачає регулювання (в будівлі встановлений гідроелеватор). Система вентиляції наразі не працює та не підлягає відновленню.

Стіни будівлі з бетону. Значна площа огорожень - засклення, це є причиною суттєвих тепловтрат, попри заміну їх на металопластикові конструкції, що не відповідають існуючим нормативам [1].

В результаті енергообстеження було встановлено:

- існуюча система опалення є неефективною: застаріла схема приєднання до теплової мережі (залежна з елеватором), відсутність вузла погодозалежного регулювання (регулятор теплового потоку, контролер), розбалансованість системи (гідрравлічна і тепла);
- умови мікроклімату у приміщеннях не відповідають діючим вимогам;
- потреба в теплоті частково покривається включенням електронідрігравачів в холодний період року.

Для визначення фактичних температур під час енергообстеження склалися температурні карти будівель, при цьому середня фактична внутрішня температура в приміщеннях визначалася наступним чином:

$$t_{\text{вн}} = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i \cdot t_{\text{вн}i})}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad \text{або} \quad t_{\text{вн}} = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i \cdot t_{\text{вн}i})}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (1)$$

де  $F_i$ ;  $V_i$  – відповідно площа та об’єм  $i$ -го приміщення будівлі,  $t_{\text{вн}i}$  – внутрішня температура.

Зважаючи на те, що внутрішня температура може змінюватися протягом дня, тижня, залежно від погоди і пори року, тому обстеження повторювалися декілька разів в різний час доби. Встановлено, що в середньому недогрів складає близько 5°C. У деяких приміщеннях в холодні періоди зафіксовано внутрішню температуру на рівні 10°C. Низький рівень теплозахисту огорожень, використання неефективного обладнання та обмеженість фінансування призводять до зниження температур у приміщеннях до рівня нижче допустимого та, як наслідок, використання електричної енергії для їх догріву.

Таким чином, визначення базового рівня енергоспоживання за усередненими фактичними даними по споживанню палива (або теплової енергії) для досліджуваних об’єктів є некоректним, тому для цієї мети використано інші підходи, що наведено далі.

#### Методи визначення базового рівня енергоспоживання

Зважаючи на специфіку експлуатації об’єктів та те, що методика визначення базового рівня енергоспоживання будівель нормативними та регуляторними документами в Україні, у період реалізації проекту була не регламентована, під час енергетичних обстежень для кожного конкретного випадку базовий рівень може визначатися по-різному. Розглянуто кілька підходів до визначення базового рівня теплоспоживання.

##### 1. Розрахунковий метод відповідно до ДСТУ Б А.2.2-12:2015.

Даний підхід застосовується, якщо неможливо визначити теплоспоживання за фактичними даними, або якщо під час експлуатації були змінені проектні навантаження та наявна необхідна детальна інформація по об’єкту. Для встановлення базового рівня енергоспоживання [кВт·год] за результатами обстежень уточнюються наступні дані:

- загальні будівельні дані про геометрію та орієнтацію будинку, його поверховість та об’єм, площу зовнішніх огорожувальних конструкцій, площу підлоги та перекриттів опалювальних приміщень;
- проектні дані щодо теплотехнічних характеристик огорожень;
- кліматичні характеристики району будівництва;
- нормативна та фактична температури внутрішнього повітря приміщень;
- дані про системи підтримки мікроклімату приміщень і способи регулювання.

Схема послідовності розрахунку енергоспоживання наведена на рис. 1.

##### 2. Розрахунковий метод на основі методики укрупнених показників

Якщо на об’єкті відсутній облік споживання енергоресурсів і у разі, якщо відомі актуальні проектні навантаження [кВт], базовий рівень визначається розрахунковим методом і в загальному вигляді розраховується за формулою:

$$Q_{\text{баз}} = Q_o^{\text{пik}} + Q_{\text{в}}^{\text{пik}} + Q_{\text{ГВП}}^{\text{пik}} \quad (2)$$

де:  $Q_o^{\text{пik}}$ ;  $Q_{\text{в}}^{\text{пik}}$ ;  $Q_{\text{ГВП}}^{\text{пik}}$  – річна потреба в теплоті відповідно на опалення, механічну вентиляцію та гаряче водопостачання будівлі, кВт·год, що розраховуються наступним чином:

$$Q_o^{\text{пik}} = Q_o \cdot \frac{t_{\text{вн}}^{\text{н}} - t_{\text{с.о.}}}{t_{\text{вн}}^{\text{н}} - t_{\text{р.о.}}} \cdot n_o \cdot 24; \quad (3)$$

$$Q_{\text{в}}^{\text{пik}} = Q_{\text{в}} \cdot \frac{t_{\text{вн}}^{\text{н}} - t_{\text{с.о.}}}{t_{\text{вн}}^{\text{н}} - t_{\text{р.в.}}} \cdot n_o \cdot z_{\text{в}} \quad (4)$$

де:  $Q_o$ ,  $Q_{\text{в}}$  – теплове навантаження на опалення та вентиляцію (кВт) визначається за типовими або індивідуальними проектами даних об’єктів;  $t_{\text{вн}}^{\text{н}}$  – нормативна температура внутрішнього повітря, приймається згідно з нормами проектування, °C;  $t_{\text{с.о.}}$  – середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період, °C;  $t_{\text{р.о.}}$ ,  $t_{\text{р.в.}}$  – розрахункова температура зовнішнього повітря для проектування опалення та вентиляції;  $n_o$  – тривалість опалювального періоду, днів;  $z_{\text{в}}$  – усереднене за опалювальний період число годин роботи системи вентиляції протягом доби.

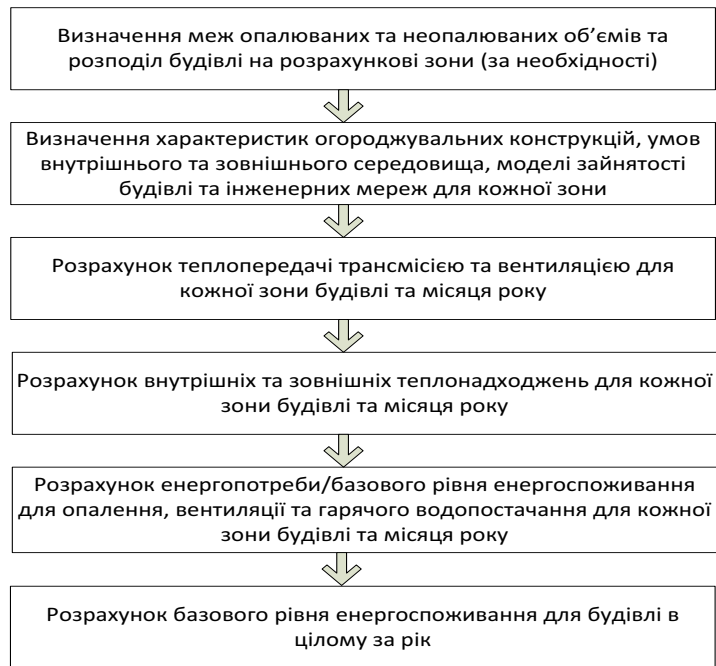


Рисунок 1 – Послідовність визначення базового рівня

Для типових будівель часів масової забудови річну потребу в теплоті [кВт·год] у разі відсутності значень теплових навантажень визначають за формулою:

$$\text{на опалення: } Q_o^{\text{рік}} = \alpha \cdot q_o \cdot V_3 \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{сер.о.}}) \cdot n_0 \cdot 24 \cdot 10^{-3}; \quad (5)$$

$$\text{на вентиляцію: } Q_v^{\text{рік}} = V_v \cdot q_v \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{сер.о.}}) \cdot n_0 \cdot z_v \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

де:  $q_o$  – питома опалювальна характеристика будівель, Вт/(м<sup>3</sup>·°C), приймають залежно від типу будівлі, року побудови, об'єму, поверховості та інших факторів;  $\alpha$  – коефіцієнт, що враховує відмінність реальних умов від розрахункових,  $\alpha = f(t_{\text{р.о.}})$ ;  $V_3$  – зовнішній будівельний об'єм будівлі, м<sup>3</sup>;  $q_v$  – питома вентиляційна характеристика будівлі, Вт/(м<sup>3</sup>·°C);  $V_v$  – вентиляований об'єм будівель, м<sup>3</sup>.

Недоліком даного методу є використання стандартних значень питомої опалювальної характеристики для розрахунку потреби в теплоті вже існуючих споруд. Використання даної характеристики дає завищені результати для масивних будівель (цегляні будівлі) та занижені значення для будівель панельного типу, оскільки дана величина залежить лише від об'єму будівлі та її призначення і зовсім не враховує характеристики огорожувальних конструкцій споруд, які з часом експлуатації втрачають початкові якості (або має місце їх зміна).

### 3. Інструментальний метод з корекцією на вплив інших факторів

Метод базується на даних про фактичне енергоспоживання об'єктом за останні 3 роки з урахуванням погодних-кліматичних умов, причому при розрахунку витрат енергії для потреб опалення враховуються всі види енергоносіїв.

Приведення теплоспоживання до нормативних умов клімату:

$$Q_{\text{привед}} = \sum_{j=1}^{12} Q_{\text{факт } j} \cdot k_{\text{пр } j} = \sum_{j=1}^{12} Q_{\text{факт } j} \cdot \frac{\Gamma_{\text{Д}}^{\text{норм}}}{\Gamma_{\text{Д}}^{\text{факт}}}, \quad (7)$$

де  $Q_{\text{факт } j}$  – фактичне теплоспоживання для потреб опалення будівлі, кВт·год за  $j$ -й місяць;  $\Gamma_{\text{Д}}^{\text{норм}}$ ;  $\Gamma_{\text{Д}}^{\text{факт}}$  – нормативна та фактична кількість градусо-днів опалювального періоду для кліматичної зони розташування будівлі, протягом  $j$ -го місяця відповідно.

Цей метод далі буде використано при визначенні економічного ефекту від рекомендованих заходів.

### Опис та економічне обґрунтування рекомендованих енергоефективних заходів

#### 1. Установка ІТП

Пропонується встановити два індивідуальних теплових пункти (для окремих кондиціонованих зон будівлі) з погодним регулюванням та зниженням теплового потоку у неробочі години, з підтриманням внутрішньої температури в будівлі у черговому режимі відповідно до [11]. Результати розрахунків наведено у табл.3.

Таблиця 3 – Результати техніко-економічного розрахунку для заходу «Установка ІТП»

Найменування	Од.вим.	Величина
Економія енергії: - тепла, - електрична	Гкал кВт·год	210 12224
Економія коштів, в т.ч:		413230
- за рахунок зменшення споживання теплоенергії	грн	357000
- за рахунок зменшення споживання електроенергії		28115
Орієнтовна вартість реалізації	грн	905000
Окупність	років	2,2

## 2. Промивка системи опалення та встановлення термостатів.

Пропонується проведення промивки системи опалення та установка радіаторних термостатичних вентилів для забезпечення індивідуального налаштування температури в приміщеннях, що забезпечить можливість місцевого регулювання та запобігання перетопам у деяких приміщеннях за рахунок сонячних теплонадходжень через велику площу засклення. Результати розрахунків наведено у табл.4.

Таблиця 4 – Результати техніко-економічного розрахунку для заходу «Промивка системи опалення та встановлення термостатів»

Найменування	Од.вим.	Величина
Економія теплової енергії	Гкал	140
Економія коштів	грн	238000
Орієнтовна вартість реалізації, в т.ч.	грн	2270000
- промивка системи		250000
- установка термостатичних вентилів		2020000
Окупність	років	8

## 3. Встановлення теплових насосів.

Пропонується децентралізована система вентиляції з використанням теплових насосів типу повітря – повітря, що забезпечить оптимальний розподіл припливного повітря відповідно до потреб окремих приміщень. Також пропонується використання теплових насосів типу повітря-вода (в т. ч. в складі чілера) для забезпечення роботи радіаторної системи опалення, якщо зовнішня температура буде вище 0°C.

Таблиця 5 – Результати техніко-економічного розрахунку для заходу «Встановлення теплових насосів»

Найменування	Од.вим.	Величина
Розрахункова потужність теплового насосу	кВт	69
Сезонний коефіцієнт перетворення	-	3
Розрахункова річна кількість виробленої теплової енергії	Гкал	252
Економія коштів за рахунок заміщення споживання теплоенергії	грн	428400
Орієнтовна вартість реалізації	грн	2246000
Окупність (з урахуванням додаткових витрат електроенергії)	років	9

## 4. Використання електроенергії по нічному тарифу для обігріву приміщень.

Пропонується використання електродкотла зі встановленням накопичувача теплової енергії (акумулятора теплової енергії), підігрів води для якої здійснювати за зниженим (нічним) тарифом. При визначенні потужності котла та обсягу виробництва теплової енергії враховувалися обмеження по періоду дії нічного тарифу та наявній електричній потужності. Відповідний розрахунок економічної ефективності заходу надано в табл. 6.

Таблиця 6 – Результати техніко-економічного розрахунку для заходу «Електрообігрів»

Найменування	Од.вим.	Величина
Економія теплової енергії	Гкал	252

Продовження таблиці 6

Економія коштів за рахунок зменшення споживання тепла	грн	177000
Орієнтовна вартість реалізації	грн	755000
Окупність	років	4,27

## 5. Заміна вікон та зменшення площі застління

Пропонується заміна застарілих вікон з приведеним опором теплопередачі  $R=0,5$  ( $\text{m}^2\cdot\text{K}$ )/Вт на склопакети, теплотехнічні властивості яких відповідають сучасним вимогам по теплозахисту огорожень [1]. Одночасно з виконанням робіт по заміні склопакетів необхідно провести роботи по утепленню та герметизації відкосів, а також по регулюванню фурнітури. Також пропонується здійснити зменшення площі застління шляхом улаштування додаткових простіноків площею  $348 \text{ m}^2$  з нанесенням теплоізоляційного матеріалу (мінеральна вата товщиною 10 см).

Розрахунок економії надано в таблиці 7.

Таблиця 7 – Результати техніко-економічного розрахунку для заходу «Заміна вікон»

Найменування	Од.вим.	Величина
Економія теплової енергії	Гкал	201
Економія коштів за рахунок зменшення споживання тепла	грн	341700
Орієнтовна вартість реалізації	грн	6549000
Окупність	років	19

## 6. Утеплення зовнішніх стін

Існуючий опір теплопередачі стін  $R=0,8$  ( $\text{m}^2\cdot\text{K}$ )/Вт не відповідає сучасним вимогам по тепловому захисту [1]. Пропонується виконати утеплення мінераловатними плитами товщиною 150 мм з нанесенням захисного декоративного шару. Загальна площа стін, що потребують утеплення -  $7000 \text{ m}^2$ , вартість виконання утеплення з урахуванням монтажних та оздоблювальних робіт  $1300 \text{ грн}/\text{m}^2$ . Річна економія заходу надана в табл. 8.

Таблиця 8 – Результати техніко-економічного розрахунку для заходу «Утеплення стін»

Найменування	Од.вим.	Величина
Економія теплової енергії	Гкал	435,8
Економія коштів за рахунок зменшення споживання тепла	грн	740860
Орієнтовна вартість реалізації	грн	9100000
Окупність	років	12,3

## 7. Заміна ламп

Існуючий рівень розвитку світлодіодних світильників дозволяє значно знизити споживання електроенергії на освітлення та збільшити термін їх служби. Крім того, існує проблема утилізації люмінесцентних ламп, які відпрацювали свій ресурс, тому пропонується їх заміна на світлодіодні. Розрахунок потужності та кількості світильників відбувався з урахуванням забезпечення нормативного рівня освітленості у робочих зонах приміщень. Розрахунок окупності заходу надано в таблиці 9.

Таблиця 9 – Результати техніко-економічного розрахунку для заходу «Заміна ламп»

Загальна вартість заміни, грн з ПДВ	3 071 550
Тариф на електроенергію, грн/кВт з ПДВ	2,36
Різниця в потужностей, кВт	81,517
Графік роботи освітлення на рік, годин/днів	6/251
Економія електроенергії, кВт-год	122764
Сума економії на рік, грн	289720
Термін окупності, років	10,6

8. Система вентиляції з рекуперацією

Для покращення комфортних умов та забезпечення підігріву припливного повітря на 1 та 2 поверхах корпусу пропонується встановити вентиляційну установку з рекуперацією (табл.10).

*Таблиця 10 – Результати техніко-економічного розрахунку для заходу «Система вентиляції з рекуперацією»*

Кількість теплової енергії, що необхідна для нагріву припливного повітря	
- існуючий стан, Гкал	558
- з рекуперацією, Гкал	112
Економія теплової енергії, Гкал	446
Економія коштів на оплату за теплову енергію, грн	758200
Орієнтовна вартість реалізації ( з використанням існуючих повітропроводів), грн	6500000
Окупність, років	6,5

Для підвищення ефективності впровадження заходів та забезпечення ефективного контролю за енергоспоживанням та параметрами мікроклімату рекомендовано впровадити систему автоматизованого енергомоніторингу, що включатиме створення автоматизованого робочого місця енергоменеджера. Даний програмний комплекс може виступати одночасно дослідним майданчиком для проведення науково-дослідних робіт та впровадження інноваційних проєктів щодо моніторингу та управління енергоспоживанням на прикладі об'єктів студмістечка з метою підвищення рівня енергоефективності та якості освіти.

**Висновки**

Проведено комплексне енергетичне обстеження навчально-адміністративного корпусу КНУТД з аналізом енергоспоживання об'єкта, описом методів визначення базового рівня та економічним обґрунтуванням енергозберігаючих заходів, що покращать теплозахисні властивості огорожень та дозволять забезпечити на нормативному рівні параметри мікроклімату в приміщеннях. Об'єкт дослідження має типові проблеми будівель масової забудови, тому описані економічно доцільні енергоефективні заходи можна поширювати на інші будівлі закладів освіти.

Наступним етапом роботи планується виконання енергообстежень на усіх будівлях закладу, виконання енергетичної сертифікації відповідно до вимог Директиви ЄС [6] та ЗУ «Про енергоефективність будівель»; а також більш детальне вивчення питання створення автоматизованого комплексу програмного та технічного забезпечення для дистанційного обліку споживання енергоресурсів, моніторингу та аналізу даних для запобігання аварійних ситуацій. Впровадження даного комплексу дозволить створити середовище для комфортних умов навчання та виконання досліджень. Для реалізації даного проєкту доцільно залучити науковий потенціал університету, студентів та спеціалізовані організації.

**Список використаної літератури**

1. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. К.: Мінбуд України, 2017. 37 с.
2. Управління ефективністю енерговикористання у вищих навчальних закладах: монографія / І.Ю.Білоус, В.І.Дешко, І.О.Суходуб, Шевченко О.М., Шовкалюк М.М. – К.: Політехніка, 2015. – 188 с.
3. Управління енергоспоживанням: промисловість і соціальна сфера: монографія / під заг. редакцією О. М. Теліженка та М. І. Сотника. – Суми : видавництво «Мрія – 1», 2018.-336 с.
4. Шевченко О.М. Енергоефективний кампус КПП: інструменти та методи досліджень / Шевченко О.М., Шовкалюк М.М. // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. – 2019. № 4 (136). – С. 97–105.
5. Євтухов В.Я. Інформаційна та мотиваційна складові системи енергетичного менеджменту об'єктів галузі освіти / Євтухов В.Я., Дешко В.І., Шовкалюк М.М., Шевченко О.М. // Новини енергетики. – 2018. – №5. – с.10-23.
6. Directive 2010/31/eu of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) // Official Journal of the European Communities. 2010, L153. – p. 13-35.
7. V.I. Deshko, O.M. Shevchenko (2013). University campuses energy performance estimation in Ukraine based on measurable approach, Energy and Buildings, (49) 582–335.
8. Шовкалюк М.М., Леконцева О.Е. Розвиток програм стимулювання підвищення енергоефективності будівель в Україні / Збірник наук. праць V Міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. у м. Києві 17-12.04.2018р., с.116-117.



9. Efficiency of using energy in housing sector, under the general editorship of Pavlenko A.M. Politechnika Świętokrzyska. Kielce, 2020, Pp. 155.

10. Шевченко О.М. Розробка інвестиційних проєктів підвищення енергоефективності студмістечка КПІ та інтеграція у освітній процес / Шевченко О.М., Шовкалюк М.М. // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. – 2020. № 3 (146).

11. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні [Уведений вперше; чинний від 2015.01.01]. К. Мінрегіонбуд України, 2016. 205 с.

**УДК 378:621.311.1:658**

**И.В. Панасюк**, д-р техн. наук, проф., **ORCID 0000-0001-6671-4266**  
**Київський національний університет технологій та дизайну**  
**О.И. Ещенко**, канд. техн. наук, доцент, **ORCID 0000-0003-3915-486X**  
**М.М. Шовкалюк**, канд. техн. наук, доцент, **ORCID 0000-0002-1898-3493**  
**Национальный технический университет Украины**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського»**

## **ТЕРМОМОДЕРНИЗАЦИЯ ЗДАНИЙ УЧРЕЖДЕНИЙ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ – ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ**

Расходы на содержание зданий бюджетных учреждений в Украине в 2-3 раза выше, чем подобные расходы в странах Европейского Союза, причем по ряду причин, связанных с устаревшим состоянием наружных ограждений и инженерных сетей, санитарно-гигиенические требования в помещениях не соблюдаются. В работе рассмотрены результаты энергетического обследования учебно-административного корпуса КНУТД с целью определения путей снижения затрат на энергообеспечение и улучшения микроклимата в здании. Проанализированы энергетическое состояние корпуса, структура затрат энергоресурсов. С целью разработки комплекса мероприятий по энергосбережению проведены измерения фактических энергетических затрат для определения базового уровня при выполнении технико-экономических расчетов. Энергоаудит проведен с применением инструментальных методов и с фотофиксацией визуального обследования. Уточнены геометрические, теплотехнические и энергетические характеристики здания. Для повышения уровня энергоэффективности здания предложена комплексная термомодернизация, которая включает работы по увеличению термического сопротивления наружных ограждающих конструкций и модернизацию инженерных систем, выполнено финансово-экономическое обоснование эффективности предложенных энергоэффективных мероприятий.

**Ключевые слова:** высшее учебное заведение, энергоаудит, энергоэффективность, энергопотребление, термомодернизация, срок окупаемости.

**I. Panasiuk**, Dr. Sc. Sciences., Prof., **ORCID 0000-0001-6671-4266**  
**Kyiv National University of Technologies and Design**  
**O. Yeshchenko**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID 0000-0003-3915-486X**  
**M. Shovkaliuk**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID 0000-0003-4099-2772**  
**National Technical University of Ukraine**  
**“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

## **THERMOMODERNIZATION OF BUILDINGS OF HIGHER INSTITUTIONS EDUCATION - PROBLEMS AND SOLUTIONS**

The costs of maintaining budget buildings in Ukraine are 2-3 times higher than similar costs in the European Union, and for a number of reasons related to the outdated condition of external fences and utilities, sanitary and hygienic requirements in the premises are not met. The paper considers the results of the energy audit of the educational and administrative building of KNUITD in order to identify ways to reduce energy costs and improve the microclimate in the building. The energy condition of the building, the structure of energy costs are analyzed. In order to develop a set of energy saving measures, measurements of actual energy costs were made to determine the baseline level during technical and economic calculations. Energy audit was conducted using instrumental methods and with photo-fixation of visual inspection. The geometric, thermal and energy characteristics of the building have been specified. To increase the level of energy efficiency of the building, a complex thermal modernization is

proposed, which includes work to increase the thermal resistance of external enclosing structures and modernization of engineering systems, financial and economic justification of the effectiveness of the proposed energy efficiency measures.

Insufficient funding of budget institutions requires a systematic approach to solving the problem of improving the energy efficiency of student campuses, which will include not only the implementation of technical measures, but also information campaigns and organizational and management actions of the Energy Management Service and university management. An effectively functioning system of energy management of educational institutions is the foundation for sustainable development of the state; it is a set of measures that can have a significant effect on reducing Ukraine's energy dependence.

**Keywords:** higher education institution, energy audit, energy efficiency, energy consumption, thermal modernization, payback period.

#### REFERENCES

1. DBN V.2.6-31:2006. Konstruktsii budynkiv ta sporud. Teplova izoliatsiia budivel [Na zaminu SNyP II-3-79; chynnyi vid 2007.04.01]. K.: Minbud Ukrainy, 2006. p. 64.
2. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O., Shevchenko O.M., Shovkaliuk M.M. (2015) Upravlinnia efektyvnistiu enerhovykorystannia u vyshchikh navchalnykh zakladakh: monohrafiia. [Energy efficiency management in higher education institutions: monograph]. Kyiv: Politehnika, 188 p.
3. Upravlinnya energospozhyvanniam: promyslovist i socialna sfera: monografiya [Energy consumption management: industry and social sphere: monograph] / under the general edited by O.M. Telizhenko and M.I. Sotnyk – Sumy: "Dream - 1", 2018. – 336 p.
4. Shevchenko O.M., Shovkaliuk M.M. (2019). Enerhoefektyvnyi kampus KPI: instrumenty ta metody doslidzhen [KPI energy efficient campus: tools and research methods]. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Seriya Tekhnichni nauky – Bulletin of Kyiv National University of Technology and Design. Technical Sciences Series, 4 (136), Pp. 97–105.
5. Yevtukhov V.Ya., Deshko V.I., Shovkalyuk M.M., Shevchenko O.M. (2018). Informatsiina ta motyvatsiina skladovi systemy enerhetychnoho menedzhmentu ob'ektiv haluzi osvity [Information and motivational components of the energy management system of objects of education]. Novyny enerhetyky – Energy News, 5, 10–23 [in Ukraine].
6. Directive 2010/31/eu of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) // Official Journal of the European Communities. 2010, L153. – p. 13-35.
7. V.I. Deshko, O.M. Shevchenko (2013). University campuses energy performance estimation in Ukraine based on measurable approach, Energy and Buildings, (49). pp. 582–335.
8. Shovkaliuk M.M., Liekontseva O.E. Rozvytok proqram stymuliuвання pidvyshchennia enerhoefektyvnosti budivel v Ukraini / Zbirnyk nauk. pratsV Mizhnar. nauk.-tekhn. ta navch.-metod. konf. u m. Kyievi 17-12.04.2018r., p.116-117.
9. Efficiency of using energy in housing sector, under the general editorship of Pavlenko A.M. Politehnika Świętokrzyska. Kielce, 2020, Pp. 155.
10. Shevchenko O.M., Shovkaliuk M.M. (2020) Development of investment projects to increase energy efficiency of KPI studio town and integration into the educational process [Rozrobka investytsiynyx proektiv pidvyshchennia energoefektyvnosti studmistechnka KPI ta integraciya u osvithnij proces]. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Seriya Tekhnichni nauky – Bulletin of Kyiv National University of Technology and Design. Technical Sciences Series, 3 (146), 2020.
11. DSTU B A.2.2-12:2015. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osvithlenni ta hariachomu vodopostachanni [Uvedenyi vpershe; chynnyi vid 2015.01.01]. K. Minrehionbud Ukrainy, 2016. 205 s.

Надійшла 29.05.2020  
Received 29.05.2020

М.К. Безродний, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-0788-5011  
Т.О. Місюра, магістр, асп., ORCID 0000-0002-2733-5308  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИСОКОЕФЕКТИВНА ТЕПЛОНАСОСНА СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ ВИРОБНИЧОГО ПРИМІЩЕННЯ З РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ ВЕНТИЛЯЦІЙНОГО ПОВІТРЯ

*Метою роботи був термодинамічний аналіз теоретичної моделі теплонасосної установки вентиляції та кондиціонування повітря з рециркуляцією холоду в залежності від параметрів зовнішнього повітря для підтримання температурних і вологісних умов у виробничому приміщенні в теплий період року. За допомогою чисельного аналізу методом послідовних наближень визначено параметри повітря в вузлових точках схеми та оцінена її енергетична ефективність. Це дало встановити режими роботи установки в залежності від параметрів зовнішнього повітря, характеристик вагомості рециркуляції холоду для забезпечення високої ефективності роботи схеми. Досліджена система може бути придатною для застосування в країнах з помірним континентальним і вологим тропічним кліматом в усьому діапазоні температур навколишнього середовища, коли об'єктом вентиляції виступає виробниче приміщення з невисокою кратністю повітрообміну.*

**Ключові слова:** теплонасосно-рекуператорна схема, повітряний тепловий насос, вентиляція та кондиціонування, холодильний коефіцієнт, рециркуляція, помірний континентальний клімат.

### Вступ

У 2015 році в Парижі Рамкова конвенція ООН про зміну клімату домовилася знизити підвищення середньорічної глобальної температури на 2 °С відносно доіндустріальних часів з метою зменшення ризиків зміни клімату. Як наслідок, Європейський Союз встановив мету до 2050 р. скоротити викиди CO<sub>2</sub> на 80 % [1]. Крім того, окремі цілі були встановлені для різних секторів, що споживають енергію. Так, метою будівельного сектору є скорочення викидів на 90 %, що також включає суцільну декарбонізацію цього сектору. З цією метою пропонується використання відновлюваних джерел енергії та електроенергії замість викопного палива для цілей теплопостачання та генерації холоду, на що у розвинутих країнах витрачається половина енергії, що споживається в будівлях, та п'ята частина загального національного споживання енергії [2]. ЄС також встановив проміжну загальну мету на 2030 рік – зменшення викидів CO<sub>2</sub> на 40 % із часткою залучення відновлюваних джерел енергії щонайменше 32 %.

На сьогодні використання систем з тепловими насосами (ТН) продовжує зростати, оскільки це високоефективні технології, що пропонують можливість забезпечення вентиляції та кондиціонування в будівлях, зменшуючи споживання первинної енергії по відношенню до традиційних систем [3]. Повітряні ТН для цілей кондиціонування широко використовуються в житлових, комерційних та виробничих приміщеннях, забезпечуючи заданий тепловий та вологісний режим за високої енергоефективності. Видалення зайвої вологи з таких приміщень відбувається шляхом вентиляції з відпрацьованим вентиляційним повітрям, а підтримання заданих температури і вологості повітря всередині приміщення може досягатись за рахунок попередньої підготовки припливного повітря в теплонасосній установці (ТНУ) [4]. В останні роки через масштабне введення в роботу таких систем споживання ними електроенергії протягом року почало зростати [5]. Таким чином, покращення продуктивності ТНУ має велике значення для економії енергії.

У роботі [6] було виконано термодинамічний аналіз ТНУ вентиляції та кондиціонування повітря виробничого приміщення у теплий період року, метою якого були визначення параметрів повітря в вузлових точках схеми, оцінка енергетичної ефективності та встановлення режимів роботи ТНУ в залежності від параметрів зовнішнього повітря та характеристик об'єктів вентиляції та кондиціонування.

Попередня схема забезпечувала потреби у вентиляції та кондиціонуванні повітря шляхом змінного надходження свіжого повітря. Аналіз схеми показав, що за постійної температури навколишнього середовища  $t_0$  потреба у свіжому повітрі зростає зі збільшенням його відносної вологості  $\phi_0$  та величини  $K$ , яка використовується для розрахунку необхідного переохолодження припливного повітря на вході до приміщення для компенсації теплових надходжень. Таке зростання призводить до збільшення температури відпрацьованого повітря після конденсатора ТН  $t_{\text{відх}}$ . У результаті для задоволення потреб необхідна більша

частка свіжого повітря за вищої відносної вологості  $\phi_0$ . Дана обставина погіршує температурні умови нормальної роботи ТН, оскільки температури повітря після конденсатора досягають критичних значень за низьких температур навколишнього середовища  $t_0$ .

Запропонована в даній роботі схема має високу ефективність за більших значень відносної вологості  $\phi_0$  та температури  $t_0$  навколишнього середовища за рахунок високого коефіцієнта рециркуляції вентиляційного повітря  $K_p = 0,8$ . Підвищення ефективності відбувається тому, що через випарник ТН надходить більша частка повітря з приміщення в суміші зі свіжим повітрям. У цьому випадку параметри цієї суміші будуть близькими до параметрів саме відпрацьованого повітря в широкому діапазоні зміни параметрів навколишнього середовища.

Це означає, що тепловий потік випарника ТН теж буде змінюватись не суттєво. Через це можна реалізувати роботу схеми таким чином, щоб вологовміст повітря на виході з випарника був постійним і рівним необхідному вологовмісту повітря на вході до приміщення  $d_1$ . Тоді це повітря достатньо буде підігріти до заданої температури  $t_1$  у поверхневому теплообміннику, наприклад, рекуператорі, використовуючи повітря після конденсатора ТН в якості гарячого теплоносія.

Результатом даної роботи є визначені енергетична ефективність та параметри повітря у вузлових точках нової ТНУ в теплий період року. Для проведення розрахунків було використано попередньо розроблену в роботі [6] методику визначення необхідного переохолодження припливного повітря для компенсації внутрішніх тепловиділень і надходжень теплоти через зовнішні огороження приміщення (коефіцієнт  $K$ ).

#### Мета та завдання

Метою статті є аналіз енергоефективності підтримання теплового та вологісного режиму у виробничому приміщенні в теплий період року за рахунок ТНУ вентиляції та кондиціювання повітря з максимально допустимим коефіцієнтом рециркуляції в залежності від параметрів зовнішнього повітря.

#### Опис теплонасосної системи вентиляції та кондиціювання повітря та робочого процесу зміни стану вентиляційного повітря

На рис. 1 зображена принципова схема вентиляції та кондиціювання з рециркуляцією відпрацьованого повітря та зі змінною часткою свіжого зовнішнього повітря. Принцип роботи схеми: два потоки свіжого зовнішнього повітря з температурою  $t_0$ , вологовмістом  $d_0$  і масовими витратами  $G_p$  та  $G_0$  поступають до першої та другої камер змішування відповідно, де змішуються з двома потоками відпрацьованого повітря з приміщення за температури  $t_2$ , вологовмісту  $d_2$  і з масовими витратами  $G_0$  та  $G_p$  відповідно. Таким чином, на виході з камер змішувань отримуються суміші повітря з однаковими масовими витратами, які рівні необхідній витраті повітря для задоволення потреб вентиляції  $G_{зар}$ . Суміш повітря після першої камери змішування (КЗ1) за температури  $t_{c1}$  і вологовмісту  $d_{c1}$  надходить до конденсатора ТН, де нагрівається і на виході має температуру  $t_k$  за постійного вологовмісту. Суміш повітря після другої камери змішування (КЗ2) за температури  $t_{c2}$  і вологовмісту  $d_{c2}$  надходить до випарника ТН, де охолоджується з частковою конденсацією водяної пари до температури  $t_b$  та заданого технологічними умовами вологовмісту  $d_1$ . Обидва потоки спрямовуються до рекуператора, у якому відбувається нагрівання потоку повітря після випарника до заданої температури  $t_1$  за рахунок теплоти повітря, нагрітого в конденсаторі ТН. Процес теплообміну проходить за постійних вологовмістів обох повітряних потоків. Нагріта суміш повітря ( $t_1$ ,  $d_1$ ,  $G_{зар}$ ) після рекуператора спрямовується до виробничого приміщення для цілей вентиляції та кондиціювання (для компенсації надходжень теплоти через огороження та внутрішніх тепло- і вологовиділень).

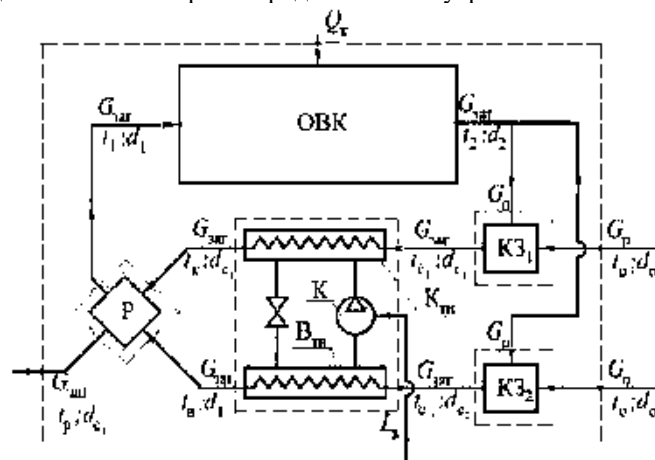


Рис. 1. Принципова ТНУ вентиляції та кондиціювання повітря в приміщенні:  $K_{тн}$  – конденсатор ТН;  $B_{тн}$  – випарник ТН;  $K$  – компресор;  $KЗ_1$  – перша камера змішування;  $KЗ_2$  – друга камера змішування;  $P$  – рекуператор;  $OBK$  – об’єкт вентиляції та кондиціювання повітря

На рис. 2 зображено робочий процес зміни стану повітря в системі вентиляції та кондиціонування приміщення в  $h-d$  діаграмі. Точка  $O$  побудована за параметрами навколишнього середовища ( $t_0, h_0$ ) [7]. Точка 2 побудована згідно з необхідними температурою  $t_2$  і відносною вологістю  $\varphi_2$  повітря всередині виробничого приміщення, визначається згідно з [8] в залежності від технологічного призначення приміщення. За  $h-d$  діаграмою визначається  $h_2$ . Згідно з будівельними нормами [8] для даного приміщення приймається величина перегріву припливного повітря  $\Delta t_{\text{вент}}$  і на лінії  $h_2 = \text{const}$  за  $t_1' = t_2 + \Delta t_{\text{вент}}$  знаходиться точка  $1'$ , яка відповідає стану припливного повітря за умов вентиляції. Перехід  $1'-1$  зображує додаткове переохолодження повітря для задоволення потреб кондиціонування. Температура повітря в точці  $1$  на лінії  $d_1' = \text{const}$  може бути прийнята, виходячи з умов пропорційності різниці температур, що відповідає переохолодженню повітря на вході в приміщення, і перепаду температур ззовні і всередині приміщення, тобто  $\Delta t = t_1' - t_1 = K(t_0 - t_2)$ , де  $K$  – коефіцієнт пропорційності, значення якого залежить від зовнішніх та внутрішніх надходжень теплоти. Опис методики розрахунку даного коефіцієнта викладено у роботі [6]. Відпрацьоване повітря з параметрами в точці 2 розділяється на два потоки та змішується з двома потоками свіжого зовнішнього повітря з параметрами в точці  $O$  у двох камерах змішування (точки  $c_1$  і  $c_2$ ). Один потік повітряної суміші підігрівается в конденсаторі ТН до температури  $t_k$  за сталого вологовмісту  $d_{c_1}$  (точка  $k$ ), а інший потік охолоджується у випарнику ТН з частковою конденсацією водяної пари (точка  $B$ ). Охолоджений потік повітря нагрівається у рекуператорі за сталого заданого вологовмісту  $d_1$  до температури  $t_1$  за рахунок гарячого потоку повітря після конденсатора. Підігріта суміш повітря направляется в приміщення для задоволення потреб вентиляції та кондиціонування. Процес  $1-2$  відповідає робочому процесу зміни стану повітря всередині приміщення.

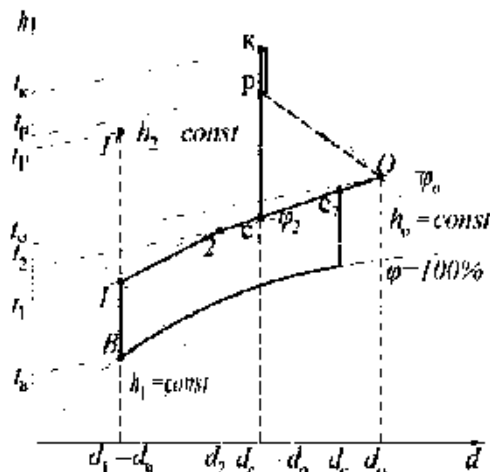


Рис. 2. Робочий процес зміни стану повітря в системі вентиляції та кондиціонування приміщення в  $h-d$  діаграмі

### Визначення температури припливного повітря на вході в приміщення

За методикою, що описана в роботі [6], співвідношення переохолодження припливного повітря для задоволення потреб кондиціонування і перепаду температур ззовні і всередині приміщення, можна записати

$$\Delta t = t_1' - t_1 = K(t_0 - t_2), \quad (1)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності, значення якого залежить від зовнішніх та внутрішніх надходжень теплоти.

У свою чергу величина  $K$  визначається наступним чином

$$K = K_1 + K_2, \quad (2)$$

$$K_1 = \frac{3600 \bar{K} F}{\rho_{\text{п}} c_{\text{р}} K_{\text{п.об}} V_{\text{прим}}}, \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{Q_{\text{вн}}}{G_{\text{зар}} c_{\text{р}} (t_0 - t_2)}, \quad (4)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт, який залежить від геометричних і теплофізичних характеристик будівлі і кратності повітрообміну об'єкта кондиціонування;  $K_2$  – коефіцієнт, який залежить від внутрішніх тепловиділень;  $\bar{K}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С) – середній коефіцієнт теплопередачі огорожувальних конструкцій приміщення;  $F$ , м<sup>2</sup> – площа огорожувальних конструкцій, через які відбуваються надходження теплоти до приміщення;  $\rho_{\text{п}}$ , кг/м<sup>3</sup> –

густина повітря;  $c_p$ , кДж/(кг·°C) – питома теплоємність повітря;  $K_{п.об}$ , 1/год – коефіцієнт повітрообміну;  $V_{прим}$ , м<sup>3</sup> – об’єм приміщення;  $Q_{вн}$ , кВт – внутрішні тепловиділення.

Таким чином, коефіцієнт пропорційності  $K$  в рівнянні (1) може бути попередньо визначений через коефіцієнти  $K_1$  і  $K_2$ . Тим самим із рівняння (1) може бути визначена температура  $t_1$  припливного повітря на вході в приміщення.

### Термодинамічний аналіз ТНУ

Термодинамічний аналіз системи, що розглядається, виконується на основі попереднього визначення термодинамічного стану цієї системи за прийнятих вихідних параметрів повітря всередині приміщення та в залежності від зміни параметрів зовнішнього атмосферного повітря. У свою чергу стан даної системи вентиляції та кондиціонування повітря залежить від поки що невідомих параметрів повітря у її вузлових точках. Для даної системи невідомими параметрами є частки потоків відпрацьованого та свіжого зовнішнього повітря, що направляються до КЗ<sub>1</sub> та КЗ<sub>2</sub>, температури повітря після конденсатора ТН та рекуператора, а також величина холодильного коефіцієнта всієї схеми. Відповідні залежності для цих параметрів можуть бути визначені з рівнянь теплового та матеріального балансів як окремих елементів системи, так і системи в цілому.

За принципом роботи схеми повітря після випарника ТН підігрівається у рекуператорі до необхідної температури  $t_1$  за рівнянням (1). Цей процес протікає за постійного вологовмісту, який повинен відповідати заданому значенню  $d_1$ . Оскільки у випарнику охолодження повітря протікає за часткової конденсації водяної пари, температуру та ентальпію повітря на виході,  $t_b$  і  $h_b$ , можна визначити за допомогою  $h-d$  діаграми вологого повітря на лінії  $\phi = 100\%$  в точці її перетину з  $d_1$ .

Ентальпії сумішей повітря після КЗ<sub>1</sub> і КЗ<sub>2</sub> можна визначити з рівнянь енергетичного балансу для камер змішування, які відповідно мають вигляд

$$G_p h_0 + G_0 h_2 = G_{заг} h_{c1}, \quad (5)$$

$$G_p h_2 + G_0 h_0 = G_{заг} h_{c2}, \quad (6)$$

де  $G_0$ ,  $G_p$ ,  $G_{заг}$ , кг/с – масові витрати свіжого, відпрацьованого і загального потоків повітря;  $h_{c1}$ ,  $h_{c2}$ , кДж/кг<sub>с.п.</sub> – ентальпії повітряних сумішей після камер змішування.

Розділивши ліві та праві частини рівнянь (5) і (6) на величину  $G_{заг}$ , отримаємо рівняння для визначення ентальпій  $h_{c1}$  і  $h_{c2}$

$$h_{c1} = K_p h_0 + K_0 h_2, \quad (7)$$

$$h_{c2} = K_p h_2 + K_0 h_0, \quad (8)$$

де  $K_p$ ,  $K_0$  – частки рециркуляційного відпрацьованого та свіжого зовнішнього повітря на потреби вентиляції.

За принципом роботи схеми на виході з камер змішувань отримуються суміші повітря з однаковими масовими витратами, які рівні необхідній витраті повітря для задоволення потреб вентиляції  $G_{заг}$ . Тобто повинна виконуватись така умова

$$K_p + K_0 = 1. \quad (9)$$

Вологовмісти сумішей повітря після камер змішування  $d_{c1}$  і  $d_{c2}$  можна визначити із рівнянь матеріального балансу для камер змішування

$$G_p d_0 + G_0 d_2 = G_{заг} d_{c1}, \quad (10)$$

$$G_p d_2 + G_0 d_0 = G_{заг} d_{c2}. \quad (11)$$

Розділивши ліві та праві частини рівнянь (10) і (11) на величину  $G_{заг}$ , отримаємо рівняння для визначення вологовмістів

$$d_{c1} = K_p d_0 + K_0 d_2, \quad (12)$$

$$d_{c2} = K_p d_2 + K_0 d_0. \quad (13)$$

Для визначення ентальпії суміші повітря після конденсатора ТН,  $h_k$ , може бути використане рівняння енергетичного балансу ТН

$$Q_{конд} = Q_{вип} + L_k. \quad (14)$$

Складові рівняння (14) визначаються так:  
тепловий потік, відведений від конденсатора ТН

$$Q_{\text{конд}} = G_{\text{заг}}(h_{\text{к}} - h_{\text{с1}}); \quad (15)$$

тепловий потік, підведений до випарника ТН

$$Q_{\text{вип}} = G_{\text{заг}}(h_{\text{с2}} - h_{\text{в}}); \quad (16)$$

затрати зовнішньої електричної енергії на компресор ТН

$$L_{\text{к}} = Q_{\text{вип}} / \varepsilon_{\text{ТН}}, \quad (17)$$

де  $\varepsilon_{\text{ТН}}$  – холодильний коефіцієнт ТН.

Після деяких математичних перетворень вираз для визначення ентальпії  $h_{\text{к}}$  приймає вигляд

$$h_{\text{к}} = h_{\text{с1}} + (h_{\text{с2}} - h_{\text{в}}) \frac{\varepsilon_{\text{ТН}} + 1}{\varepsilon_{\text{ТН}}}. \quad (18)$$

Температура на виході з конденсатора ТН,  $t_{\text{к}}$ , може бути визначена за допомогою  $h$ - $d$  діаграми вологого повітря в точці перетину  $h_{\text{к}}$  з вологовмістом після КЗ<sub>1</sub>  $d_{\text{с1}}$ .

Ефективність роботи ТН, який в режимі кондиціонування працює як холодильна машина, можна в даному випадку оцінити величиною холодильного коефіцієнта ТН

$$\varepsilon_{\text{ТН}} = \frac{1}{\frac{273 + t_{\text{к}} + \Delta t_{\text{к}}}{273 + t_{\text{в}} - \Delta t_{\text{в}}} - 1}, \quad (19)$$

де  $t_{\text{в}}$  – температура суміші повітря на виході з випарника ТН, °С;  $t_{\text{к}}$  – температура суміші повітря на виході з конденсатора ТН, °С;  $\Delta t_{\text{в}}$  – температурний перепад між потоками повітря та холодильного агента на виході з випарника ТН, °С;  $\Delta t_{\text{к}}$  – температурний перепад між потоками холодильного агента і повітря на виході з конденсатора ТН, °С. У літературі наводяться числові значення температурних перепадів у конденсаторі і випарнику для ТН типу «повітря – повітря». Згідно з [9] для конденсатора і випарника ТН можна прийняти  $\Delta t_{\text{к}} = \Delta t_{\text{в}} = 10$  °С.

Ентальпію  $h_1$  з достатньою точністю можна визначити за наступною розрахунковою формулою для вологого повітря [7]

$$h_1 = 1,005t_1 + (2500 + 1,8t_1)d_1. \quad (20)$$

Ентальпія охолодженої суміші повітря на виході з рекуператора,  $h_{\text{р}}$ , визначається з рівняння енергобалансу рекуператора. З урахуванням того, що масові витрати повітряних сумішей після КЗ<sub>1</sub> і КЗ<sub>2</sub> однакові, рівняння має наступний вигляд

$$h_{\text{к}} + h_{\text{в}} = h_1 + h_{\text{р}}. \quad (21)$$

Таким чином, ентальпія  $h_{\text{р}}$  визначається як

$$h_{\text{р}} = h_{\text{к}} + h_{\text{в}} - h_1. \quad (22)$$

З іншого боку, ентальпію суміші повітря після КЗ<sub>2</sub> можна виразити з рівняння енергетичного балансу для всієї схеми, яке з урахуванням зовнішніх і внутрішніх надходжень теплоти,  $Q_{\text{к}}$ , має вигляд

$$L_{\text{к}} + G_0 h_0 + G_{\text{р}} h_0 + Q_{\text{к}} = G_{\text{заг}} h_{\text{р}}. \quad (23)$$

Розділивши ліву та праву частини рівняння (23) на величину  $G_{\text{заг}}$  та врахувавши рівняння (1) в  $Q_{\text{к}}$ , після ряду перетворень отримаємо

$$h_{\text{с2}} = \left[ h_{\text{р}} - h_0 - c_{\text{р}} K (t_0 - t_2) \right] \varepsilon_{\text{ТН}} + h_{\text{в}}. \quad (24)$$

Якщо параметри у вузлових точках системи визначено правильно, то числові значення ентальпії  $h_{\text{с2}}$ , отримані за допомогою рівнянь (8) та (24), мають бути рівними.

Холодильний коефіцієнт ТН, як і коефіцієнт трансформації теплоти, залежить тільки від умов роботи самого ТН, тобто від температурного рівня процесів теплообміну, що проходять у випарнику і конденсаторі ТН. Тому для характеристики ефективності роботи всієї ТНУ вентиляції та кондиціонування більш доцільно використати комплексний показник (холодильний коефіцієнт всієї схеми), який можна представити наступним чином

$$\varepsilon_{\text{сх}} = \frac{Q_{\text{хол}}}{L_{\text{к}}}, \quad (25)$$

де  $Q_{\text{хол}}$ , кВт – холодильна потужність, що виробляється на вході у виробниче приміщення. Вона визначається як

$$Q_{\text{хол}} = G_{\text{заг}}(h_0 - h_1). \quad (26)$$

З урахуванням рівнянь (16) і (17) вираз (25) можна записати наступним чином

$$\varepsilon_{\text{СХ}} = \varepsilon_{\text{ТН}} \frac{h_0 - h_1}{h_{\text{С2}} - h_{\text{В}}} \quad (27)$$

### Розрахунковий аналіз вентиляції і кондиціонування повітря

Розрахунковий аналіз параметрів ТНУ вентиляції та кондиціонування повітря виконано для типового виробничого приміщення з вологовиділенням. Як прототип був обраний виробничий цех кондитерської фабрики «Рошен» в Київській області [10]. Для забезпечення комфортних умов роботи в приміщенні цеху були встановлені наступні параметри внутрішнього повітря [8]: температура в приміщенні  $t_2 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ; відносна вологість повітря в приміщенні  $\varphi_2 = 50 \%$ ; перегрів припливного повітря для системи вентиляції  $\Delta t_{\text{вент}} = 3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

За заданих умов було визначено вологовміст повітря на вході і виході з приміщення, тобто в точках 1 і 2 діаграми робочого процесу на рис. 2:  $d_1 = 5,3 \text{ г/кг}_{\text{с.п.}}$  і  $d_2 = 6,5 \text{ г/кг}_{\text{с.п.}}$ .

Чисельний аналіз із використанням співвідношень (7), (8), (12), (13), (18), (19), (22), (24) і (27) методом послідовних наближень дає змогу оцінити вплив зміни температури та відносної вологості навколишнього середовища, характеристики об'єкту вентиляції та кондиціонування як на параметри системи (температура повітря на виході з конденсатора ТН і рекуператора (рис. 3, 5), холодильний коефіцієнт ТН (рис.3, 6)), так і на термодинамічну ефективність застосування даної системи вентиляції та кондиціонування (рис. 3, 6).

При виборі величини  $K$  врахована така обставина. За наведеною у роботі [6] методикою для обраного виробничого приміщення встановлено, що  $K = 0,23$  (відношення надходжень теплоти до приміщення до теплоти на вентиляцію). Отримане значення відповідає дійсності, оскільки для будівель виробничого та громадського призначень витрати теплоти на вентиляцію можуть у декілька раз перевищувати відповідні теплові притоки [11]. У зв'язку з цим в наведеному нижче аналізі взято наступні значення коефіцієнта  $K = 0,1; 0,3; 0,5$ .

На рис. 3, а-б наведено графічні залежності температур повітряних потоків на виході з конденсатора  $t_k$  і випарника  $t_b$  ТН та рекуператора  $t_p$  (рис. 3, а), а також залежності холодильних коефіцієнтів ТН  $\varepsilon_{\text{ТН}}$  та ТНУ  $\varepsilon_{\text{СХ}}$  вентиляції та кондиціонування (рис. 3, б) від температури  $t_0$  та відносної вологості ( $\varphi_0 = 50 \%$ ) навколишнього середовища, коефіцієнта  $K = 0,3$  і значень коефіцієнта рециркуляції  $K_p = 0 - 0,8$  ( $t_{\text{вдх}}$ ,  $t_{\text{в}}$ ,  $\varepsilon_{\text{ТН}}$ ,  $\varepsilon_{\text{СХ}} = f(t_0, \varphi_0 = 50 \%, K = 0,3)$ ). Криві 1 та 6 на обох рисунках відповідають випадку, коли рециркуляція відсутня, тобто  $K_p = 0$ .

Температури  $t_k$  обмежуються критичним значенням температури, за якої можлива нормальна робота конденсатора ТН  $t_k = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Видно, що умови використання даної схеми покращуються зі збільшенням рециркуляції відпрацьованого повітря. Так, за  $K_p = 0,8$  схема здатна працювати до  $t_0 = 38 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура охолодженого в рекуператорі повітря  $t_p$  підвищуються з ростом  $t_0$ , оскільки знижується  $t_1$ , тобто потреба в більш холодному повітрі. Температури  $t_b$  не залежать від  $t_0$  та  $K_p$  згідно з прийнятим робочим процесом ТНУ і становлять в середньому  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ .

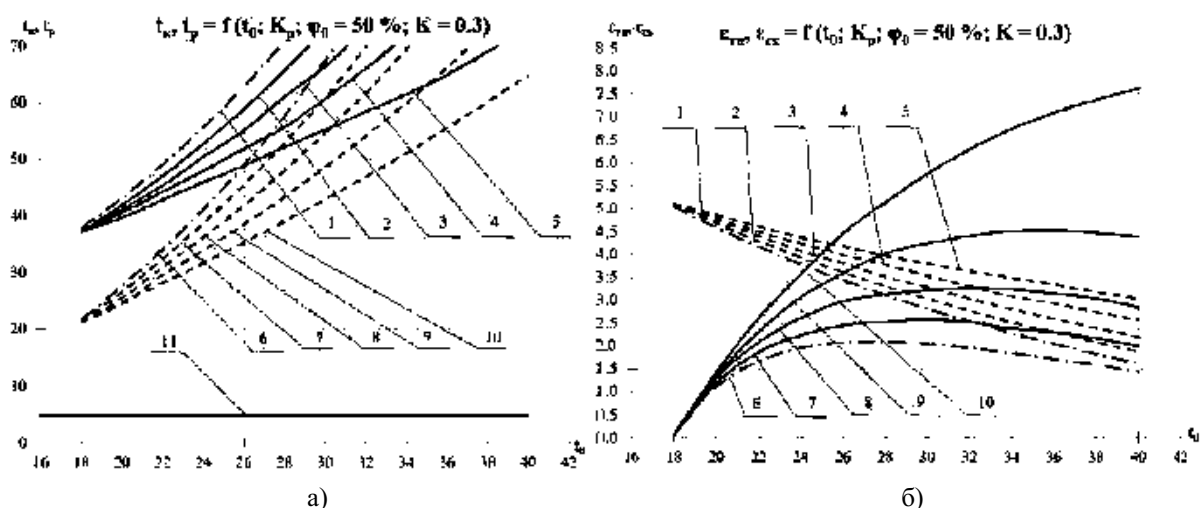


Рис. 3. Залежності температур повітряних потоків на виході з конденсатора та випарника ТН і рекуператора (а), залежності холодильних коефіцієнтів ТН та схеми в цілому (б) від температури, відносної вологості ( $\varphi_0 = 50 \%$ ) навколишнього середовища, величини  $K = 0,3$  і коефіцієнта рециркуляції  $K_p$ : а) 1-5 ( $t_k$ ); 6-10 ( $t_p$ ); 11 ( $t_b$ ) –  $K_p = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ ; б) 1-5 ( $\varepsilon_{\text{ТН}}$ ); 6-10 ( $\varepsilon_{\text{СХ}}$ ) –  $K_p = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$



З рис. 3, б видно, що енергоефективність даної ТНУ зростає зі збільшенням  $t_0$  і  $K_p$ . За зниження рециркуляції  $K_p$  температури  $t_0$ , при яких ефективність максимальна, також знижуються. Потім ефективність поступово знижується з ростом  $t_0$ . Проте за  $K_p = 0,8$  ефективність при  $t_0 = 40$  °С все ще зростає. Це свідчить про те, що дана модель ТНУ може бути придатною для застосування в країнах з помірним сухим континентальним кліматом в усьому діапазоні температур навколишнього середовища, коли об'єктом вентиляції виступає виробниче приміщення з невисокою кратністю повітрообміну. Але це також означає те, що для підтримання кратності повітрообміну  $K_{п.о} = 1$  год<sup>-1</sup> необхідно збільшити загальну витрату повітря в 5 разів (див. рис. 4). Ефективність ТН  $\epsilon_{тн}$  при цьому за найгірших умов ( $t_0 = 40$  °С;  $K_p = 0,2$ ) становить 2 од.

Прийняту умову (9) формування загального потоку повітря на вентиляцію можна записати у вигляді

$$\frac{G_p}{G_{заг}} + \frac{G_0}{G_{заг}} = 1, \quad (28)$$

звідки можна отримати

$$\frac{G_{заг}}{G_0} = \frac{1}{1 - K_p}. \quad (29)$$

Дана залежність описує, як змінюються загальні витрати повітря на вентиляцію приміщення  $G_{заг}$  від коефіцієнта рециркуляції  $K_p$ . На рис. 4 ця залежність представлена графічно. Видно, що підвищення рециркуляції до 80 % досить слабо впливає на відносну загальну витрату повітря, після чого має місце стрімке зростання величини  $G_{заг} / G_0$ . У зв'язку з цим подальший аналіз ефективності схеми виконано при максимально доцільному значенні коефіцієнта рециркуляції  $K_p = 0,8$ .

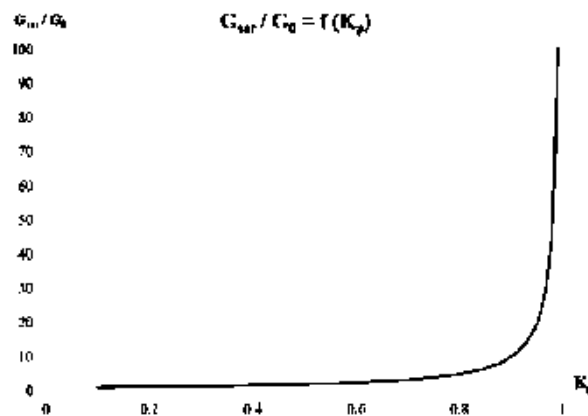


Рис. 4. Залежність загальних витрат повітря на вентиляцію приміщення  $G_{заг}$  від коефіцієнта рециркуляції  $K_p$

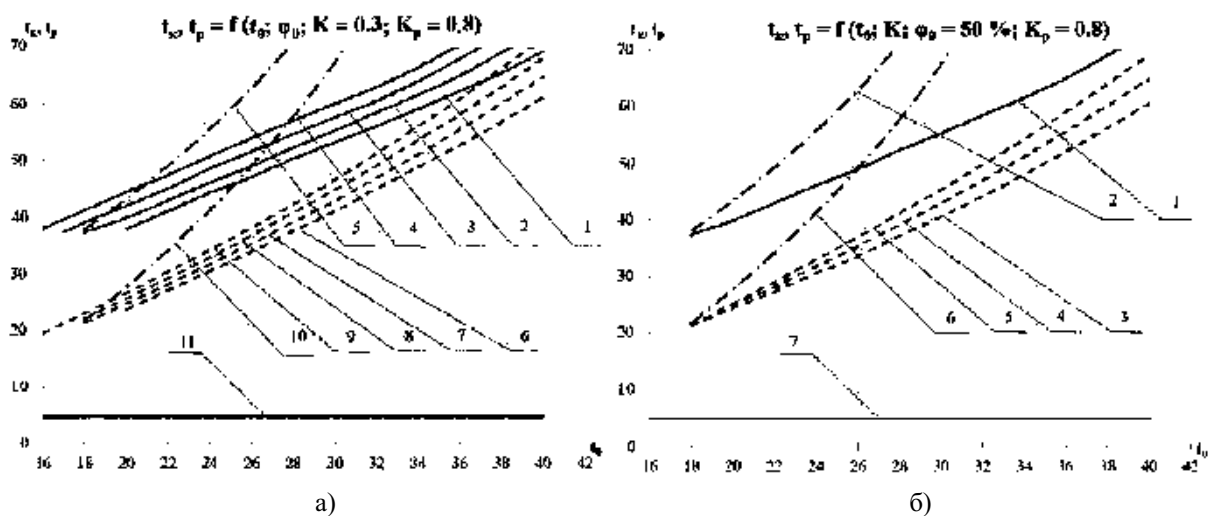


Рис. 5. Залежності температур повітряних потоків на виході з конденсатора та випарника ТН і рекуператора від температури та відносної вологості навколишнього середовища, величини  $K$  і коефіцієнта рециркуляції  $K_p = 0,8$ : а)  $K = 0,3$ : 1-4 ( $t_k$ ), 6-9 ( $t_p$ ), 11 ( $t_b$ ) –  $\phi_0 = 40$  %; 50 %; 60 %; 70 %; 5 ( $t_k$ ), 10 ( $t_p$ ) –  $K_p = 0$ ; б)  $\phi_0 = 50$  %: 1 ( $t_k$ ), 3-5 ( $t_p$ ), 7 ( $t_b$ ) –  $K = 0,1$ ; 0,3; 0,5; 2 ( $t_k$ ), 6 ( $t_p$ ) –  $K_p = 0$

На рис. 5, а-б наведено графічні залежності температур повітряних потоків на виході з конденсатора  $t_k$ , випарника  $t_b$  ТН і рекуператора  $t_p$  від температури  $t_0$  та відносної вологості  $\phi_0$  навколишнього середовища (а,  $K = 0,3$ ;  $K_p = 0,8$ ) і різних значень величини  $K$  (б,  $\phi_0 = 50\%$ ;  $K_p = 0,8$ ). Температури  $t_k$  теж обмежуються критичним значенням температури та зростають зі збільшенням відносної вологості  $\phi_0$ . За  $\phi_0 = 70\%$  критична температура настане при  $t_0 = 36\text{ }^\circ\text{C}$ . Це означає, що дана схема має сприятливі показники також для вологого жаркого клімату. Температури  $t_b$  не залежать від відносної вологості  $\phi_0$  та температури  $t_0$  і становлять в середньому  $4\text{ }^\circ\text{C}$ . Збільшення температури  $t_p$  вказує на зменшення теплового потоку для нагрівання припливного повітря до заданої температури  $t_1$ . За даного робочого процесу температура  $t_k$  не залежить від величини  $K$ , оскільки в розрахунках приймається постійне значення температури повітря на виході з приміщення  $t_2 = 18\text{ }^\circ\text{C}$ . Тобто схема розглядається в стаціонарному режимі, коли теплові надходження не змінюються в часі. За збільшення величини  $K$ , тобто при більших надходженнях теплоти, температура  $t_p$  також буде зростати. Криві 5 і 10 (а), а також 2 і 6 (б) описують відсутність рециркуляції повітря та вказують на різке погіршення температурного режиму роботи ТНУ.

На основі числового аналізу співвідношень (19) і (27) на рис. 6 побудовано графічні залежності холодильних коефіцієнтів ТН  $\epsilon_{тн}$  та ТНУ  $\epsilon_{сх}$  вентиляції та кондиціонування від температури  $t_0$  та відносної вологості  $\phi_0$  навколишнього середовища (рис.6, а) та різних значень величини  $K$  (рис.6, б). З графіків видно, що енергоефективність даної ТНУ  $\epsilon_{сх}$  зростає зі збільшенням  $\phi_0$ , оскільки більша частина зовнішнього повітря потрапляє до конденсатора ТН, а на випарник надходить повітряна суміш з параметрами близькими до параметрів в точці 2 (див. рис. 2). Тобто зростання ентальпії зовнішнього повітря  $h_0$  не суттєво впливає на теплове навантаження випарника ТН, що свідчить про ефективну рециркуляцію холоду, який виробляється системою. Зростання величини  $K$  вказує на те, що зростає потреба у більш холодному повітрі для цілей кондиціонування, тому ефективність схеми також підвищується. Оскільки температури  $t_k$  і  $t_b$  є постійними за даного робочого процесу, то  $\epsilon_{тн}$  не залежить від величини  $K$ , тобто від характеристики приміщення. Криві 5, 10 (а) і 2, 6 (б) описують відсутність рециркуляції повітря та вказують на різке погіршення ефективності роботи ТНУ.

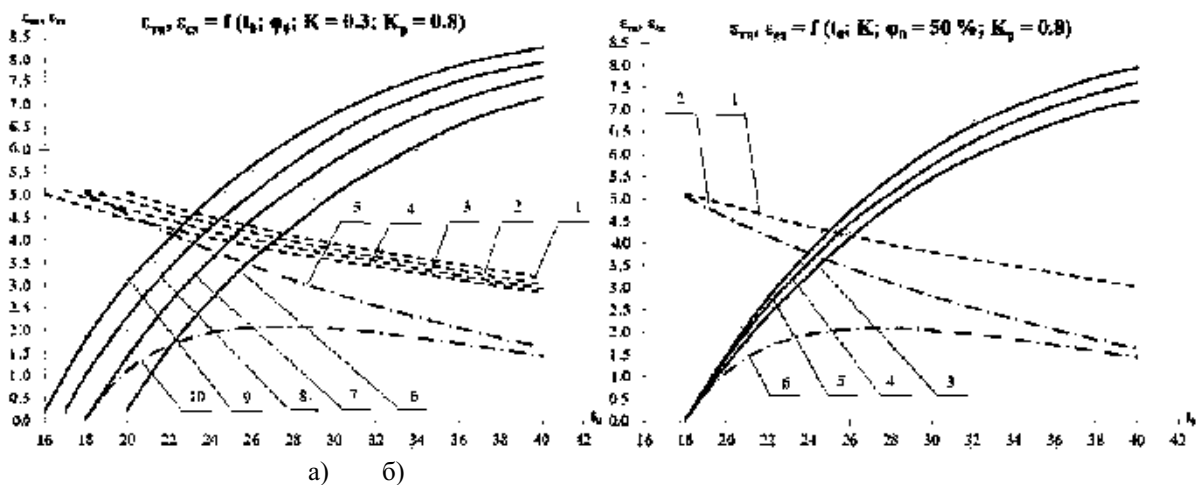


Рис. 6. Залежності холодильних коефіцієнтів ТН та схеми в цілому від температури та відносної вологості навколишнього середовища, величини  $K$  і коефіцієнта рециркуляції  $K_p = 0,8$ : а)  $K = 0,3$ : 1-4 ( $\epsilon_{тн}$ ), 6-9 ( $\epsilon_{сх}$ ) –  $\phi_0 = 40\%$ ; 50%; 60%; 70%; 5 ( $\epsilon_{тн}$ ), 10 ( $\epsilon_{сх}$ ) –  $K_p = 0$ ; б)  $\phi_0 = 50\%$ : 1 ( $\epsilon_{тн}$ ), 3-5 ( $\epsilon_{сх}$ ) –  $K = 0,1$ ; 0,3; 0,5; 2 ( $\epsilon_{тн}$ ), 6 ( $\epsilon_{сх}$ ) –  $K_p = 0$

### Висновки

1. Аналіз даної ТНУ вентиляції та кондиціонування показав вагомість рециркуляції холоду для забезпечення високої ефективності роботи схеми в широкому діапазоні температур і відносних вологостей навколишнього середовища. Теоретично максимальна ефективність схеми становить близько 8 од., що відбувається за найгірших умов:  $t_0 = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\phi_0 = 70\%$ . Збільшення теплових притоків зумовлює до ще більш ефективної рециркуляції холоду, так як для кондиціонування потребується більш низька температура припливного повітря.

2. Висока холодильна ефективність ТНУ в усьому температурному діапазоні свідчить про покращення умов роботи конденсатора, тобто температури повітря на виході з нього досягають критичних значень за вищих температур навколишнього середовища в порівнянні зі схемою, що була розглянута в роботі [6].

3. Дана теоретична модель ТНУ може бути придатною для застосування як в країнах з помірним сухим континентальним кліматом, так і з вологим тропічним кліматом в усьому діапазоні температур навколишнього

середовища, коли об'єктом вентиляції виступає виробниче приміщення з невисокою кратністю повітрообміну (цех, склад, машинне відділення). Але це також означає те, що для підтримання низької кратності повітрообміну необхідно збільшувати загальну витрату повітря, тобто затрати енергії на вентиляційні агрегати будуть зростати.

Отримані результати дослідження буде покладено в подальшу наукову та проектну роботу з вдосконалення існуючих ТНУ опалення, вентиляції та кондиціонування.

#### Список використаної літератури

1. Aguilar, F. Techno-economic analysis of an air conditioning heat pump powered by photovoltaic panels and the grid / F. Aguilar, D. Crespi-Llorens, P.V. Quiles // Solar Energy. – 2019. Vol. 180 – pp. 648–663.
2. Pérez-Lombard, L. A review on buildings energy consumption information / L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, C. Pout // Energy Build. – 2008. Vol. 40 – pp. 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>.
3. Mazzeo, D. Solar and wind assisted heat pump to meet the building air conditioning and electric energy demand in the presence of an electric vehicle charging station and battery storage / D. Mazzeo // Journal of Cleaner Production. – 2019. Vol. 213 – pp. 1228–1250.
4. Yu-Yuan Hsieh. A study of heat-pump fresh air exchanger / Yu-Yuan Hsieh, Yi-Hung Chuang, Tung-Fu Hou, Bin-Juine Huang // Applied Thermal Engineering. – 2018. Vol. 132 – pp. 708–718.
5. Wu J. Residential air-conditioner usage in China and efficiency standardization / Wu J, Liu C, Li H // Energy. – 2016. Vol. 119 – pp. 1036–1046.
6. Безродний, М. К. Теплонасосна система вентиляції та кондиціонування виробничого приміщення з надлишковим вологовиділенням / М. К. Безродний, Т. О. Місюра // Eurasian Physical Technical Journal. – 2020. – № 34. – С. 118–132.
7. Боженко, М. Ф. Джерела теплопостачання та споживачі теплоти / М. Ф. Боженко. – К.: НТУУ «КПІ» Вид-во «Політехніка», 2004. – 192 с.
8. Опалення, вентиляція та кондиціонування // Державні будівельні норми України ДБН В.2.5-67:2013. – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. – 149 с.
9. Морозюк, Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов [Текст] / Т. В. Морозюк. – Одесса: Студия «Негоциант», 2006. – 712 с.
10. Безродний, М. К. Термодинамічний аналіз теплонасосної системи вентиляції для підтримання комфортних умов в виробничих приміщеннях з вологовиділенням / М. К. Безродний, Н. О. Притула, М. О. Цветкова // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ". – 2018. – № 13. – С. 77–82. DOI: 10.20998/2078774X.2018.13.14.
11. Безродний М. К. Термодинамічна та енергетична ефективність теплонасосних схем теплопостачання: монографія / М. К. Безродний, Н. О. Притула. – К.: НТУУ «КПІ» Вид-во «Політехніка», 2016. – 272 с.

**M. Bezrodny**, Dr. Eng. Sc., Prof., **ORCID 0000-0002-0788-5011**

**T. Misiura**, Msc, Ph.D. student, **ORCID 0000-0002-2733-5308**

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

## HIGHLY EFFICIENT HEAT PUMP VENTILATION AND AIR CONDITIONING SYSTEM OF THE PRODUCTION AREA WITH VENTILATION AIR RECIRCULATION

*The aim of the work was thermodynamic analysis of the theoretical model of heat pump ventilation and air conditioning system with recirculation of cold depending on the outside air parameters to maintain temperature and humidity conditions in the production area during the warm season. Using the numerical analysis with the method of successive approximations air parameters at nodal points of the model were determined and its energy efficiency was estimated. These data made it possible to estimate operating modes of the system depending on outside air parameters, characteristics of ventilation and air conditioning objects and heat entrances to an area. The importance of cold energy recirculation to ensure high efficiency of the heat pump system was quantified. The studied system may be suitable for use in countries with temperate continental and humid tropical climates in the entire range of ambient temperatures, when the object of ventilation is a production area with a low air exchange rate.*

**Keywords:** heat pump-recuperator system, air heat pump, ventilation and air conditioning, refrigeration coefficient, recirculation, temperate continental climate.

REFERENCES

1. Aguilar, F. Techno-economic analysis of an air conditioning heat pump powered by photovoltaic panels and the grid / F. Aguilar, D. Crespi-Llorens, P.V. Quiles // *Solar Energy*. – 2019. Vol. 180 – pp. 648–663.
2. Pérez-Lombard, L. A review on buildings energy consumption information / L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, C. Pout // *Energy Build.* – 2008. Vol. 40 – pp. 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>.
3. Mazzeo, D. Solar and wind assisted heat pump to meet the building air conditioning and electric energy demand in the presence of an electric vehicle charging station and battery storage / D. Mazzeo // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. Vol. 213 – pp. 1228–1250.
4. Yu-Yuan Hsieh. A study of heat-pump fresh air exchanger / Yu-Yuan Hsieh, Yi-Hung Chuang, Tung-Fu Hou, Bin-Juine Huang // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. Vol. 132 – pp. 708–718.
5. Wu J. Residential air-conditioner usage in China and efficiency standardization / Wu J, Liu C, Li H // *Energy*. – 2016. Vol. 119 – pp. 1036–1046.
6. Bezrodny, M. The heat pump system for ventilation and air conditioning inside the production area with an excessive internal moisture generation / M. Bezrodny, T. Misiura // *Eurasian Physical Technical Journal*. – 2020. Vol. 17 – pp. 118–132.
7. Bozhenko, M. F. (2004). Heat sources and heat consumers. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI “Politehnika”, 192 p.
8. State Building Standards of Ukraine DNB B.2.5-67: 2013, “Heating, ventilation and air conditioning”. Kyiv, Ukraine: Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine, 149 p.
9. Morozjuk, T. V. (2006). The theory of chillers and heat pumps. Odessa, Ukraine: Studija «Negociant», 712 p.
10. Bezrodny, M. Thermodynamic analysis of the heat pump ventilation system for support of comfort conditions in industrial premises with release of moisture / M. Bezrodny, N. Prytula, M. Tsvetkova // *NTU “HPI”*. – 2018. No. 13 – pp. 77–82. DOI: 10.20998/2078-774X.2018.13.14.
11. Bezrodny M.K. Thermodynamic and energy efficiency of heat pump heat supply circuits: monograph / M.K. Bezrodny, N.O. Pritula - Kyiv: NTUU "KPI" View "Polytechnic", 2016. - 272 p.

УДК 621.577 + 697.1

**М. К. Безродный**, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-0788-5011  
**Т.А. Мисюра**, магистр, асп., ORCID 0000-0002-2733-5308  
**Национальный технический университет Украины**  
**«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕПЛОНАСОСНАЯ СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦИИ И  
КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОМЕЩЕНИЯ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ  
ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ВОЗДУХА**

*Целью работы был термодинамический анализ теоретической модели теплонасосной установки вентиляции и кондиционирования воздуха с рециркуляцией холода в зависимости от параметров наружного воздуха для поддержания температурных и влажностных условий в производственном помещении в тёплый период года. С помощью численного анализа методом последовательных приближений определены параметры воздуха в узловых точках схемы и оценена её энергетическая эффективность. Это дало установить режимы работы установки в зависимости от параметров наружного воздуха, характеристик объектов вентиляции и кондиционирования и поступлений теплоты. Была количественно отражена значимость рециркуляции холода для обеспечения высокой эффективности работы схемы. Исследованная система может быть пригодной для применения в странах с умеренным континентальным и влажным тропическим климатом во всём диапазоне температур окружающей среды, когда объектом вентиляции выступает производственное помещение с невысокой кратностью воздухообмена.*

**Ключевые слова:** теплонасосно-рекуператорная схема, воздушный тепловой насос, вентиляция и кондиционирование, холодильный коэффициент, рециркуляция, умеренный континентальный климат.

Надійшла 18.06.2020  
Received 18.06.2020

**В.І. Дешко**, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8218-3933  
**І.Ю. Білоус**, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6640-103X  
**С.О. Крамаренко**, студент, ORCID 0000-0003-1534-9793  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОДАТКОВІ ТЕПЛОВТРАТИ В МІСЦЯХ ПРИМИКАННЯ ВІКОННОЇ РАМИ ДО ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

*Сучасний стан житлово-комунальної сфери, побудованих до кінця 90-х років, потребує повної модернізації та значного підвищення енергоефективності. Світові тенденції підвищення рівня енергетичної ефективності будівель спрямовані на зменшення споживання енергії до майже нульового споживання (nZEB). Більша частина заходів спрямована для досягнення nZEB стосується заходів з покращення теплофізичних властивостей огороджень. При покращенні теплофізичних властивостей огороджень вагомість теплопровідних включень, що виникають в місцях примикання віконних конструкцій / залізобетонної плити перекриття до зовнішньої стіни та інше, суттєво зростає.*

*При покращенні теплофізичних властивостей огороджень вагомість теплопровідних включень, що виникають в місцях примикання віконних конструкцій / залізобетонної плити перекриття до зовнішньої стіни та інше, суттєво зростає. В роботі побудовано 2D-моделі в програмному середовищі THERM для дослідження температурних полів в місцях примикання лінійних теплопровідних включень. Проведено імітаційний розрахунок температурних полів для двох варіантів зовнішніх стін, що мають покращені теплофізичних властивостей огороджень, які відповідають сучасним вимогам теплового захисту.*

*Розрахунок проведений для кліматичних умов Києва. Встановлено, що для однакової товщини зовнішньої стіни заміна несучого шару конструкції силікатної цегли на газоблок покращує опір теплопередачі в 2 рази. З точки зору впливу лінійних теплопровідних включень в місцях примикання віконної рами до зовнішньої стіни спостерігається протилежний ефект, більший вплив в стіні виконаній з газоблоку. Наявність лінійних та точкових теплопровідних включень призводить до погіршення опору теплопередачі зовнішньої стіни виконаної з силікатної цегли на 20%, а з газоблоку - на 33% для розглянутої геометрії.*

**Ключові слова:** теплопровідні включення, температурні поля, огороджувальні конструкції, термічний опір огородження.

### Вступ

Україна є енергетично залежною країною від сусідніх держав. Сталий розвиток країни передбачає перехід до енергетичної незалежності, що в свою чергу можливе при підвищенні рівня енергоефективності. Будівлі є основним споживачем енергетичних ресурсів в Україні, де основна складова витрат становить витрати на потреби опалення. Зменшення цієї складової є можливе шляхом покращення теплотехнічних характеристик огороджень та використання сучасних інженерних мереж/технологій. В Україні з 2017 року набув чинності Закон України № 2118-VIII «Про енергетичну ефективність будівель». [1] Стандарти України щодо оцінки та підвищення рівня енергоефективності будівель наводять нормативну величину енергоспоживання на потреби опалення для будівель різного призначення та вимоги до теплозахисних властивостей оболонки, значення якої переглядається кожні 5 років. Згідно з директивою ЄС про енергетичну ефективність будівель 2010/31/EU (Energy Performance of Buildings Directive — EPBD), з 31 грудня 2020 року всі нові будівлі в країнах ЄС повинні будуватися як будівлі з майже нульовим споживанням енергії (nearly zero-energy buildings або nZEB). Україна, також приєдналася до країн, що рухаються напрямку nZEB в сфері енергетичної ефективності будівель. З впровадженням Директиви про енергетичну ефективність будівель кожна країна ЄС розробляє / розробила власні критерії для nZEB. Немає суворих і єдиних вимог для всіх країн-членів, і це забезпечує гнучкий підхід до розробки критеріїв, які зазвичай використовуються. [2] Крім того, кожна країна має національні плани nZEB щодо збільшення кількості дуже високого рівня енергоефективних будівель. Україна поки що не має таких критеріїв та стратегій для досягнення nZEB. [3] В значній мірі досягнення рівня nZEB можливе за рахунок утеплення та/або заміни огороджень, а отже врахування теплопровідних включень стає особливо важливим.

Житловий фонд України в значній мірі складається з будівель побудованих в період масової забудови, де особливо гостро поставлене питання покращенню рівня енергоефективності будівель. В значній мірі, покращення рівня енергетичної ефективності будівель стосується заходів з підвищення теплофізичних властивостей огороджень (перий етап), джерел та систем забезпечення (другий етап). На першому етапі впровадження енергозберігаючих заходів основна увага приділяється заміні світлопрозорих конструкцій [4].

© В. І. Дешко, І.Ю. Білоус, С.О. Крамаренко, 2020

Використання програмних продуктів дозволяє проводити поглиблений аналіз енергетичних характеристик будівель наближених до реальних умов експлуатації.[5] Враховуючи архітектуру алгоритмів сучасних динамічних програмних комплексів для дослідження енергетичних характеристик будівель, які реалізовані на принципах BEM-моделювання (Building Energy Modeling) є BLAST, DOE-2, ESP-r, HVACSIM+, TRNSYS, EnergyPlus та ін., світлопрозорий елемент конструкції розглядається як вузол, що не дозволяє отримувати розподіл температурних полів, а також не враховує лінійні теплопровідні включення в місцях примикання вікон до стіни [6].

В стандартах для розрахунку енергетичної ефективності будівель в Україні, в їх основі лежать стаціонарні та квазістаціонарні методи розрахунку, лінійні та точкові мостики холоду не враховуються або враховуються укрупнено через надбавку до коефіцієнту теплопередачі зовнішньої стіни [7]. Лінійні мостики холоду виникають в місцях примикання віконної рами або плити перекриття до зовнішньої стіни і т.д. В загальному енергобалансі втрати тепла через стіни можуть досягати 30%, що також спричинено теплопровідними включеннями. Особливістю теплопровідних включень є поява додаткових теплових потоків, які зменшують загальний опір теплопередачі огорожувальної конструкції та збільшують втрати тепла. Частка втрат тепла вікна через відкос може досягати 15% [8]. В стандарті [4] наведено розрахунок приведено термічного опору огорожень, що дозволяє враховувати лінійні та точкові мостики холоду. Потрібно відмітити, що стандарт [4] дозволяє проводити розрахунок лише для огорожень, які відповідають сучасним теплофізичним властивостям огорожень, тобто вже утеплені. Врахування лінійних мостиків холоду, наприклад, в місцях примикання віконної рами до зовнішньої стіни, яка відповідає термічному опору періоду масової забудови (біля 80% будівель України), не можливо. Це пояснюється тим, що для таких огорожень характерний низький рівень термічного опору, а отже теплопровідні включення мають менший вплив.

Враховуючи тенденції з покращення теплофізичних властивостей огорожень та підведення будівель до nZEB, складова теплопровідних включень буде мати більшу вагу. А отже, дана проблематика потребує додаткового вивчення та подальшої інтеграції отриманих результатів у динамічні програмні продукти для оцінки енергетичної ефективності будівель.

Для дослідження температурних полів використовується ряд програмних продуктів, серед них THERM, ELCUT та інші. [9, 10] Програма THERM [8] була розроблена в Національній лабораторії імені Лоуренса в Берклі, США. Програмне забезпечення дозволяє виконувати побудову 2D моделі вікна з урахуванням граничних умов, особливостей конструкції світлопрозорої та непрозорої частини (рами) вікна. Програмний продукт THERM синхронізується з підпрограмою WINDOW, яка дозволяє завантажувати готові стандартизовані креслення склопакетів з вказаними граничними умовами для подальшого моделювання розподілу температурних полів. Крім існуючих в бібліотеці WINDOW креслень віконних конструкцій, програма THERM дозволяє створювати нові віконні профілі, геометрія яких створюється в спеціалізованих програмних комплексах AutoCAD, Компас і т. п. Збережені креслення конструкцій в форматі DXF можуть бути завантажені в якості кальки в програму THERM. В результаті моделювання в програмному продукті THERM можна вивести: розподіл ізотерм на моделі, демонстрацію напрямку теплового потоку та його інтенсивність, визначення точки мінімальної і максимальної температури, а також можливість відобразити двовимірне температурне поле моделі кольоровою гістограмою.

Згадана вище програма ELCUT дублює функціонал THERM, але доступ до неї плагінний на відміну від програми THERM. До переваг ELCUT слід віднести: 1) вбудований інтегральний калькулятор за допомогою якого користувач може знайти тепловий потік, різницю температур, середню температуру поверхні та інтеграл від густини теплового потоку (в THERM дана функція відсутня); 2) вбудовано можливість побудови графіків залежності температури, градієнту, теплового потоку та теплопровідності від довжини контуру. [10]

### **Мета та завдання**

*Метою роботи* є дослідження розподілу температурних полів в віконних конструкціях та визначення приведенного термічного опору з врахуванням лінійних мостиків холоду в місцях примикання вікна до стіни.

*Для досягнення поставленої мети* були поставлені наступні *завдання*:

- 1) створити 2D-модель елементів зовнішніх огорожувальних конструкцій;
- 2) провести розрахунок температурних полів різних типів огорожувальних конструкцій;
- 3) визначити приведенний термічний опір огорожень з врахуванням лінійних мостиків холоду.

### **Матеріал та результати досліджень**

*Вихідні дані. Опис об'єкту досліджень.* В роботі розглянуто елемент зовнішнього огороження розміром 4×2,8 м з двокамерним енергозберігаючим вікном розміром 1,4×1,5 м. Розглянуто два типи зовнішніх стін, які складаються з 4-х шарів. Несучий шар конструкції виконаний: 1) з газоблоків 400 мм; 2) з силікатної цегли в 1,5 цеглини – 375 мм. Для досягнення сучасних вимог до теплозахисних властивостей огорожень додано шар мінеральної вати товщиною 100 мм. (табл. 1).

Таблиця 1 – Характеристика зовнішніх огорожувальних конструкцій

Склад стіни	
Варіант 1	Варіант 2
1) шар цементно-піщаного розчину $\lambda_1=0,81$ Вт/(м·К) [10], товщиною 20 мм;	
2) шар утеплювача з мінераловатних плит на основі базальтового волокна $\lambda_2=0,043$ Вт/(м·К) [10], товщиною 100 мм;	
3) шар кладки з силікатної цегли $\lambda_3=0,87$ Вт/(м·К) [10], товщиною 375 мм;	3) шар кладки з газоблоків D500 $\lambda_3=0,112$ Вт/(м·К) [10], товщиною 400 мм;
4) шар цементно-піщаного розчину $\lambda_4=0,81$ Вт/(м·К) [10], товщиною 20 мм;	

Розрахунок проводився для розрахункових ( $t_{p.o}=-22^\circ\text{C}$ ) та середніх ( $t_{c.o}=-0.1^\circ\text{C}$ ) опалювальних умов для м. Київ та відносній вологості 75%. [12] Внутрішня температура повітря  $20^\circ\text{C}$ , відносна вологість 55% [7]. Коефіцієнт тепловіддачі для внутрішнього та зовнішнього середовища становить  $\alpha_{\text{вн}}=8,7$  Вт/м<sup>2</sup>·К та  $\alpha_{\text{зов}}=23$  Вт/м<sup>2</sup>·К, відповідно. [4]

В роботі використана програма THERM [8], де було створено 2D моделі вікна з урахуванням граничних умов, особливостей конструкції світлопрозорої та непрозорої частини (рами) вікна, зовнішньої стіни, враховане місце розташування вікна, тобто віддаленість від зовнішньої поверхні зовнішньої стінки. В результаті моделювання в програмному продукті THERM було отримано розподіл ізотерм в світлопрозорій та непрозорій частині огороження, інтенсивність теплового потоку для розрахункових (проектних) (рис. 1) та середніх (рис. 2) умов зовнішньої температури повітря опалювального сезону для міста Київ [12], а також визначено точки мінімальної і максимальної температури.

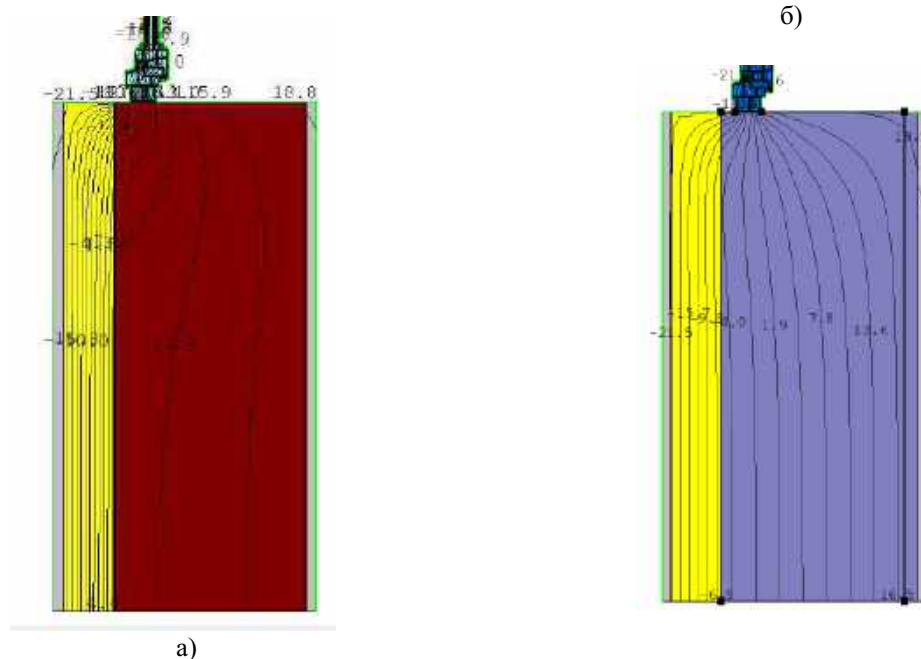


Рисунок 1 – Розподіл ізотерм в зовнішній стіні для варіанту 1 (а) та варіанту 2 (б) для розрахункових/проектних умов

На рис. 3,а наведено зміну при віддаленні від рівня підвіконня температури на поверхні огороження між шаром ізоляції та шаром кладки, яка виконана з силікатної цегли або газоблоку. На рис. 3,б наведено температурний перепад в несучому шарі конструкції (газоблок/силікатна цегла) для розрахункових зовнішніх умов для міста Київ [11]. Газоблок має покращені теплофізичні властивості на відміну від силікатної цегли (менший коефіцієнт теплопровідності), тобто суттєво покращується термічний опір огороження (зовнішньої стіни), але з точки зору теплопровідних включень більш чутлива.

На рис. 4 наведено двовимірне температурне поле для розрахункових умов зовнішнього середовища. З рис. 4 та 1 слідує, що для газоблоку температурне поле має нижчий рівень ніж для силікатної цегли в центрі розглянутої зовнішньої конструкції.

Програмний продукт THERM дозволяє візуально оцінити теплові потоки та границі, де вплив мостиків холоду нівелюється (рис. 5). Напрямок стрілки вказує на напрям теплового потоку, а її величина – інтенсивність.

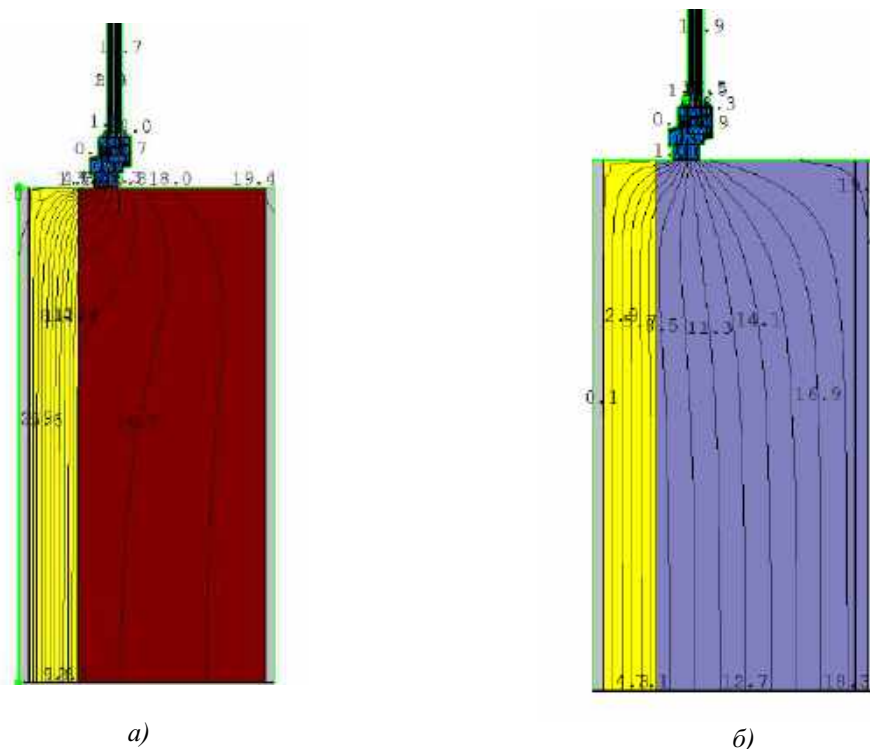


Рисунок 2 – Розподіл ізотерм в зовнішній стіні для варіанту 1 (а) та варіанту 2 (б) для середніх за опалювальний сезон зовнішніх умов

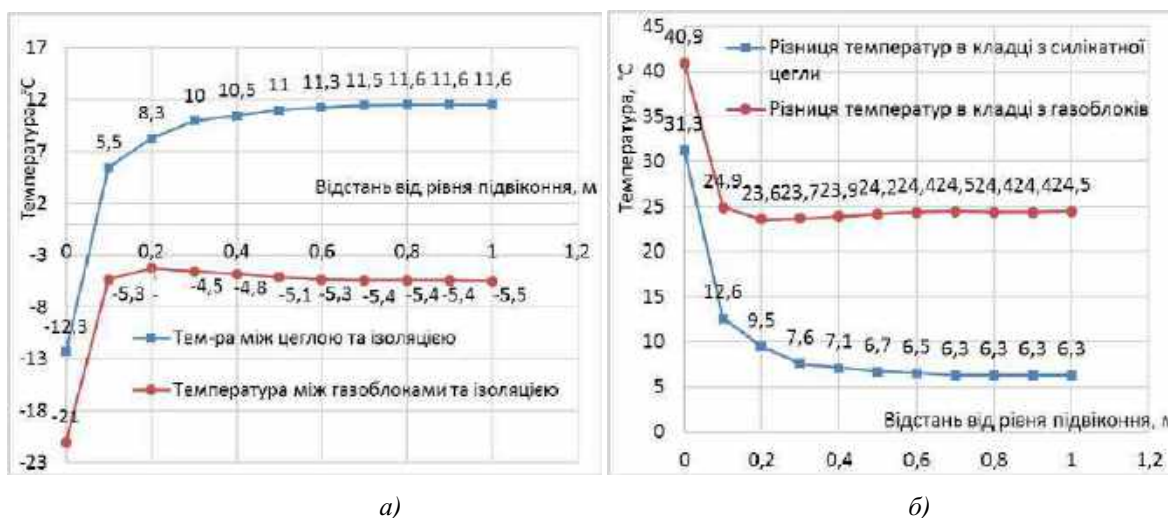


Рисунок 3 – Температура поверхні несучого шару кладки з боку ізоляції (а) та температурний перепад в шарі кладки (б) для розрахункових умов м. Київ

В програмі THERM було почарго визначено опір теплопередач прозорого та непрозорого елементу огородження, який становить ( $m^2 \cdot K/Вт$ ): вікно – 0,63; стіна з силікатної цегли – 2,96; з газоблоку – 6,1. Визначення приведення опору теплопередачі зовнішнього огородження в програмі є не можливою, адже 2D-модель дозволяє визначити лише лінійний опір огородження. Приведений термічний опір огородження залежить від геометричного співвідношення стіна-вікно, при збільшенні коефіцієнту застіблення вплив лінійних мостиків холоду буде суттєвіший.

Для світлопрозорого огородження проведено порівняння опору теплопередачі. Встановлено, що з змодельований двокамерний склопакет з повітряним заповненням в програмі EnergyPlus та підпрограми Window становить 0,55 ( $m^2 \cdot K/Вт$ ) [6], з стандарту [11] – 0,47. Відмінність опору теплопередач отриманого на основі програм THERM, EnergyPlus пояснюється особливістю конструкції рами вікна, яка задається. В стандарті [11] не уточнюється, який тип рами та співвідношення між площею вікна та рамою.



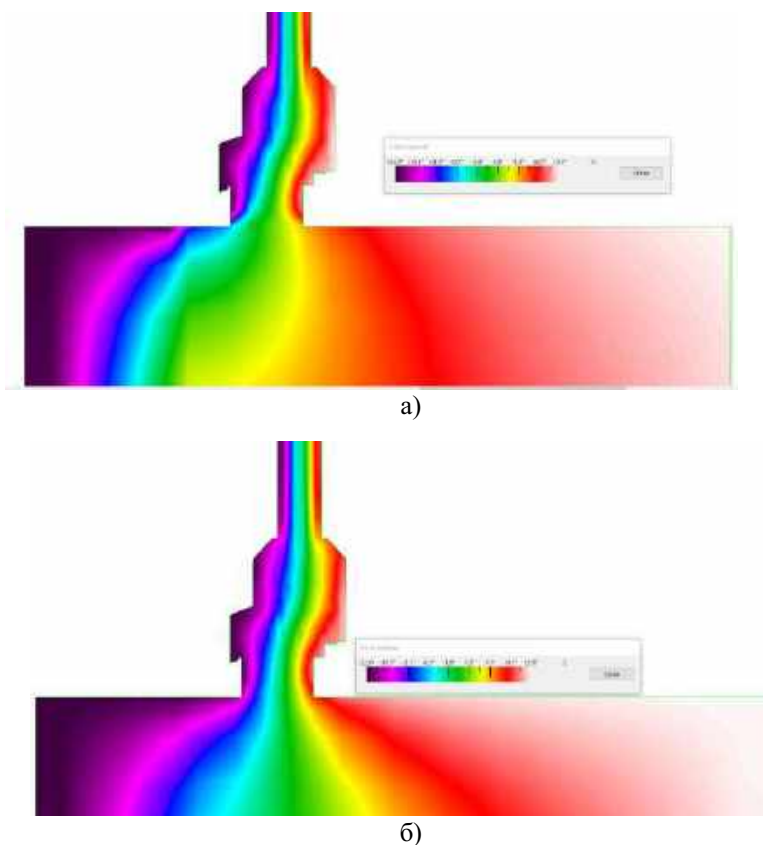


Рисунок 4 – двовимірне температурне поле в зовнішній стіні для варіанту 1 (а) та варіанту 2 (б) для розрахункових умов зовнішнього середовища

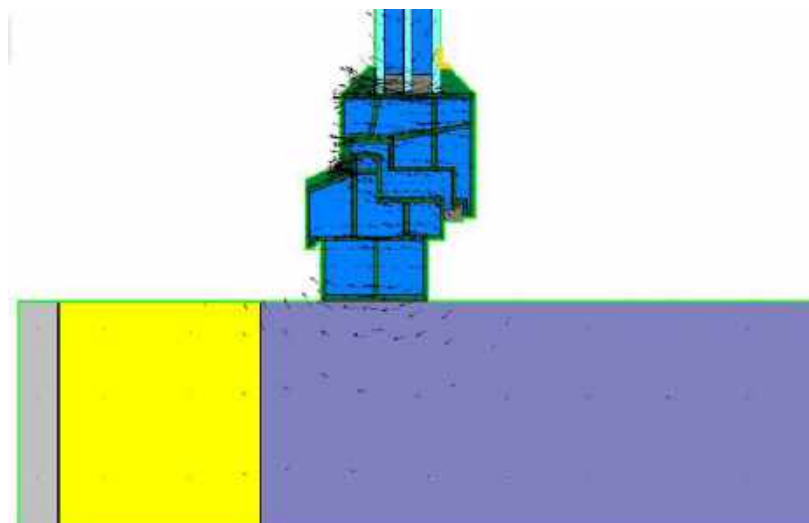


Рисунок 5 - Візуалізація теплових потоків в стіні виконаній з газоблоку

На основі стандарту [4] визначено опір теплопередачі непрозорого елемента огороження. Врахування лінійних та точкових теплопровідних включень на основі стандарту [4] можливе лише для утеплених зовнішніх стін, для теплофізичних властивостей стін масової забудови розрахунок теплопровідних включень на основі стандарту [4] не можливе. Проведено розрахунок загального опору теплопередачі зовнішньої стіни та її приведенного опору, що враховує теплопровідні включення. Опір теплопередачі зовнішніх стін без врахування теплопровідних включень визначався за формулою [4]:

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{\alpha_g} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_{ip}} + \frac{1}{\alpha_s}, \quad (1)$$

де  $\alpha_6, \alpha_3$  – коефіцієнти тепловіддачі внутрішньої і зовнішньої поверхонь огорожувальної конструкції, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\delta_i$  – товщина  $i$ -го шару зовнішніх стін, м;  $\lambda_{ip}$  – розрахункова теплопровідність матеріалу  $i$ -го шару зовнішніх стін в розрахункових умовах експлуатації, Вт/(м·К). Приведений опір теплопередачі зовнішніх стін визначається за формулою [4].

$$R_{\Sigma np} = \frac{F_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^I \frac{F_i}{R_{\Sigma i}} + \sum_{j=1}^J k_j L_j + \sum_{k=1}^K \psi_k N_k} \quad (2)$$

де  $k_j$  – лінійний коефіцієнт теплопередачі  $j$ -го елемента, Вт/(м·К);  $L_j$  – протяжність  $j$ -го елемента, м;  $\psi_k$  – точковий коефіцієнт теплопередачі  $k$ -го елемента, Вт/К;  $N_k$  – кількість точкових включень  $k$ -го елемента, шт;  $F_{\Sigma}$  – загальна площа розглянутих огорожень, м<sup>2</sup>;  $R_{\Sigma i}$  – площа  $i$ -го термічно однорідного непрозорого масиву огорожувальної конструкції без врахування теплопровідних включень загальний опір теплопередачі  $i$ -го огороження, м<sup>2</sup>·К/Вт;  $F_i$  – площа  $i$ -го термічно однорідного непрозорого масиву огорожувальної конструкції без врахування теплопровідних включень, м<sup>2</sup>.

Характеристика теплопровідних включень наведена в таблиці 2, що визначені з стандарту [4].

Таблиця 2– Характеристика теплопровідних включень [4]

Найменування теплопровідного включення	Протяжність, м	Кількість, шт	Лінійний коеф. теплопередачі $k$ , Вт/(м·К)		Точковий коеф. теплопередачі $\psi$ , Вт/К
			Варіант 1	Варіант 2	
Віконний відкос в зоні перемички	1,4	–	0,081	0,075	–
Віконний відкос в зоні підвіконня	1,4	–	0,059	0,077	–
Віконний відкос в зоні рядового примикання	3	–	0,068	0,052	–
Дюбелі для кріплення мінераловатних плит	–	73*	–	–	0,005

\* з стандартного розрахунку 8 шт дюбелів на м<sup>2</sup> зовнішньої стіни

Проведено порівняння результатів розрахунку опору теплопередачі (табл. 3). Отримані результати розрахунку загального опору теплопередачі зовнішньої стіни аналогічні результатам отриманих в програмі THERM.

Врахування мостиків холоду в місцях примикання віконної рами до зовнішньої стінки погіршує термічний опір стіни з силікатної цегли на 20%, а з газоблоку – на 33%, а отже так само збільшує тепловтрати через неї для стаціонарних умов розрахунку. Отримані результати справедливі лише для розглянутих геометричних розмірів стіни та вікна. При збільшенні коефіцієнту заклення приведений опір теплопередачі зовнішньої стіни буде зменшуватися, адже вплив теплопровідних включень буде суттєвіший.

Потрібно відмітити, що опір теплопередачі без врахування теплопровідних включень стіни виконаної з газоблоку та силікатної цегли відрізняється в 2,06 рази, при врахуванні теплопровідних включень – 1,73 рази. Звідси слідує, що врахування теплопровідних включень зменшує різницю в опорах між двома розглянутими типами огорожень.

Таблиця 3 – Опір теплопередачі зовнішніх стін

Характеристика	Варіант 1	Варіант 2
$R$ , (м <sup>2</sup> ·К)/Вт	2,96	6,10
$R_{np}$ , (м <sup>2</sup> ·К)/Вт	2,37	4,09
Відхилення, %	20	33

### Висновки

В роботі проведено аналіз теплопровідних включень в місцях примикання віконного відкосу до зовнішньої стіни. Для аналізу були створені двовимірні математичні моделі зовнішнього огороження (стіни та вікна) для двох варіантів огорожень, що відповідають сучасним вимогам теплозахисних властивостей огорожень.

Для однакової товщини зовнішньої стіни заміна несучого шару конструкції силікатної цегли на газоблок покращує опір теплопередачі в 2 рази. Але лінійні теплопровідні включення в місцях примикання віконної рами до зовнішньої стіни мають більший вплив в стіні виконаній з газоблоку.

Врахування лінійних та точкових теплопровідних включень призводить до погіршення опору теплопередач зовнішньої стіни виконаної з силікатної цегли на 20%, а з газоблоку - на 33%. Врахування теплопровідних включень навіть для споруди без складних конструктивних рішень огорожень призводить до збільшення тепловтрат, внаслідок чого може змінитися клас енергетичної ефективності будівель, тому поширена практика енергоаудиторів під час визначення енергопотреб будівлі спрощувати подібні розрахунки не є виправданою.

#### Список використаної літератури

1. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 № 2118-VIII. С. 359.
2. Nematoucha M.K, Marie-Reine Nishimwe A., Reiter S. Towards nearly zero-energy residential neighbourhoods in the European Union: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135 (2021) 110198. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110198
3. Fedorcak-Cisak M., Knap K., Kowalska-Koczwara A., Pachla F., Pekarchuk O. Energy and Cost Analysis of Adapting an Existing Building to 2017 Technical Requirements and Requirements for NZEB. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* Volume 471, Issue 11, 24 February 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/471/11/112094
4. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель / ДСТУ Б В.2.6-189:2013 [Національний стандарт України] – К.: Мінрегіон України, 2013, - 55 с.
5. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Буяк Н.А. Вплив переривчастих режимів опалення на динаміку енергопотреб та умови комфортності будівель з різним рівнем теплового захисту. *Наукові вісті НТУУ КПІ*. 2019. №4. С. 7-16.
6. Білоус І.Ю., Дешко В.І., Буяк Н.А., Голубенко О.О., Гуреев М.В. Оцінка впливу заміни вікон на енергопотребу та умови комфорту в будівлі на основі динамічного моделювання. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2018. №3. С. 52-62.
7. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні / ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [Національний стандарт України] – К.: Мінрегіон України, 2015, - 203 с.
8. Семенова Э.Е., Самсонова М.Г., Нецепляев Д.Е., Компанец В.Ю. Пути повышения энергоэффективности гражданских зданий. *Инженерные системы и сооружения*. - 2019. - №3 (36). - С. 20-24.
9. Офіційний сайт програмного продукту THERM, [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://windows.lbl.gov/software/therm>
10. Офіційний сайт програмного продукту ELCUT, [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://elcut.ru>
11. ДБН В.2.6-31:2006. Конструкції будинків та споруд. Теплова ізоляція будівель. [На заміну СНиП II-3-79; чинний від 2007.04.01 зі зміною №1 від 1 липня 2013 року]. К.: Мінбуд України, 2006. 70 с.
12. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. К., 2011. 127 с.

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

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

**S. Kramarenko**, student, **ORCID** 0000-0003-1534-9793

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

## ADDITIONAL HEAT LOSSES AT THE JUNCTIONS OF THE WINDOW FRAMES AND ENCLOSING STRUCTURES

The current state of housing and communal services, which have been built by the end of the 90s, requires complete modernization and a significant increase of energy efficiency. Global trends in energy efficiency of buildings are aimed at changing energy consumption to almost zero level (nZEB). Most of the measures aimed at achieving nZEB refer to measures of improvement the thermophysical properties of enclosures. With the improvement of the thermophysical properties of the enclosures, the influence of the thermally conductive inclusions that occur at the junctions of the window structures / reinforced concrete slab of the ceiling to the outer wall, etc., increases significantly.

The paper contains 2D-models built in the THERM – a software for studying temperature fields at the junctions of linear heat-conducting inclusions. We have simulated heat-conducting fields for two variants of external walls with improved thermophysical properties of enclosures that conform to modern requirements for thermal protection. The calculation was made for the climatic conditions of Kyiv.

It is established that for the same thickness of the outer wall, the replacement of the bearing layer of the silicate bricks structure with a aerocrete blocks improves the resistance to heat transfer by 2 times. From the point of view of influence of linear heat-conducting inclusions in places of adjunction of a window frame to an external wall is observed the opposite effect, when there is a bigger influence in a wall made of the aerocrete blocks. Taking into account linear and point heat-conducting inclusions leads to a deterioration of the resistance to heat transfer of the outer wall made of silicate bricks by 20%, and of the aerocrete blocks - by 33%. Consideration of heat-conducting inclusions even for a construction without difficult constructive decisions of protections leads to increase in heat losses.

**Keywords:** thermally conductive inclusions, temperature fields, enclosing structures, thermal resistance of the enclosure.

#### REFERENCES

1. Pro enerhetychnu efektyvnist budivel: Zakon Ukrainy vid 22.06.2017 № 2118-VIII. S. 359.
2. Nematchoua M.K., Marie-Reine Nishimwe A., Reiter S. Towards nearly zero-energy residential neighbourhoods in the European Union: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135 (2021) 110198. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110198
3. Fedorcak-Cisak M., Knap K., Kowalska-Koczwara A., Pachla F., Pekarchuk O. Energy and Cost Analysis of Adapting an Existing Building to 2017 Technical Requirements and Requirements for NZEB. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* Volume 471, Issue 11, 24 February 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/471/11/112094
4. Metody vyboru teploizoliatsiinogo materialu dlia uteplennia budivel / DSTU B V.2.6-189:2013 [Natsionalnyi standart Ukrainy] – K.: Minrehion Ukrainy, 2013, - 55 s.
5. Deshko V.I., Bilous I.U., Buiak N.A. Vplyv pereryvchastykh rezhymiv opalennia na dynamiku enerhopotreby ta umovy komfortnosti budivel z riznym rivnem teplovoho zahystu. *Naukovi visti NTUU KPI*. 2019. №4. S. 7-16.
6. Bilous I.U., Deshko V.I., Buiak N.A., Holubenko O.O., Hureev M.V. Otsinka vplyvu zaminy vikon na enerhopotrebu ta umovy komfortu v budivli na osnovi dynamichnogo modeluvannia. *Naukovyi zhurnal «Enerhetika: ekonomika, tehnolohii, ekolohia»*. 2018. №3. S. 52-62.
7. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrahunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osvitlenni ta hariachomu vodopostachanni / DSTU B A.2.2-12:2015 [Natsionalnyi standart Ukrainy] – K.: Minrehion Ukrainy, 2015, - 203 s.
8. Semenova E.E, Samsonova M.H., Netsepliaev D.E., Kompaneets V.U. Puti povyshenia energoefektivnosti grazhdanskykh zdaniy. *Inzhenernye sistemy i sooruzhenia*. - 2019. - №3 (36). - S. 20-24.
9. Ofitsiyniyi sayit programnogo produktu THERM, [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://windows.lbl.gov/software/therm>
10. Ofitsiyniyi sayit programnogo produktu ELCUT, [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://elcut.ru>
11. DBN V.2.6-31:2006. Konstruktsii budynkiv ta sporud. Teplova izoliatsia budivel. [Na zaminu SNiP II-3-79; chunnyi vid 2007.04.01 zi Zminou №1 vid 1 lypnia 2013 roku]. K.: Minbud Ukrainy, 2006. 70 s.
12. DSTU -N B V.1.1-27:2010. Budivelnna klimatolohia. K., 2011. 127 s.

Надійшла 19.06.2020  
Received 19.06.2020

А.І. Крючков, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-2234-0546  
 Н.І. Жукова, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-4215-6981  
 С.В. Зайченко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8446-5408  
 В.Г. Смоляр, інженер, ORCID 0000-0002-0355-0353  
 Національний технічний університет України  
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОЗБЕРЕЖЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ВИКОРИСТАННЯМ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВА МІНЕРАЛЬНОЇ ВАТИ ЯК НАПОВНЮВАЧА КЕРАМОБЛОКІВ

У статті розглянуто спосіб утилізації відходів виробництва мінеральної вати шляхом їх додавання як наповнювача в керамічні блоки, що використовуються в будівельних конструкціях. Запропонований спосіб утилізації відходів виробництва мінеральної вати дозволить не лише зменшити антропогенне навантаження на довкілля та знизити витрати на її утилізацію, але й підвищити теплоізоляційні властивості будівельних конструкцій. Метою досліджень є обґрунтування доцільності додавання відходів виробництва мінеральної вати до складу керамічних блоків. Досліджено залежність теплоізоляційних показників керамічних блоків від вмісту відходів мінеральної вати. Визначено раціональний вміст відходів мінеральної вати у складі керамічних блоків. Встановлено залежності коефіцієнту теплопровідності та опору теплопередачі від вмісту відходів мінеральної вати у керамічному блоці. Запропонований спосіб утилізації відходів виробництва мінеральної вати придатний для використання у виробництві як керамічних блоків, так і для виробництва керамічної цегли.

**Ключові слова:** відходи виробництва мінеральної вати, утилізація, керамічні блоки, теплоізоляційні властивості.

### Вступ

На сьогодні в Україні поширюються нові будівельні матеріали, такі як газобетонні блоки, керамоблоки, піноблоки тощо. Поряд з цим у будівництві широко використовується традиційні види будівельних матеріалів: керамічна та силікатна цегла. Це пояснюється їх властивостями, технічними характеристиками, простою технологією виробництва, дешевизною сировини та доступністю. Керамічні блоки характеризуються міцністю, екологічністю, значним терміном експлуатації, високим рівнем звукоізоляції, точністю геометричних розмірів, поряд з цим керамічні блоки мають недоліки, а саме: крихкість (через тонкі стінки та порожнистість блок легко пошкоджується, тому транспортування має бути дуже обережним); здатність сильно вбирати вологу; відносно морозостійкістю, оскільки стіни будівель без утеплення уражуються пліснявою. Тому є потреба утеплення будівель за допомогою теплоізолюючих матеріалів.

На сьогодні в Україні є актуальною проблема підвищення теплоізоляційних та міцнісних показників будівельних матеріалів. Поряд з цим потребує вирішення проблема утилізації відходів виробництва мінеральної вати.

Узагальнені характеристики сучасних матеріалів, які використовуються для будівництва, та їх показники наведено в табл. 1[1].

Таблиця 1 – Характеристики сучасних матеріалів для будівництва

Характеристики	Дерево	СП панелі	Цегла	Пінобетон	Газобетон
Міцність, кг/см <sup>2</sup>	15-60	5-10	50-150	10-50	5-20
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	400-700	30-50	1000-2000	450-900	200-600
Теплопровідність, Вт/мГрад	0,09-0,18	0,03-0,09	0,30-0,80	0,10-0,40	0,10-0,30
Морозостійкість, циклів	35-100	20-50	50-200	25-50	10-30
Усадка, % мм/м	1,5-3	0,5-1	0	0,6-1,2	1,5
Гігроскопічність, %	70-90	5-10	40	95	100

Як видно з табл.1, при значному терміні експлуатації, низькому рівні водопоглинання цегла має високу теплопровідність, тому виникає потреба утеплення стін будівель. Аналіз літературних джерел [2, 3] показав, що існує тенденція використання відходів виробництва мінеральної вати у технології виробництва будівельних матеріалів для покращення їх теплоізоляційних властивостей, але не обґрунтовано раціональний вміст цих відходів у складі керамічних блоків [4].

#### **Мета та завдання**

Метою роботи є обґрунтування доцільності додавання відходів виробництва мінеральної вати при виробництві керамічних блоків як способу утилізації цих відходів та встановлення ефективного їх вмісту, що значно підвищить теплозбереження будівельних конструкцій.

Завданням статті є визначення теплоізоляційних показників керамічних блоків, що містять відходи виробництва мінеральної вати.

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

В роботі запропоновано додавання відходів виробництва мінеральної вати до керамічних блоків для підвищення їх теплоізоляційних показників. Також це дозволить скоротити витрату основної сировини, утилізувати відходи виробництва мінеральної вати та знизити собівартість виробництва керамічних блоків.

На сьогодні ряд виробників будівельних матеріалів випускають керамічні блоки з пустотами у вигляді отворів (рис.1) [2]. Для покращення теплозбереження будівель технологічний процес включає заповнення отворів теплоізоляційними матеріалами [4]. Однак це призводить до ускладнення технологічного процесу виготовлення утеплених керамічних блоків та підвищує їх собівартість.



Рисунок 1 – Традиційний керамічний блок з пустотами

У роботі розглядається можливість виготовлення керамічних блоків розмірами 500x248x249 мм з глини та відходів виробництва мінеральної вати як наповнювача (рис. 2). Для визначення ефективного вмісту відходів виробництва мінеральної вати в керамічних блоках досліджувалися зразки з вмістом відходів 20%, 25 %, 30%, 35%, 40%, 45%. Товщина кладки сягала 500 мм.



Рисунок 2 – Керамічний блок з вмістом відходів виробництва мінеральної вати

Дослідження проводились за протоколом визначення теплопровідності [5]. Було визначено коефіцієнт теплопровідності і опір теплопередачі керамічних блоків з урахуванням вологості кладки.

Величина коефіцієнта теплопровідності будівельних матеріалів змінюється в досить широких межах – від 0,025 (мінеральна вата) до 3,49 (граніт, гнейс, базальт), Вт/(м·°C). Величина коефіцієнта теплопровідності для одного й того ж матеріалу не є сталою величиною і залежить від його вологості та температури, а також напрямку теплового потоку [5, 6].

Характеристики керамічної цегли та мінеральної вати наведено в табл. 2.

Таблиця 2 - Характеристики будівельних матеріалів

№ п/п	Показники	Керамічні блоки	Відходи виробництва мінеральної вати
1	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	1000-2100	35-100
2	Міцність, МПа	50-300	0,1
3	Водопоглинання, %	6	6-30
4	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м°C	0,65-2,4	0,044

Термічний опір теплопередачі кладки при фактичній вологості

$$R = \frac{\Delta t}{q}, \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}, \quad (1)$$

де  $\Delta t$  – різниця температур на поверхнях стіни;  
 $q$  – густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>.

Різницю середньозважених значень температур теплої та холодної поверхонь стіни визначають за виразом

$$\Delta t = t_T - t_X, \text{°C}, \quad (2)$$

де  $t_T, t_X$  – температури теплої та холодної поверхні стіни відповідно, °C;

Коефіцієнт теплопровідності кладки при фактичному значенні її вологості  $\omega$

$$\lambda_{\text{екв}} = \frac{\delta}{R}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}, \quad (3)$$

де  $\delta$  – товщина кладки, м.

Аналогічні дослідження проводились для значень вологості кладки  $\omega_0=0\%, 1\%$  та  $1,5\%$ .

Коефіцієнт теплопровідності кладки у сухому стані

$$\lambda_0 = \lambda_{\text{екв}}(\omega) - \omega \cdot \Delta\lambda_{\text{екв}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}. \quad (4)$$

Коефіцієнт теплопровідності кладки для конкретних умов експлуатації

$$\lambda_{\text{А(Б)}} = \lambda_0 - \omega_{\text{А(Б)}} \cdot \Delta\lambda_{\text{екв}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}. \quad (5)$$

Розраховані коефіцієнти теплопровідності для різних значень вологості кладки наведено в табл.3.

Залежності коефіцієнту теплопровідності кладки ( $\lambda_{\text{А(Б)}}$ ) від вмісту відходів виробництва мінеральної вати наведено на рис. 3. Видно, що найменше значення коефіцієнту теплопровідності відповідає 35% вмісту відходів виробництва мінеральної вати і найвищим значенням теплоізоляційних параметрів цегляних блоків.

Визначено залежність опору теплопередачі від вмісту відходів виробництва мінеральної вати в складі цегляних блоків, причому найвище його значення спостерігається при 35% вмісту відходів виробництва мінеральної вати (рис. 4).

Таблиця 3 - Коефіцієнти теплопровідності для різних значень вологості кладки та вмісту відходів виробництва мінеральної вати

Вміст відходів виробництва мінеральної вати	$\omega_0=0\%$		$\omega_1=1\%$		$\omega_2=1,5\%$	
	$\lambda_0, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	$R_0, \frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$	$\lambda_A, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	$R_A, \frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$	$\lambda_B, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	$R_B, \frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$
20%	0,127	3,91	0,14	3,56	0,145	3,41
25%	0,128	3,87	0,133	3,72	0,136	3,64
30%	0,106	4,65	0,118	4,2	0,126	4,0
35%	0,101	4,9	0,106	4,66	0,108	4,58
40%	0,115	4,30	0,12	4,17	0,121	4,1
45%	0,116	4,26	0,131	3,78	0,138	3,5

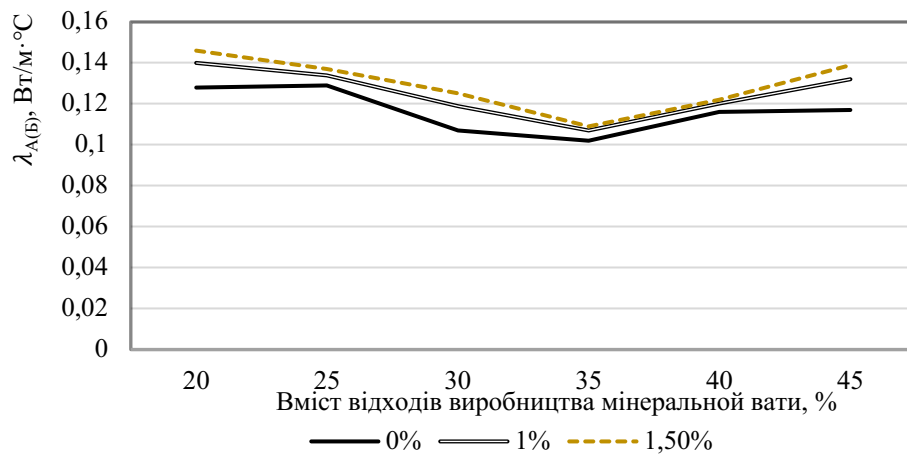


Рисунок 3-Залежність коефіцієнту теплопровідності від вмісту відходів виробництва мінеральної вати для різних значень вологості кладки

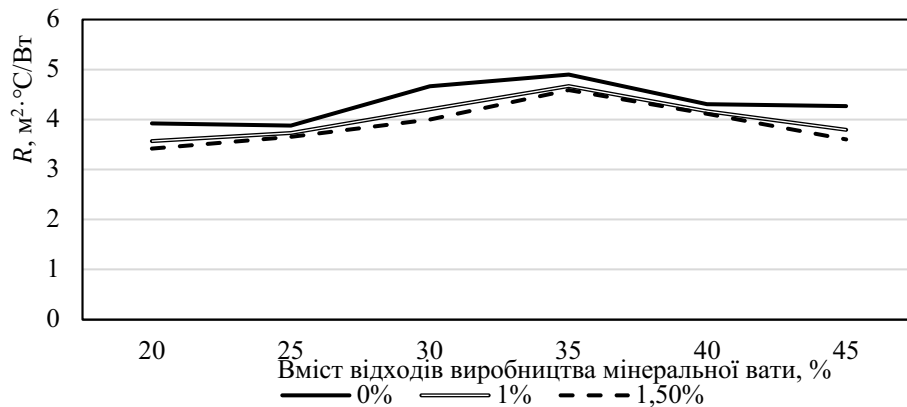


Рисунок 4 - Залежність опору теплопередачі від вмісту відходів виробництва мінеральної вати для різних значень вологості кладки



Доцільність використання керамічних блоків з наповненням відходами виробництва мінеральної вати доведено розрахунковим методом на прикладі визначення вартості будівництва 9-ти поверхового будинку.

Розглянуто три варіанти використання будівельних матеріалів, а саме:

1-й варіант – спорудження будинку з силікатної цегли та утепленням пінопластом;

2-й варіант – використання керамічних блоків з пустотами, які заповнюються мінеральною ватою (рис. 1);

3-й варіант – спорудження будинку з використанням керамічних блоків, що містять наповнювач у вигляді відходів виробництва мінеральної вати (рис. 2).

Порівняння варіантів показало, що найбільш доцільним є варіант спорудження будинку з керамічних блоків (цегли), що містять 35% відходів виробництва мінеральної вати. Вартість будівництва становить 4,22 млн. грн у порівнянні з 5,2 млн грн. (силікатна цегла та утеплення пінопластом) і 5,02 млн. грн. (керамічний блок з пустотами для заповнення мінеральною ватою).

### **Висновки**

1. Визначено, що мінімальне значення коефіцієнту теплопровідності та найбільшого опору теплопередачі досягається при вологості кладки  $\omega=1,0\%$  у зразку керамічного блоку, що на 35% складаються з відходів виробництва мінеральної вати.

2. Встановлено, що запропонований склад керамічних блоків з використанням відходів виробництва мінеральної вати забезпечує високі теплоізоляційні властивості будівель та має низьку вартість, що робить будівельний матеріал конкурентоспроможним.

3. Отримані результати свідчать, що використання відходів виробництва мінеральної вати як наповнювача керамічних блоків (цегли) практично вирішує проблему утилізації цих відходів та істотно знизить антропогенний вплив на довкілля.

### **Список використаної літератури**

1. Сучасні будівельні матеріали і конструктивні системи для зведення доступного житла та об'єктів інфраструктури (монографія) / Пушкарьова К.К., Бамбура А.М., Дворкін Л.Й., Градобоев О.В., та ін. / Вік-Принт, – 2015, 280 с.

2. Сучасні українські будівельні матеріали, вироби та конструкції: науково-практичний довідник; авт. ідеї та кер. пр-ту І.М. Салій; за ред. К.К. Пушкарьової; Асоціація “Всеукр. союз виробників буд. матеріалів та виробів”. - Київ: ВСБМВ, 2012 . - 658 с.

3. ДСТУ Б В.2.7-80:2008 Будівельні матеріали. Цегла та камені силікатні. Технічні: Вид.офіц. Наказ від 25.12.2008 № 640. - К.: ДП "Український науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут будівельних матеріалів та виробів" (НДІБМВ), 2010. - 16 с.

4. Зарубина Л. П. Теплоизоляция зданий и сооружений. Материалы и технологии. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2012. - 416 с.

5. Протокол випробувань на теплопровідність каменів керамічних рядових крупноформатних :вик. Укр.наук.-досл. і проєкт.-констр. ін-том буд. мат. від 24 грудня 2015 р. № 15/53. Київ.

6. Маличенко В.А. Основы теплофизики будівель і енергозбереження. – Харків:САГА, 2006.

**A. Kryuchkov**, Cand. Eng. Sc., Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-2234-0546

**N. Zhukova**, Cand. Eng. Sc., **ORCID** 0000-0002-4215-6981

**S. Zaichenko**, Dr. Eng. Sc., Prof., **ORCID** 0000-0002-8446-5408

**V. Smoliar**, Eng., **ORCID** 0000-0002-0355-0353

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

## **PROVIDING HEAT SAVING OF BUILDING STRUCTURES WITH THE USE OF WASTE FROM THE PRODUCTION OF MINERAL WOOL AS A FILLER FOR CERAMIC BLOCKS**

*Today, the country faces the problem of recycling waste from the production of mineral wool. The article discusses a method for recycling waste from the production of mineral wool by adding them as a filler to ceramic blocks used in building structures. The proposed method of waste disposal of mineral wool production will allow not only to reduce the anthropogenic load on the environment and reduce the cost of its disposal, but also to increase the thermal insulation and strength properties of building structures. The purpose of the research is to substantiate the feasibility of adding mineral wool production waste to the composition of ceramic blocks or ceramic bricks. The dependence of the thermal insulation indicators of ceramic blocks on the content of mineral wool waste at various values of the moisture content of the masonry has been investigated.*

*The dependences of the coefficient of thermal conductivity and resistance to heat transfer on the content of waste mineral wool in the ceramic block have been established. The rational content of mineral wool production waste in the composition of ceramic blocks has been determined, which provides high thermal insulation properties of buildings and has a low cost, which makes the building material competitive.*

*The proposed method of waste disposal of mineral wool production is suitable for use in the production of both ceramic blocks and for the production of ceramic bricks.*

**Keywords:** *mineral wool production waste, utilization, ceramic blocks, heat-insulating properties*

#### REFERENCES

1. Suchasni budivelni materialy i konstruktyvni systemy dlia zvedennia dostupnogo zhytla ta ob'ektyv infrastruktury (monografya) / Pushkariova K.K., Bambura A.M., Dvorkin L.J., Gradoboev O.V. ta in. /Vik-Prynt, – 2015, 280 p.
2. Suchasni ukrainski budivelni materialy, vyroby ta konstrukcyi: naukovo-praktychny dovidnyk; avt. idei ta ker. pr-ty pr-ty I.M. Saliy; za red K.K. Pushkarevoi; Asosiacia “Vseukr. sous vyrobnykiv bud. Materialiv ta vyrobiv”. – Kyiv: BCBBMB, 2012. - 658 p.
3. DSTU B V. 2.7-80:2008 Budivelni materialy. Tsehla ta kameni sylikatni. Tehnichni: Vyd.ofic. Nakaz vyd 25.12.2008 № 640. - K.: DP “Ukrainskiy naukovo-doslidnyi i proektno-konstruktorskiy instytut bydivelnykh materialiv ta vyrobiv” (NDIBMV), 2010. - 16 p.
4. Zarubina L.P. (2012) Teploizolyatsia zdaniy i sooruzheniy. Materialy i tekhnologii. St. Petersburg: BHV-Petersburg. – 416 p.
5. Protokol vyprobuvan na teploprovodnist kameniv keramichnykh riadovykh krupnoformatnykh: вик. Ukr.nauk.-dosl. i proekt.-konstr. in-tom bud. mat. vid 24 grudnia 2015 r. № 15/53. Kyiv.
6. Maliarenko V.A. (2006) Osnovy teplofizyky budivel I energoberezhennya.–Kharkiv:SAGA.

Надійшла 21.06.2020  
Received 21.06.2020

# ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

## SUSTAINABLE ENERGY

УДК 620.92

Г.А. Глущенко, ORCID 0000-0001-7382-1537

В.В. Залозний, ORCID 0000-0002-7031-8861

А.К. Давиденко, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-6539-7406

АТ «ВНДІАЕН»

«Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут атомного та енергетичного насособудування»

### ДОСВІД ПРАКТИЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В УМОВАХ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Останнім часом у світі суттєво посилюється інтерес до нетрадиційних і поновлюваних джерел енергії. Україна має значний потенціал для розвитку альтернативної енергетики та впровадження сонячних електростанцій (СЕС) [1]. Ефективна експлуатація СЕС можлива при правильному виборі обладнання та розрахунку параметрів його встановлення. Якщо при виборі комплектуючих можна використовувати їх паспортні дані, заявлені виробником, то інформація, необхідна для визначення місця встановлення устаткування та його позиціонування в більшості випадків взагалі відсутня. Опубліковано багато робіт, присвячених оптимізації параметрів, які впливають на генерацію електроенергії і містять універсальні рекомендації для встановлення СЕС в різних регіонах України. Але всі вони мають в своїй основі лише теоретичні розрахунки. Після вступу в силу Закону України «Про ринок електричної енергії» [2] актуальним стало питання про необхідність прогнозування роботи електрогенеруючих потужностей. Особливу увагу привертають характеристики, отримані в ході реальних умов роботи. У даній роботі наводиться інформація, отримана під час практичної експлуатації СЕС номінальною потужністю 3,0 кВт, розташованої в м. Суми, за період жовтень 2018-жовтень 2020 року.

**Ключові слова:** інсоляція, сонячна електростанція, фотоелектричні панелі, акумуляторні батареї, інвертор, ефективність роботи.

**Вступ і постановка завдання.** Відповідно до зобов'язань в частині енергоефективності, взятих Україною на міжнародному рівні (Паризька угода 2015 року) [3], а також Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [4] до 2035 року заплановано значне збільшення (до 25 % від загальної) вироблення електроенергії з альтернативних джерел. На тлі постійно зростаючих тарифів на енергоносії в Україні питання пошуку альтернативних джерел електроенергії набуває особливої актуальності.

Таблиця 1 – Середньомісячне значення сонячної інсоляції в кВт·год/м<sup>2</sup>/день

Місяць	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	Середня за рік
Місто													
Миколаїв	1,25	2,10	3,07	4,38	5,65	5,85	6,03	5,34	3,93	2,52	1,36	1,04	3,55
Одеса	1,25	2,11	3,08	4,38	5,65	5,85	6,04	5,33	3,93	2,52	1,36	1,04	3,55
Херсон	1,30	2,13	3,08	4,36	5,68	5,76	6,00	5,29	4,00	2,57	1,63	1,04	3,55
Запоріжжя	1,21	2,00	2,91	4,20	5,62	5,72	5,88	5,18	3,87	2,44	1,25	0,95	3,44
Маріуполь	1,25	2,04	2,93	4,11	5,57	5,72	5,83	5,18	3,82	2,35	1,26	0,99	3,42
Кривий Ріг	1,23	2,02	2,95	4,20	5,57	5,55	5,77	5,12	3,81	2,45	1,25	0,99	3,41
Дніпро	1,21	1,99	2,98	4,05	5,55	5,57	5,70	5,08	3,66	2,27	1,20	0,96	3,36
Донецьк	1,21	1,99	2,94	4,04	5,48	5,55	5,66	5,09	3,67	2,24	1,23	0,96	3,34
Луганськ	1,23	2,06	3,05	4,05	5,46	5,57	5,65	4,99	3,62	2,23	1,26	0,93	3,34
Кропивницький	1,20	1,95	2,96	4,07	5,47	5,49	5,57	4,92	3,57	2,24	1,14	0,96	3,30

© Г.А. Глущенко, В.В. Залозний, А.К. Давиденко, 2020

Продовження табл. 1

Місто	Місяць												Середня за рік
	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	
Харків	1,19	2,02	3,05	3,92	5,38	5,46	5,56	4,88	3,49	2,10	1,19	0,90	3,26
Полтава	1,18	1,96	3,05	4,00	5,40	5,44	5,51	4,87	3,42	2,11	1,15	0,91	3,25
Черкаси	1,15	1,91	2,94	3,99	5,44	5,46	5,54	4,87	3,40	2,13	1,09	0,91	3,24
<b>Суми</b>	<b>1,13</b>	<b>1,93</b>	<b>3,05</b>	<b>3,98</b>	<b>5,27</b>	<b>5,32</b>	<b>5,38</b>	<b>4,67</b>	<b>3,19</b>	<b>1,98</b>	<b>1,10</b>	<b>0,86</b>	<b>3,16</b>
Ужгород	1,13	1,91	3,01	4,03	5,01	5,31	5,25	4,82	3,33	2,02	1,19	0,88	3,16
Вінниця	1,07	1,89	2,94	3,92	5,19	5,30	5,16	4,68	3,21	1,97	1,10	0,9	3,11
Київ	1,07	1,87	2,95	3,96	5,25	5,22	5,25	4,67	3,12	1,94	1,02	0,86	3,10
Хмельницький	1,09	1,86	2,87	3,85	5,08	5,21	5,04	4,58	3,14	1,98	1,10	0,87	3,06
Житомир	1,01	1,82	2,87	3,88	5,16	5,19	5,04	4,66	3,06	1,87	1,04	0,83	3,04
Чернігів	0,99	1,80	2,92	3,96	5,17	5,19	5,12	4,54	3,00	1,86	0,98	0,75	3,03
Рівне	1,01	1,81	2,83	3,87	5,08	5,17	4,98	4,58	3,02	1,87	1,04	0,81	3,01
Луцьк	1,02	1,77	2,83	3,91	5,05	5,08	4,94	4,55	3,01	1,83	1,05	0,79	2,99
Тернопіль	1,09	1,86	2,85	3,85	4,84	5,00	4,93	4,51	3,08	1,91	1,09	0,85	2,99
Івано-Франківськ	1,19	1,93	2,84	3,68	4,54	4,75	4,76	4,40	3,06	2,00	1,20	0,94	2,94
Чернівці	1,19	1,93	2,84	3,68	4,54	4,75	4,76	4,4	3,06	2,00	1,20	0,94	2,94
Львів	1,08	1,83	2,82	3,78	4,67	4,83	4,83	4,45	3,00	1,85	1,06	0,83	2,92

За інформацією Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України [5] найбільш привабливими регіонами України для використання і перетворення енергії сонця і вітру є Одеська, Херсонська та Миколаївська області. У той же час, середньорічний рівень інсоляції (кількість сонячної радіації, що поступає на 1 м<sup>2</sup> поверхні, що розташована перпендикулярно до сонячних променів за один світловий день) Сумської області становить 3,16 кВт·год/м<sup>2</sup>/день, при цьому впродовж травня-серпня його величина зростає до 5,3 кВт·год/м<sup>2</sup>/день (табл. 1) [6].

Середньорічний обсяг електроенергії, що виробляється електростанцією номінальною потужністю 3,0 кВт, може скласти 3500 кВт·год/рік. Цей показник можна порівняти з показниками більшості країн Західної Європи, де активно розвивається сонячна енергетика (рис. 1).

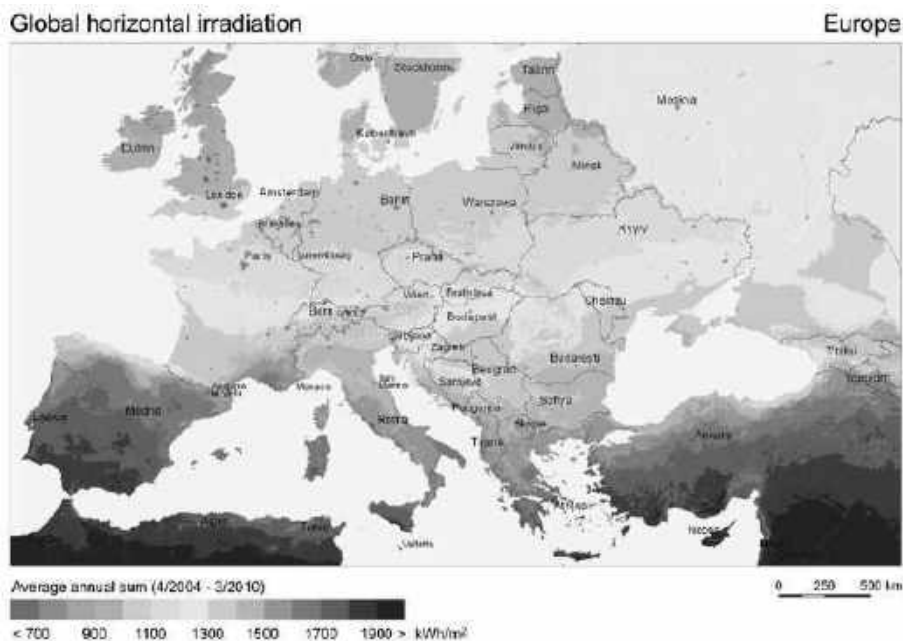


Рисунок 1 – Розподіл сонячної радіації по країнам Європи

З огляду на вищевикладене, враховуючи наявний кадровий і технічний потенціал, в 2017 році АТ «ВНДІАЕН» активно включилось в розробку і впровадження обладнання, що використовує альтернативні джерела енергії. Співробітниками інституту було проаналізовано вітчизняний та зарубіжний досвід

використання аналогічного обладнання [7, 8], а також вивчена теоретична можливість і доцільність його застосування в умовах Сумської області [9]. Як результат, власними силами була розроблена, змонтована на даху інженерного корпусу і введена в експлуатацію в 2018 році сонячна електростанція номінальною потужністю 3,0 кВт (в 2019 році її потужність збільшена до 4,0 кВт). Склад обладнання, що входить до складу СЕС АТ «ВНДІАЕН» наведено в табл. 2.

Таблиця 2 - Склад обладнання СЕС

№ з/п	Найменування	Кількість, шт.
1	Фотоелектрична панель RISEN RSM72-6-340M 5BB, 340 Вт (монокристал)	9
2	Фотоелектрична панель Altek ALM72-6-365M 5BB, 365 Вт (монокристал)	3
3	Інвертор Altek PV18-5K МПК, 4000 Вт/48 В	1
4	Акумуляторна батарея Alva battery AS12-100 GEL	4

Конфігурація обладнання підбиралась з огляду на його електричні характеристики, можливості встановлення та безпечної експлуатації. При цьому, основними завданнями були: отримати досвід експлуатації СЕС в умовах Сумської області, оцінити реальні показники генерації електричної енергії і терміни окупності устаткування СЕС. В якості споживача електроенергії, що генерується СЕС, була обрана серверна АТ «ВНДІАЕН» (розрахункова споживана потужність - 2,4 кВт), цілодобове безперебійне живлення якої повинне забезпечуватись в денний час за рахунок сонячної енергії, в нічний час за рахунок енергії, накопиченої в акумуляторних батареях (далі АКБ).

Можливість передачі електроенергії в централізовану мережу за «зеленим» тарифом не розглядалась, тому що основна умова «зеленого» тарифу - обсяг виробленої електроенергії повинен бути більше, ніж обсяг електроенергії, спожитої з мережі на власні потреби. Враховуючи потужність СЕС та обсяги споживання електричної енергії АТ «ВНДІАЕН», можливості використання «зелених тарифів» відсутні.

**Виклад основного матеріалу.** Згідно з дослідженням залежності генерації електроенергії фотоелектричними панелями від їх орієнтації по сторонах світу і кута нахилу [10, 11] оптимальними умовами для розміщення ФП є:

100% доступ до сонячного світла (відсутність дерев і будівель, що затінюють ФП);  
орієнтація ФП точно на південь;

встановлення ФП під кутом до горизонту, рівним значенню широти місцевості; при цьому взимку до цього значення рекомендується додавати, а влітку - віднімати 10-15 градусів.

З огляду на практичні рекомендації, а також враховуючи розташування інженерного корпусу АТ «ВНДІАЕН», встановлення ФП на опорних конструкціях проводилось з орієнтацією робочої поверхні ФП на південь (рис. 2).



Рисунок 2 – Фотоелектричні панелі на опорних конструкціях

Для забезпечення можливості максимально ефективного використання положення Сонця протягом року в опорних конструкціях були застосовані розсувні опорні стійки власної розробки (рис. 3), що дозволяють отримати кути нахилу ФП від 35 ° до 55 ° з кроком 5 °. Виходячи з географічних координат

міста Суми (50,48° пн.ш., 34,97° с.д.), в зимовий час ФП встановлювалися з кутом нахилу в 50°, в літню пору ФП кут нахилу був мінімальним - 35°.

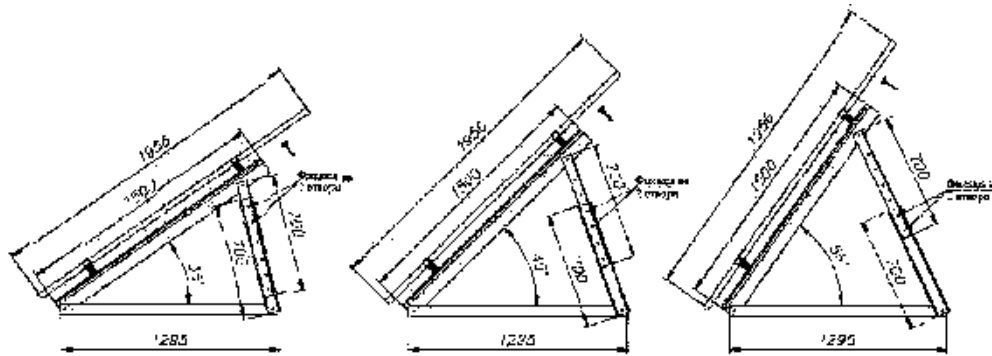


Рисунок 3 – Схема розсувних опорних стійок

З метою мінімізації втрат напруги, що виникають при передачі електроенергії [12], інвертор і АКБ були розташовані в безпосередній близькості до ФП, а саме - в спеціально обладнаному приміщенні, що знаходиться на технічному поверсі інженерного корпусу АТ «ВНДІАЕН». Безперервний збір і накопичення інформації про роботу СЕС забезпечувався відповідним програмним забезпеченням, встановленим на комп'ютер, підключений до інвертора. Періодично бази даних копіювались і конвертувались в формат електронних таблиць (xls) для подальшого аналізу і статистичної обробки.

Експлуатація СЕС розпочалась 12 жовтня 2018 року, коли після проведення налагоджувальних робіт та тестових випробувань до СЕС були підключені комп'ютерні сервери. За результатами вимірювань потужності, що споживається комп'ютерним обладнанням, яке знаходиться в серверній, з'ясувалося, що її реальна величина становить лише 0,8 кВт. При цьому максимальна сумарна споживана потужність, розрахована відповідно до паспортних даних обладнання, що бралась до уваги при виборі комплектуючих для СЕС, становила 2,4 кВт.

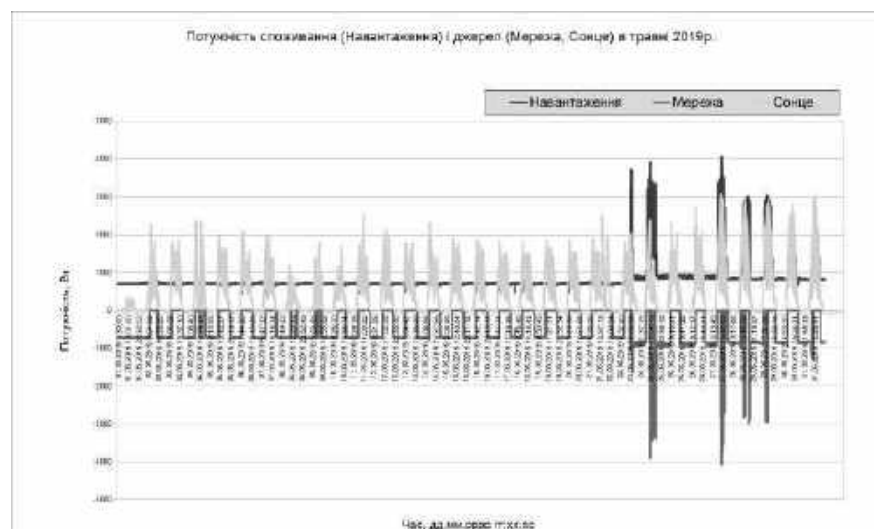


Рисунок 4 – Зростання потужності навантаження СЕС за рахунок підключення додаткових споживачів, травень 2019

Промислову експлуатацію СЕС протягом 2018-2019 рр. можна розділити на наступні етапи:

- 1) з 12.10.2018 задіяно 9 ФП сумарною номінальною потужністю 3,06 кВт, навантаження ~ 0,8 кВт (серверна), зимове положення СП (кут нахилу - 50°);
- 2) з 18.04.2019 літнє положення СП (кут нахилу - 35°);
- 3) з 23.05.2019 до навантаження додатково підключено 10 комп'ютерів, сумарне навантаження в денний час складає ~ 1,5 кВт (рис. 4);

- 4) з 24.06.2019 споживана потужність збільшена до 2,0 кВт (додатково підключені 8 комп'ютерів);
- 5) з 16.07.2019 додатково підключені ще 3 ФП (1,095 кВт), номінальна генерована потужність СЕС збільшилась до 4,15 кВт;
- 6) з 07.10.2019 зимове положення СП (кут нахилу - 50 °).

Проведемо аналіз ефективності роботи основних компонентів СЕС, а саме - фотоелектричних панелей, акумуляторних батарей і інвертора.

Фотоелектричні панелі.

Спочатку номінальна генеруюча потужність СЕС становила 3,06 кВт (9 панелей по 340 Вт кожна). У липні 2019 року після підключення додаткових 3-х панелей номінальна генеруюча потужність СЕС збільшилась до 4,15 кВт. У той же час, максимальне зафіксоване значення генеруючої потужності склало лише 3,44 кВт (як при використанні 9 батарей, так і при 12 батареях) (рис. 5, 6). Це пояснюється обмеженням зарядного струму (не більше 60 А), передбаченим в даній моделі інвертора. Тому, збільшення площі СП не привело до істотного зростання електричних характеристик СЕС, воно лише дозволило підвищити ефективність роботи СЕС в умовах низької освітленості.

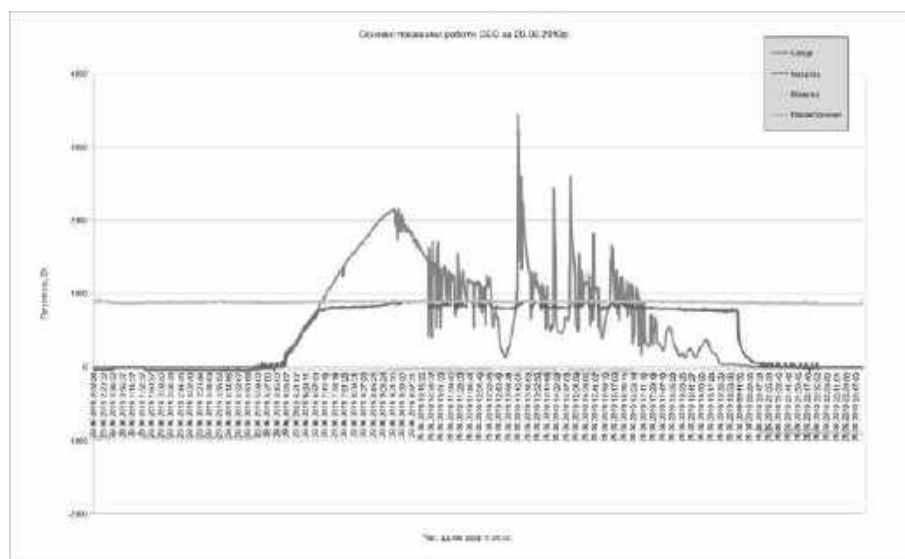


Рисунок 5 – Максимальна потужність, отримана при використанні 9-ти фотоелектричних панелей 29.06.2019 р

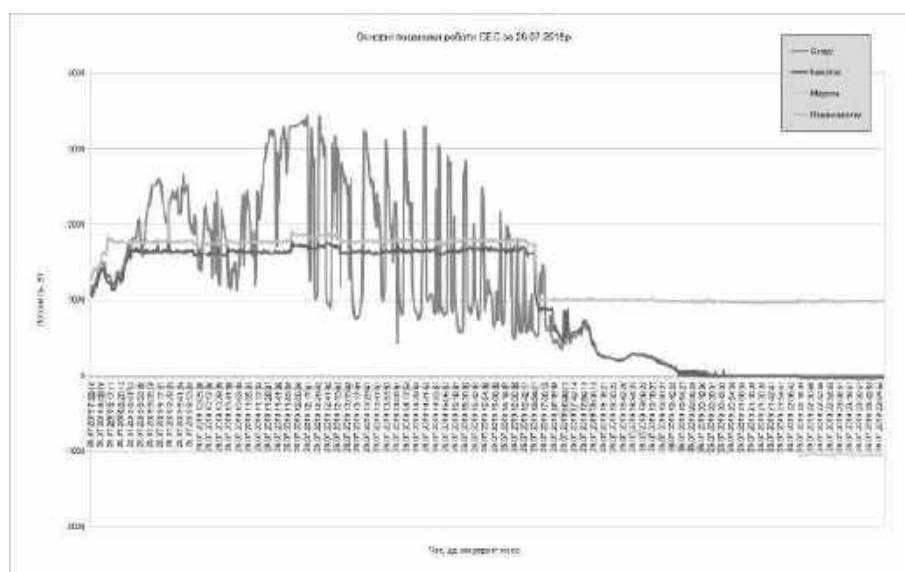


Рисунок 6 – Максимальна потужність, отримана при використанні 12-ти фотоелектричних панелей 26.07.2019 р

Під час експлуатації з'ясувалось, що на характеристики роботи СЕС істотно впливає ступінь освітленості ФП, який в свою чергу залежить від пори року і погодних умов. Сам принцип отримання енергії від Сонця передбачає нерівномірність цього процесу як протягом доби, так і протягом року. Отримана від ФП енергія змінюється від нульової (в темний час доби) до максимальної величини (в сонячний день опівдні). Відповідно, є період доби, коли сонячної енергії недостатньо для живлення споживачів і зарядки АКБ і є період доби, коли спостерігається надлишок сонячної енергії.

Істотне зниження потужності генерації енергії спостерігається в похмуру погоду, а також в умовах дощу і снігопаду. Накопичення снігу на ФП зменшує освітлювану площу і знижує генерацію електроенергії. Слід зазначити, що в сонячний зимовий день спостерігається ефект самоочищення ФП від снігу, тому що при генерації електроенергії температура робочої поверхні ФП зростає, сніг тане і спливає з робочої поверхні ФП. Позитивну роль в цьому процесі відіграє також збільшення на зимовий період кута нахилу ФП.

#### Акумуляторні батареї.

Основним елементом, який дозволяє забезпечувати безперебійну подачу живлення на пристрої навантаження, є АКБ. У даній СЕС використовуються 4 гелеві акумуляторні батареї номінальною ємністю 100 А·год і напругою 12 В. Сумарний розрахунковий запас енергії становить 4,8 кВт·год. Експлуатація показала, що у вечірній час, коли сонячної енергії недостатньо, наявні АКБ дозволяють забезпечувати автономне живлення споживачів потужністю 0,8 кВт близько трьох годин, після чого проводиться автоматичне перемикання на живлення від централізованої мережі.

Досвід практичної експлуатації показує, що в умовах достатньої освітленості (літні місяці року) АКБ використовуються ефективно. Але в умовах низької освітленості (зимові місяці року) сонячної енергії недостатньо ні для живлення споживачів, ні для заряду АКБ. У цьому разі АКБ істотно знижують ефективність системи в цілому - щоб не допустити повного розряду, вони постійно заряджаються від централізованої мережі. При цьому, збільшення ємності АКБ призводить до пропорційного збільшення втрат.

Таким чином, якщо головним пріоритетом використання СЕС є забезпечення цілодобового і цілорічного автономного живлення, то треба бути готовим до того, що розрахункова потужність компонентів сонячної установки повинна значно перевищувати розрахункову потужність необхідного навантаження. При цьому слід враховувати, що сумарна потужність АКБ повинна забезпечувати живлення розрахункового навантаження протягом доби, головним чином в темний час, а потужність ФП повинна бути достатньою для забезпечення живлення розрахункового навантаження і зарядки АКБ в найтемніший період року. Такий режим експлуатації, а саме пріоритет цілодобового і цілорічного автономного живлення, передбачає високу вартість СЕС. Оскільки при подібному розрахунку СЕС повинна працювати на номінальне навантаження в найтемніший період року, весь інший час буде спостерігатись надлишок виробленої електроенергії. Найбільш доцільним в такій ситуації буде продаж надлишку електроенергії, що виробляється, в централізовану мережу із застосуванням «зеленого» тарифу.

За наявності стабільної електричної мережі, якщо питання автономності живлення не є визначальним, цілком можливий режим експлуатації, коли розрахункова потужність компонентів СЕС вибирається порівняно з номінальним розрахунковим навантаженням. У цьому випадку в літні місяці будуть спостерігатись надлишки електроенергії, що виробляється, а в зимові місяці недостатня енергія буде споживатись від централізованої мережі.

#### Інвертор.

Інвертор, що використовується у складі СЕС, має спеціальне програмне забезпечення для комп'ютера (далі ПЗ) (рис. 7), яке дозволяє вести оперативний контроль за станом обладнання і процесами перетворення енергії в СЕС. В процесі роботи ПЗ накопичує на комп'ютері базу даних параметрів СЕС. Конфігурація інвертора передбачає тільки кілька основних накопичувальних параметрів, значення яких зберігаються в пам'яті самого інвертора і відображають характеристики наростаючим підсумком з початку експлуатації інвертора. Контроль поточних параметрів, а також налаштування і вибір режимів роботи інвертора можна проводити безпосередньо на дисплеї інвертора.

Застосований інвертор має чотири встановлені режими роботи, які визначають алгоритми живлення споживачів і зарядки АКБ. У найменуванні кожного режиму відображені пріоритети вибору джерела для живлення споживачів. Кожен режим має свої переваги і недоліки. Жоден з них не є ідеальним для вирішення завдань ефективною експлуатації СЕС.

#### *Режим 1 (SUB – Solar, Utility, Battery - Сонце, Мережа, АКБ).*

Сонячна енергія забезпечує живлення споживачів першою за пріоритетом. Якщо сонячної енергії недостатньо для живлення споживачів, до нього одночасно підключається живлення від централізованої мережі. АКБ живить споживачів тільки при відсутності живлення від мережі. За відсутності сонячної енергії АКБ буде заряджатись від мережі, поки його напруга не досягне максимальної уставки. Якщо при наявності



енергії від ФП напруга АКБ нижче мінімальної уставки, вона заряджатиметься від мережі, поки напруга АКБ не досягне значення мінімальної уставки (для захисту АКБ від пошкодження).

Переваги: Сонце використовується першим за пріоритетом, високий ступінь готовності АКБ на випадок відключення мережі.

Недоліки: АКБ заряджається переважно від централізованої мережі та цілодобово підтримується в стані максимального заряду, але фактично не використовується в схемі живлення в умовах постійної наявності мережі.



Рисунок 7 – Вікно програмного забезпечення, що поставляється з інвертором

*Режим 2 (SBU – Solar, Battery, Utility – Сонце, АКБ, Мережа).*

Сонячна енергія забезпечує живлення споживачів першою за пріоритетом. Якщо сонячної енергії недостатньо для живлення споживачів, одночасно підключається живлення споживачів від АКБ. Централізована мережа забезпечує живлення споживачів тільки в тому випадку, коли напруга АКБ зменшується нижче мінімальної уставки, або якщо енергії від ФП та АКБ недостатньо.

Графік, що відображає роботу інвертора в режимі SBU, наведено на рис. 8.

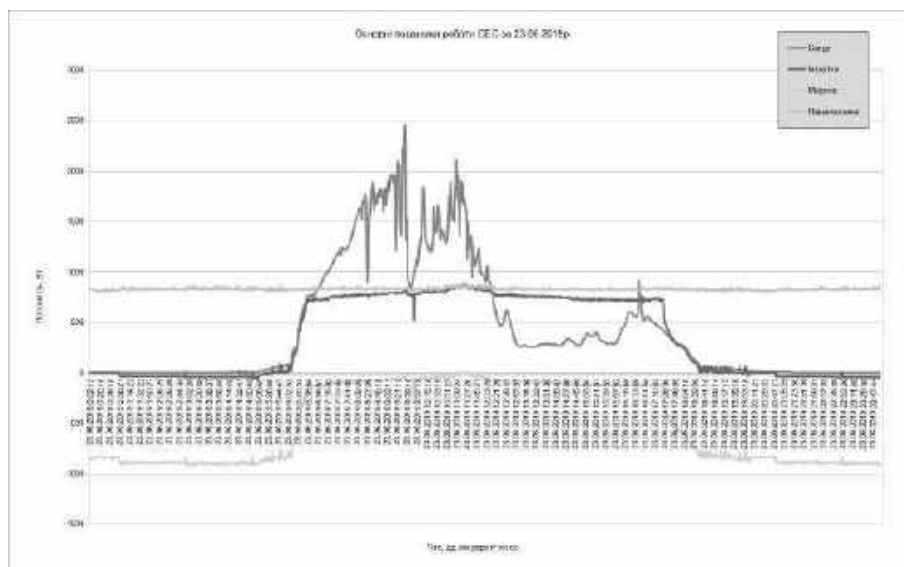


Рисунок 8 – Робота інвертора в режимі SBU

Режим 2 SBU має два підрежими, які визначають пріоритет споживання отриманої енергії:

- **BLU** – **B**attery, **L**oad, **U**tility – АКБ, Навантаження (Споживачі), Мережа);
- **LBU** – **L**oad, **B**attery, **U**tility – Навантаження (Споживачі), АКБ, Мережа).

АКБ буде подавати живлення на пристрої навантаження у разі відсутності енергії від мережі, або якщо напруга АКБ перевищує максимальну уставку (якщо вибрано підрежим BLU) або перевищує мінімальну уставку (якщо вибрано підрежим LBU). Якщо у разі наявності енергії від ФП напруга АКБ нижче мінімальної уставки, вона буде заряджатися від централізованої мережі.

Переваги: Сонце використовується першим за пріоритетом, схема живлення пристроїв навантаження (споживачів) збалансована – одночасно задіяні ФП, АКБ і централізована мережа електропостачання. АКБ заряджається від ФП і активно задіяна у схемі живлення. Режим забезпечує живлення споживачів без перемикачів. Оптимальний режим для використання в умовах змінної (сонячно / хмарно) погоди.

Недоліки: навіть в яскравий сонячний день використовується незначна частка енергії від централізованої мережі.

### Режим 3 (SOL – Solar – Сонце).

У темний час доби живлення споживачів здійснюється від електричної мережі в режимі байпаса. З появою Сонця починається зарядка АКБ. Якщо напруга АКБ перевищує максимальну уставку протягом 5 хвилин, і енергія від ФП доступна протягом 5 хвилин, інвертор перемикається в режим автономного живлення споживачів. ФП і АКБ подають енергію на навантаження одночасно, при цьому в першу чергу живлення здійснюється від ФП. Коли напруга АКБ знижується до рівня мінімальної уставки, інвертор перемикається в режим байпаса, енергія на навантаження подається тільки з електричної мережі, одночасно ФП заряджає АКБ. Робота інвертора в режимі SOL показана на рис. 9.

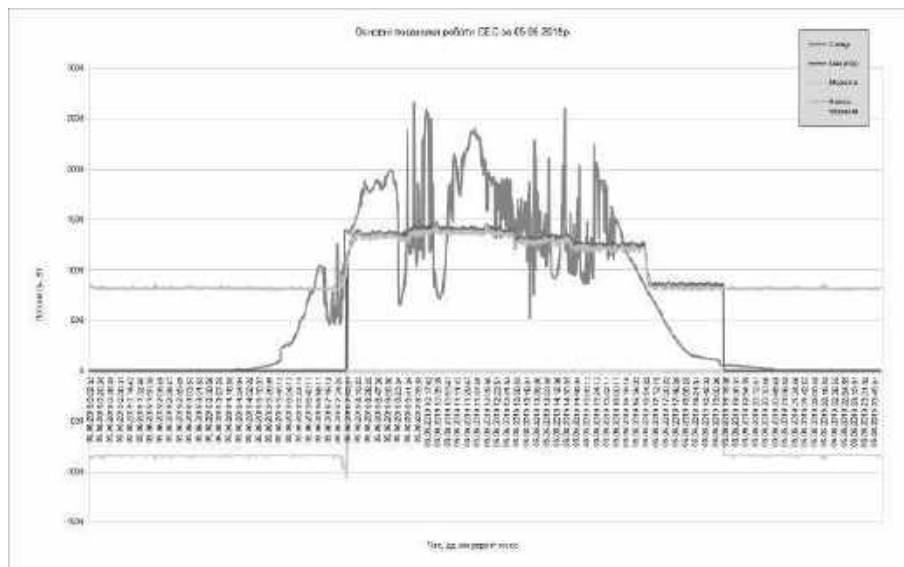


Рисунок 9 – Робота інвертора в режимі SOL

Переваги: у разі достатніх ресурсів ФП і АКБ, інвертор забезпечує автономне живлення споживачів. У світлий час доби централізована електрична мережа взагалі виключається зі схеми живлення, АКБ заряджаються від ФП і активно беруть участь в схемі живлення. Найбільш економічний режим для використання у сонячний період року.

Недоліки: при відключенні від централізованої мережі і переході на автономне електропостачання релейна схема живлення супроводжується короткочасним розривом подачі енергії на навантаження (1-2 рази на добу).

### Режим 4 (UTI – Utility – Мережа).

В першу чергу енергія на навантаження подається від централізованої електричної мережі. ФП і АКБ подають енергію на навантаження тільки у разі відсутності енергії від електричної мережі.

Переваги: висока готовність системи до “зникнення” мережі і автономного живлення.

Недоліки: ФП і АКБ працюють вкрай неефективно. Використання СЕС у цьому режимі при постійній наявності мережі економічно невиправдано.

При виборі моделі інвертора для комплектації конкретної СЕС основними визначальними параметрами були його потужність і можливість роботи з мережею та акумуляторами (MPPT). Тому,

різноманітність режимів роботи інвертора і неможливість їх ручного налаштування не брались до уваги. Але, як показала експлуатація, при заявленій виробником номінальній потужності інвертора 4 кВт, фактичний її показник становить лише 3,4 кВт, додаткова потужність навантаження забезпечується від мережі.

З огляду на вищевикладене, при формуванні структури СЕС і виборі інвертора для неї слід ретельно аналізувати можливості пропонувані моделей і їх характеристики.

#### Навантаження.

Одним з факторів, що істотно впливають на ефективність роботи СЕС, є потужність підключеного навантаження. На початковому етапі робіт зі створення СЕС єдиними споживачами отриманої електроенергії передбачалися комп'ютерні сервери АТ «ВНДІАЕН». Але проведені заміри згенерованої (~ 3,0 кВт) і фактично споживаної серверами (~ 0,8 кВт) потужностей дозволили зробити висновок про можливість і необхідність підключення до СЕС додаткових споживачів.

Якщо АКБ досягають стану повного заряду, енергія що отримується від ФП, обмежується обсягом енергії, споживаної навантаженням, і не може суттєво перевищувати її. При цьому повний заряд АКБ в сонячні дні зазвичай відбувається до 11.00. Якщо потужність навантаження недостатня, то в найпродуктивніші години доби спостерігаються втрати, сонячна енергія залишається невикористаною (рис. 10). У той же час, при недостатньому освітленні, коли генерація електроенергії є мінімальною, для живлення пристроїв навантаження і підзарядки акумуляторів інвертор споживає енергію з централізованої мережі, перетворюючи при цьому змінний струм в постійний.

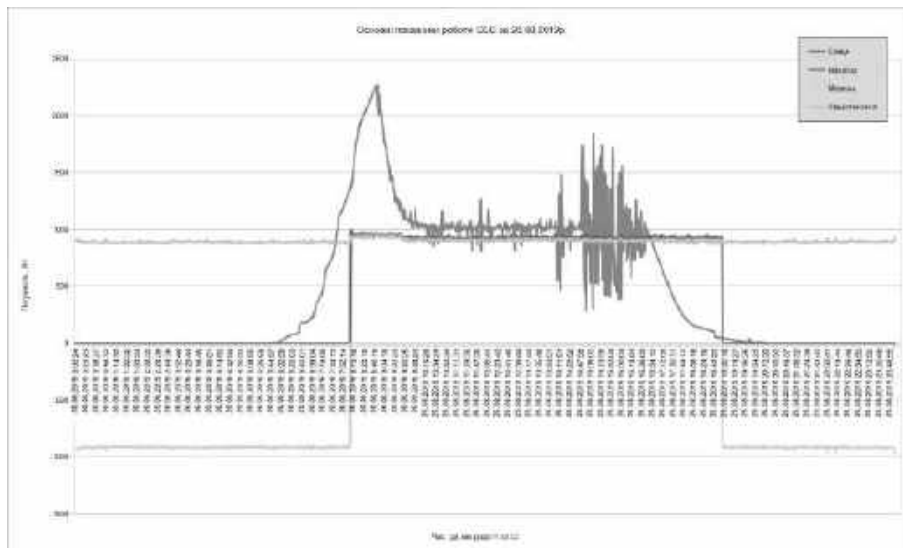


Рисунок 10 – Втрати при недостатньому навантаженні і заряджених АКБ

Тому, для отримання максимальної економічної ефективності СЕС доцільно використовувати навантаження змінної потужності з можливістю її варіювання, як протягом року, так і протягом доби. Також, одним із шляхів підвищення ефективності роботи СЕС є використання обладнання, що має можливість передачі надлишків виробленої енергії безпосередньо в централізовану мережу. Тим більше, що чинним законодавством України передбачена можливість такої передачі з використанням «зелених тарифів».

Щоб оцінити роботу СЕС за весь період експлуатації, на основі накопичувальних параметрів сформована загальна підсумкова річна діаграма вироблення і споживання електроенергії (рис. 11).

Крім того, був застосований додатковий розрахунковий параметр, який дозволив оцінити економію в розрізі кВт·год і в грн. (з урахуванням фактичних тарифів на електроенергію) і втрати на перетворення енергії. Різниця між кількістю енергії, спожитої навантаженням (споживачами), і кількістю енергії, отриманої з централізованої мережі, визначає розмір економії в кВт·год. Застосувавши до цього показника фактичні тарифи на електроенергію, отримаємо економію в грошовому еквіваленті.

Показники роботи СЕС по місяцях 2019 року представлені на рис. 12. Як видно з діаграми, найпродуктивнішим місяцем виявився липень, в якому було отримано 454,6 кВт·год, найнижчий обсяг електроенергії було вироблено в січні – 30,3 кВт·год.

Проаналізувавши наведені вище показники генерації електроенергії протягом календарного року, можна зробити висновок про практичне підтвердження інформації щодо середньомісячних (в розрізі року) рівнів інсоляції Сумської області, її циклічності, а також про періоди максимальних і мінімальних показників.

**Висновки.** Навіть при відносно низькому рівні інсоляції Сумської області (в порівнянні з іншими областями України), використання сонячних електростанцій в якості джерела альтернативної енергії, цілком виправдано як з технічної, так і з економічної точки зору.

Технології виготовлення обладнання для альтернативної енергетики постійно вдосконалюються, потужності сонячних панелей збільшуються, вартість комплектуючих зменшується. Це, в свою чергу, призводить до скорочення термінів окупності фінансових інвестицій в сонячну енергетику.

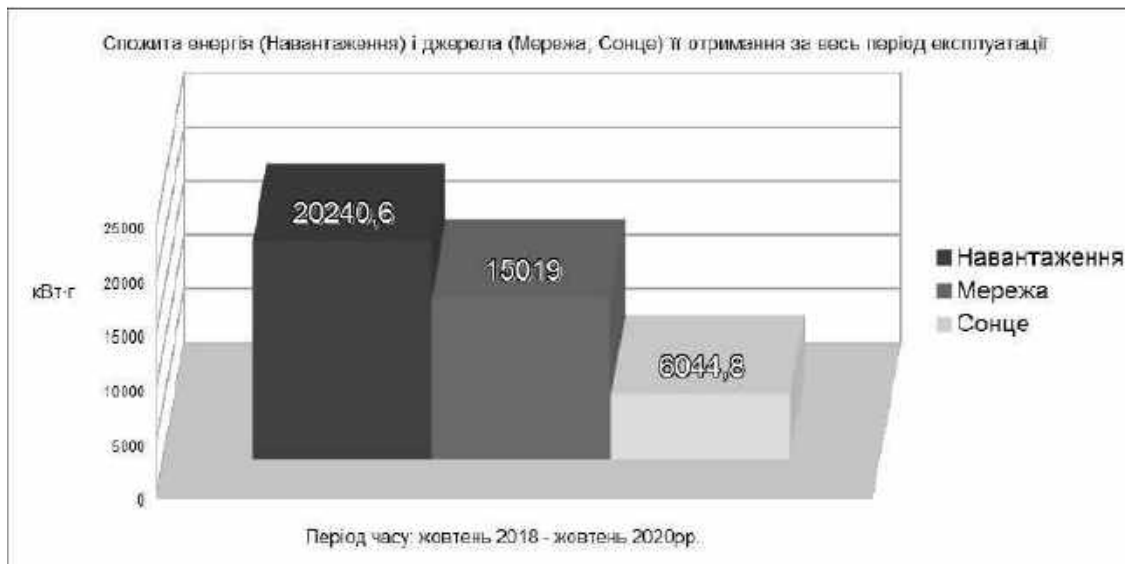


Рисунок 11 – Показники вироблення і споживання електроенергії за рік

Якщо пріоритетним завданням при створенні СЕС є швидка окупність і подальше отримання прибутку, слід обов'язково передбачати можливість продажу згенерованої електроенергії до централізованої мережі із застосуванням «зеленого» тарифу, розмір якого на сьогоднішній день складає 0,18 євро / кВт·год для приватних домогосподарств та 0,164 євро / кВт·год для юридичних осіб [13]. Також, доцільно використовувати інвертор більшої потужності, який при цьому має можливість передачі надлишків електроенергії в централізовану мережу. У цьому випадку, за умов наявності стабільної мережі, можлива повна відмова від АКБ з метою здешевлення системи.



Рисунок 12 – Показники роботи СЕС по місяцях

Крім економічної складової оцінки роботи альтернативних джерел енергії також необхідно враховувати той факт, що використання СЕС в якості джерела електроживлення дозволяє не тільки

забезпечити безперебійне живлення споживачів, але і значно поліпшити якість самої електроенергії (відсутність стрибків напруги, частоти і т.п.), що відіграє важливу роль у живленні електроприладів і особливо комп'ютерної техніки.

#### Список використаної літератури

1. Закон України “Про ринок електричної енергії” [Електронний ресурс] // ВВР, №27-28 - 2017. - Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2019-19>.
2. Кудря С.О. та ін. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України.-К., 2001. Інститут електродинаміки Національної академії наук України. - 41с.
3. 2030 Agenda for Sustainable Development [Електронний ресурс] // UN. - 2018 - Режим доступу до ресурсу: <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>.
4. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 року № 605-р. [Електронний ресурс] //Міністерство енергетики України. - 2017.- Режим доступу до ресурсу: [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).
5. Сайт державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України <https://saee.gov.ua/uk/ae/sunenergy>.
6. Дані сонячної інсоляції для міст України.[Електронний ресурс]//Solar-Tech. - 2019. - Режим доступу до ресурсу: <https://solar-tech.com.ua/fannye-solnechnoi-insolyacii-dlya-gorodov-ukrainy-2013-06-09.html>.
7. Дубинин Д.В., Лаевский В.Е. Энергетическая эффективность работы солнечных батарей в реальных режимах эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 3. – С. 58-62.
8. Саврасов Ф.В., Ковалев И.К. Исследование эффективности работы солнечной батареи в полевых условиях // Энергетика. – 2012. – Т. 321, № 4 – С. 165-168.
9. Как превратить Солнце в источник электроэнергии и заработка? Сумчанин делится опытом. [Електронний ресурс] // Life Sumy. – 2017. - Режим доступу до ресурсу: <https://life.sumy.ua/kak-prevratit-solnce-v-istochnik-elektroenergii-sumchanin-delitsya-opytom/>.
10. Гаевский А.Ю, Ушкаленко О.В. Определение оптимальных углов наклона фотоэлектрических панелей // Відновлювана енергетика. - 2016. № 1. - С.21-27.
11. Northern Alberta Institute of Technology Solar Photovoltaic Reference Array Report – March 31, 2015. [Електронний ресурс] // City of Edmonton/NAIT Reference System. - 2019. - Режим доступу до ресурсу: <https://solaralberta.ca/sites/default/files/NAIT%20Reference%20Array%20Report.pdf>.
12. Матвієнко М.П. Основы электротехники. Підручник. - К.: Видавництво Ліра-К, 2017. - 228 с.
13. Закон України “Про альтернативні джерела енергії” [Електронний ресурс] // ВВР, №24 - 2003. - Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#n143>.

**H. Hlushchenko, ORCID 0000-0001-7382-1537**

**V. Zaloznyi, ORCID 0000-0002-7031-8861**

**A. Davydenko, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-6539-7406**

**JSC Research and Design Institute for Atomic and Power Pumpbuilding**

## **PRACTICAL EXPERIENCE OF SOLAR POWER PLANT IN THE SUMY REGION**

*To meet the increasing demand for energy resources, interest in alternative and renewable energy sources has increased significantly around the world. Ukraine has a high potential for the development of alternative energy, one of which is the implementation of solar power plants (SPP) [1]. It should be noted that efficient operation of the SPP is not feasible without the appropriate selection of equipment and correct calculation of its installation parameters (location, orientation, tilt angle of photovoltaic panels (PV panels), etc.), which, in turn, must take into account a number of factors and features specific to each region of Ukraine. While selecting the components we can use their certificate data, stated by the manufacturer, but the information necessary to determine the location of installation of equipment and its position in most cases is absent. Today, there are many papers concerning the optimization of parameters that affect electric energy generation and contain broad recommendations for the installation of the SPP in different regions of Ukraine. But they all have only theoretical calculations. Since the Law of Ukraine "On the Electricity Market" came into force [2], the issue of the necessity to predict the operation of electric energy generating capacities also became topical. It is impossible to obtain an accurate prediction of the*

*SPP electric energy generation using only the certificate data of its equipment. Therefore, special attention is paid to the characteristics obtained during the actual working conditions. This paper presents information obtained during the practical operation of the SPP with a nominal power of 3.0 kW located in Sumy, for the period from October 2018 to October 2019.*

**Keywords:** solar irradiation, solar power plant, photovoltaic panel, rechargeable batteries, inverter, efficiency.

#### REFERENCES

1. Law of Ukraine “On the Electricity Market [Electronic resource]//BBP, No.27-28, 2017. - Access to recourse: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2019-19>.
2. Kudria, S.O. (2001). Atlas of Energy Potential of Renewable and Unconventional Energy Sources of Ukraine, The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv.
3. 2030 Agenda for Sustainable Development [Electronic resource] // UN. - 2018 – Access to recourse: <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>.
4. The Energy Strategy of Ukraine for the period until 2035 "Security, Energy Efficiency, Competitiveness" approved by Order No. 605-p of 18 August 2017 of the Cabinet of Ministers of Ukraine [Electronic resource] //Ministry of Energy of Ukraine.- Access to recourse: [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).
5. Website of the State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine <https://saee.gov.ua/uk/ae/sunenergy>.
6. Solar Irradiation of Cities of Ukraine [Electronic resource]//Solar-Tech. - 2019. - Access to recourse: <https://solar-tech.com.ua/fannye-solnechnoi-insolyacii-dlya-gorodov-ukrainy-2013-06-09.html>.
7. Dubinin D.V., Laevskiy V.Ye. (2015). Energy Efficiency of Solar Batteries Under Real Operating Conditions //Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Vol. 326, No. 3, pp. 58-62.
8. Savrasov F.V., Kovalev I.K. (2012). Studying the Efficiency of Solar Battery Under Field Condition // Energetics, Vol. 321, No 4, pp. 165-168.
9. How Can We Convert the Sun into a Source of Energy and Income? Sumy Resident Shares his Experience. [Electronic resource] // Life Sumy. – 2017. –Access to recourse: <https://life.sumy.ua/kak-prevratit-solnce-v-istochnik-elektroenergii-sumchanin-delitsya-opytom/>.
10. Gaevskii, A.Yu., Ushkalenko, O.V. (2016). Determination of Optimal Tilt Angles of Photovoltaic Panels. Renewable Energy, No.1, pp.21-27.
11. Northern Alberta Institute of Technology Solar Photovoltaic Reference Array Report – March 31, 2015. [Electronic resource] // City of Edmonton/NAIT Reference System. - 2019. - Access to recourse: <https://solaralberta.ca/sites/default/files/NAIT%20Reference%20Array%20Report.pdf>.
12. Matvienko, M.P. (2017). Fundamentals of Electrical Engineering. Handbook. Lira-K, Kyiv.
13. Law of Ukraine “On Alternative Energy Sources” [Electronic resource]//BBP, No.24, 2003. - Access to recourse: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#n143>.

Надійшла 22.06.2020

Received 22.06.2020

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

УДК 621.313.322

**В.І. Хоменко**, канд. техн. наук, викладач вищої категорії, ORCID 0000-0003-0722-2573

**В.Б. Нізімов**, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-4580-5262

Придніпровський державний металургійний коледж, м Кам'янське  
Дніпровський державний технічний університет, м Кам'янське

## ОСОБЛИВОСТІ РЕЖИМІВ ЗБУДЖЕННЯ АВТОНОМНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ЗНАЧНИХ ЗБУРЕННЯХ

*Підвищення надійності живлення споживачів співставної потужності від автономної генеруючої установки у динамічних режимах накиду співставного навантаження досягається за рахунок форсування збудження із застосуванням смісних накопичувачів енергії і встановлення закономірностей та залежностей їх впливу на режими роботи синхронних генераторів. Досліджено вплив смісного накопичувача енергії в контурі збудження синхронного генератора на підвищення стійкості роботи автономної генеруючої установки. Запропоновано і обґрунтовано алгоритм керування контуром збудження генеруючої установки, з урахуванням зміни силової схеми та вмикання смісних елементів в інерційний контур.*

*Дослідженнями доведено, що параметри контуру збудження суттєво впливають на стійкість синхронного генератора та стабілізацію вихідної напруги. Доведено, що при одній і тій самій кратності найбільшої напруги збуджувача швидкодія даного пристрою в режимі форсування збудження приблизно в 20 разів вища, ніж традиційних систем збудження. Дослідженнями встановлено, що схема з примусовою смісною комутацією дозволяє надійно вимикати збуджувач у випадку пошкодження елементів останнього.*

**Ключові слова:** автономна генеруюча установка, режим збудження, динамічна стійкість.

### Вступ

Основним режимом роботи синхронних генераторів автономних генеруючих установок є режим, близький до номінального. У генеруючих установках (ГУ) для промислового виробництва електроенергії, які працюють в енергосистемі, підключення споживачів співставної потужності є малоймовірним.

На відміну від промислових ГУ особливістю зазначених генеруючих установок є їх автономність, тому у випадку стихійних лих і природних катастроф при підключенні споживачів співставної потужності вони втрачають стійкість через інерційність контуру збудження та значного динамічного падіння напруги, що призводить до відключення попередньо підключених споживачів.

Незважаючи на високу швидкодію тиристорних збуджувачів через інерційність контура збудження СГ відбувається аперіодичне запізнювання струму збудження, що часто є причиною втрати стійкості генератора. Тому підвищення швидкодії режимів форсування досягається за рахунок застосування випереджаючої фази напруги збудження і підвищення її кратності. Крім того, підвищення швидкодії режиму форсування може досягатися за рахунок зменшення інерційності каналів виміру і керування напругою.

Проте застосування відомих способів і пристроїв форсування напруги збудження не забезпечує зниження інерційності самого контура збудження, тобто струм в обмотці збудження (ОЗ) завжди має аперіодичне запізнювання по відношенню до форсувальної напруги, що у результаті визначає стійкість СГ.

© В.І. Хоменко, В.Б. Нізімов, 2020

Для підвищення динамічної стійкості СГ необхідно компенсувати електромагнітну інерційність контуру збудження синхронного генератора шляхом зміни силової схеми та вмикання ємнісних елементів в інерційний контур, наприклад, ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ). Причому вмикання ємнісних елементів можливо або послідовно з обмоткою збудження, або паралельно з ОЗ [1, 2], що призводить до складних енергообмінних процесів в контурах синхронного генератора.

Крім того, у випадку короткого замикання (КЗ) в мережі, яку живить АГУ, аварійний режим ліквідується максимальним струмовим захистом. При внутрішніх коротких замиканнях обмотки статора генератора для обмеження обсягу руйнування необхідно форсоване гасіння поля. Форсоване гасіння поля може бути виконано з вмиканням розрядного резистора автоматом гасіння поля (АГП), переводом збуджувача в режим інвертування або застосуванням імпульсно-дугових комутаторів. Використання АГП в тиристорних системах збудження є недоцільним через можливість виникання перенапруг, а режим інвертування збуджувача принципово є неможливим при внутрішніх коротких замиканнях обмоток статора синхронного генератора [3, 4].

**Постановка задачі**

Теоретичне та експериментальне дослідження режимів збудження автономного синхронного генератора при значних збуреннях для зменшення негативних наслідків.

**Результати роботи**

Розглянемо розряд конденсатора в контурі збудження при наявності струму при живленні від трифазного мостового несиметричного перетворювача. У випадку лінійного електричного кола, тобто коли всі його параметри зберігають свої значення постійними незалежно від діючих в електричному колі напруг і струмів, застосуємо принцип накладання. При розряді ємності НЕ залежність струму від величини напруги має вигляд:

$$i_f = U_{c0} \cdot e^{-\beta t} \cdot \frac{Cp}{L_f cp^2 + R_f cp + 1} \tag{3}$$

Представимо ці рівняння в пакеті Matlab/Simulink (рис. 1).

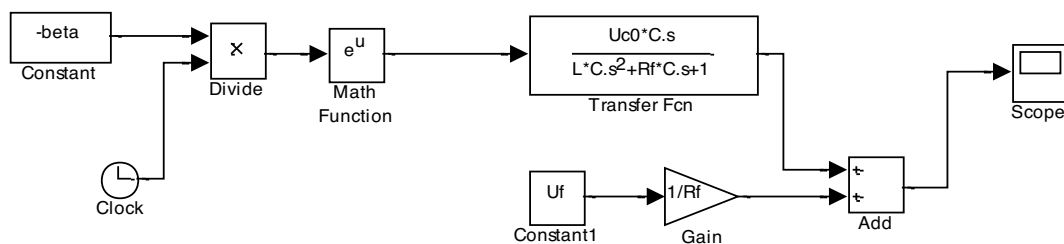


Рисунок 1 – Математична модель контуру збудження СГ при наявності струму збудження

Розрахунок перехідних процесів виконаний для синхронного генератора типу МСА-72/4:  $P_n = 12$  кВт;  $U_c = 230$  В;  $i_{ln} = 37,6$  А;  $U_{fn} = 27$  В;  $i_{fn} = 23$  А;  $n_n = 1500$  об/хв. Параметри контуру збудження синхронного генератора:

$U_{c0} = 100$  В;  $L_f = 0,006$  Гн;  $C = 0,0003$  Ф;  $R_f = 1$  Ом;  $U_\phi = 20$  В;  $\beta = 8,33$ .

Результати розрахунків приведені на рис. 2.

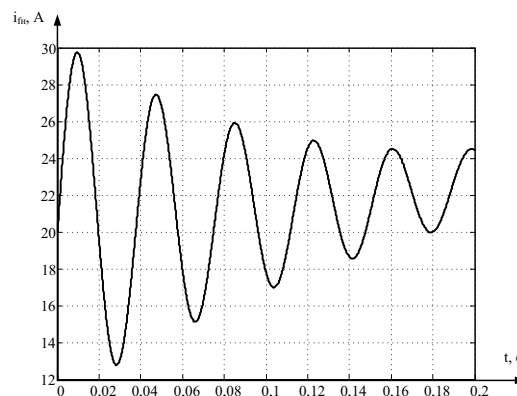


Рисунок 2 – Розрахункові залежності струму збудження СГ



На підставі аналізу розрахункової залежності можна сформулювати алгоритм керування контуром збудження: при  $t > 0$  і  $p_{if} = 0$ , необхідно вивести конденсатор із контуру збудження, при цьому  $U_f = U_{f\phi}$  і  $X_L = X_C$ .

У випадку повної компенсації, струм контуру збудження буде безінерційно слідувати за напругою форсування [5].

Вказаний алгоритм керування контуром збудження СГ реалізований в математичній моделі, приведеній на рис. 3. Однак розрахункові залежності (рис.2) не враховують вплив демпферних контурів та обмоток статора СГ.

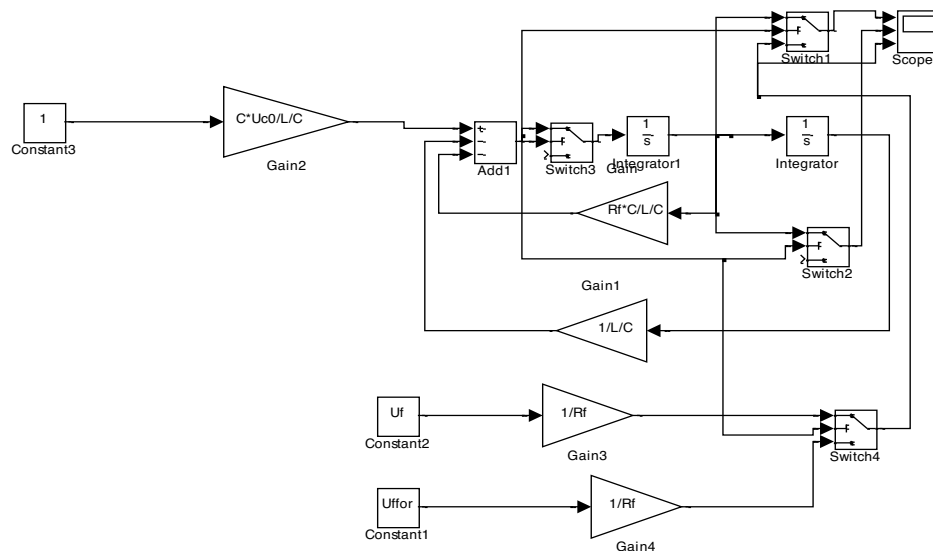


Рисунок 3 – Математична модель алгоритму керування контуром збудження СГ

На рис. 4 представлено принципову схему системи збудження синхронного генератора в складі автономної генеруючої установки із застосуванням накопичувача енергії в контурі збудження, який забезпечує режим форсування струму.

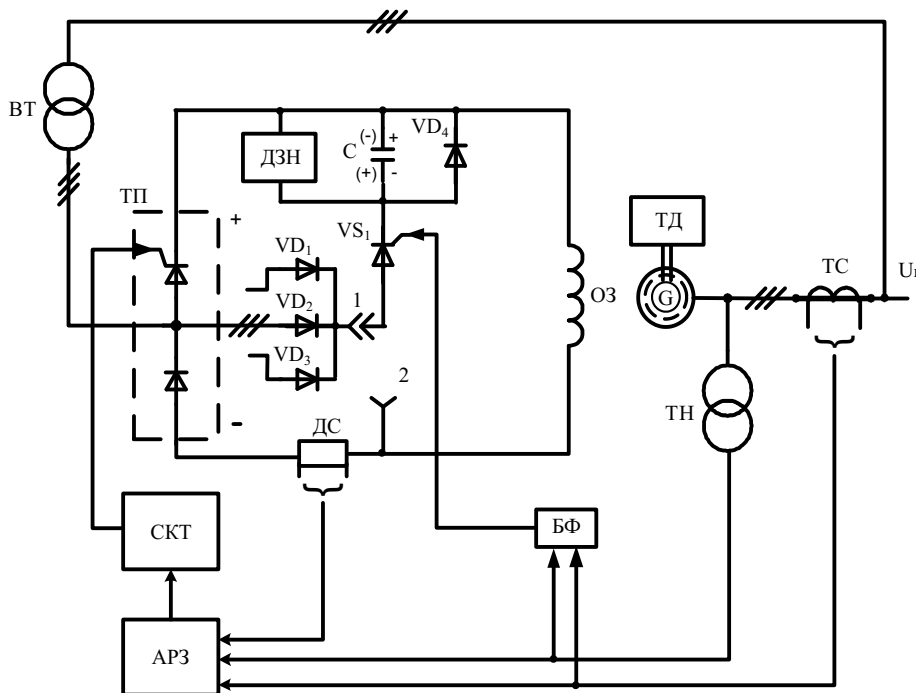


Рисунок 4 – Принципова схема пристрою керування контуром збудження синхронного генератора

Осцилограма режиму форсування збудження при розряді ємності НЕ дозволяє зробити висновок про те, що можна забезпечити або форсування, або гасіння поля синхронного генератора (рис. 5.)

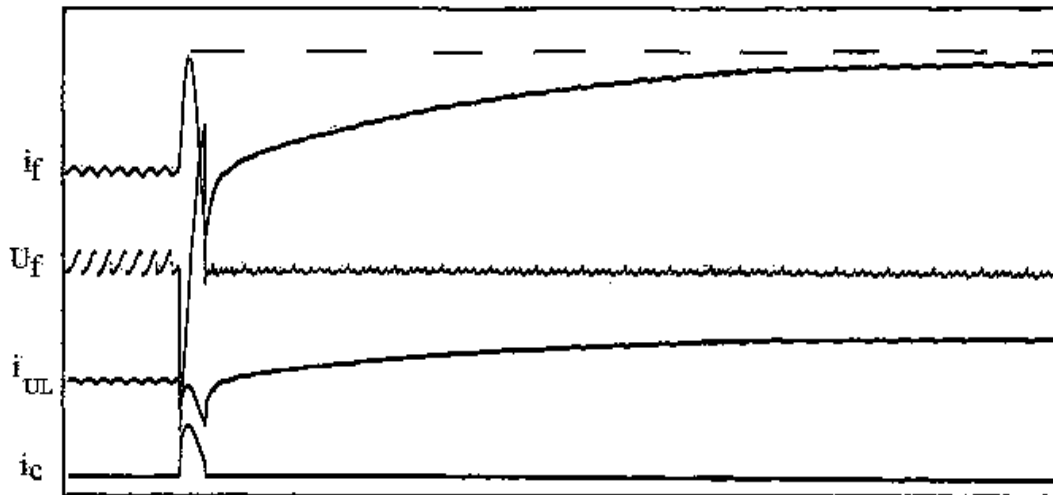
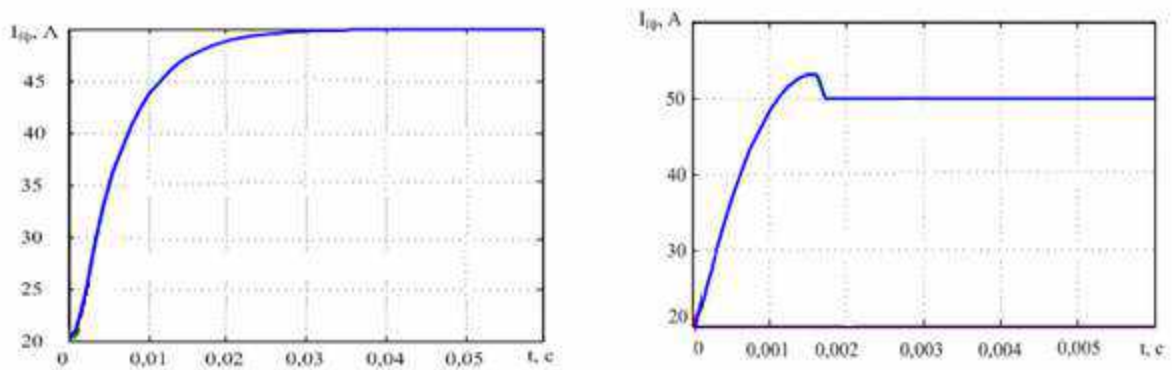


Рисунок 5 – Осцилограма процесу форсування збудження модельного СГ

Результати математичного моделювання режимів форсування струму збудження СГ при кратності форсування напруги  $K_i = 2,5$  наведені на рис. 6. На рис. 6,а наведені розрахункові залежності режиму форсування, які характерні для серійних тиристорних збуджувачів з некомпенсованим контуром. На рис. 6,б наведено розрахункові залежності режимів збудження при наявності ємності та початкового струму збудження, що виконані за структурною схемою, наведеною на рис.3.



а)б)

Рисунок 6 – Розрахункові залежності режимів форсування напруги збудження СГ:  
а) некомпенсованого контуру; б) компенсованого контуру

Аналіз отриманих залежностей показує, що при некомпенсованому контурі з кратністю форсування  $K_i = 2,5$  максимальне значення струму збудження 50,0 А досягається за час 0,04 с, а при компенсованому значення струму 52,2 А досягається лише за час 0,0015 с.

Для врахування впливу контурів СГ виконано розрахунки режимів форсування напруги збудження по повній системі диференціальних рівнянь у в.о. системи  $x_{ад}$ . Результати розрахунків наведені на рис.7. На рис.7, а,б представлені розрахункові залежності режиму форсування напруги СГ при накиді ударного навантаження з ЄНЕ контуру збудження і без ЄНЕ.

Порівняльний аналіз розрахункових залежностей показує, що швидкодія форсування струму збудження з ЄНЕ в ОЗ значно вища, ніж в серійних тиристорних збуджувачах. Форсувальний режим збудження викликає підвищення сплеску струму статора, електромагнітного моменту і гойдання ротора. Розрахункові залежності струму збудження підтверджують аналітичні залежності (7, а) і (7, б).

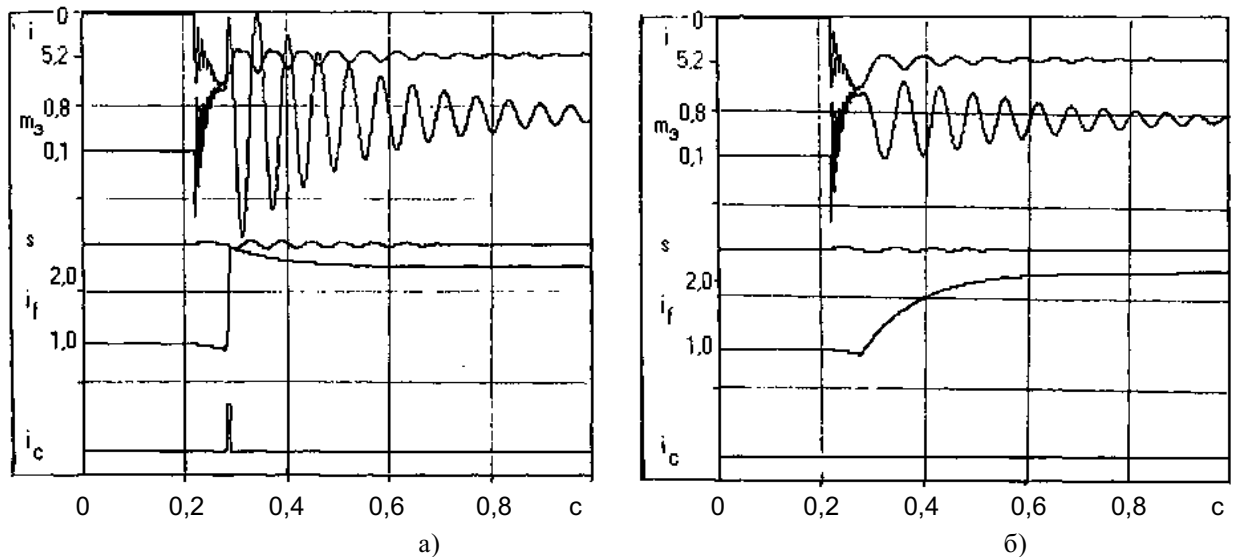


Рисунок 7 – Розрахункові залежності режиму форсування збудження СГ при нахилі навантаження  $M_c=0,8$  в.о.: а) з НЕ в ОЗ; б) без НЕ в ОЗ

Для підтвердження теоретичних положень проводилися експериментальні дослідження синхронного генератора в режимі форсування збудження з розробленим пристроєм і з серійними тиристорними збуджувачами. На рис. 8, а приведена осцилограма режиму форсування збудження при ємнісному накопичувачі енергії, а на рис. 8, б - осцилограма форсування напруги, характерна для серійних збуджувачів.

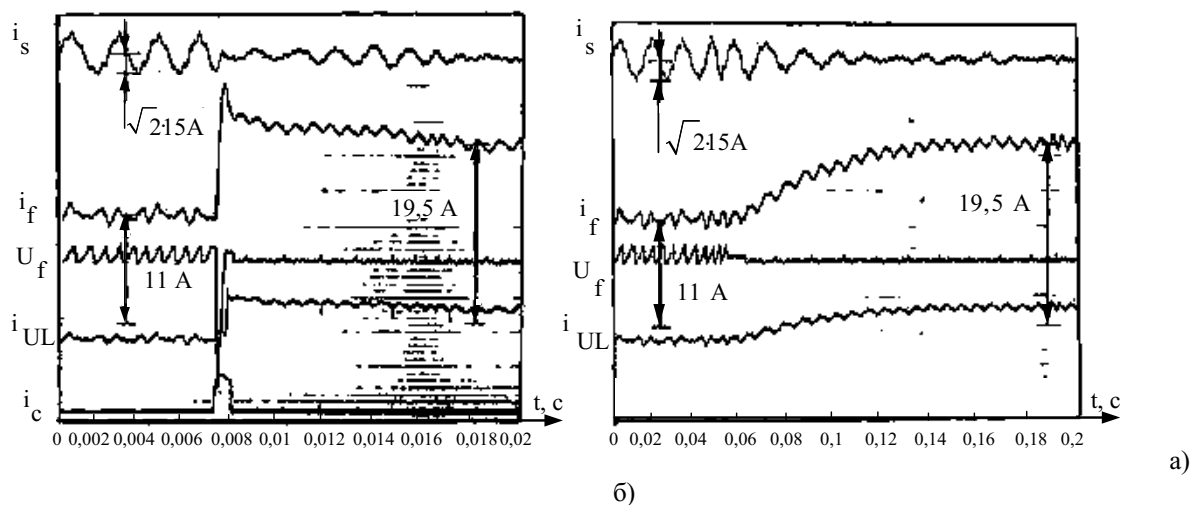


Рисунок 8 – Осцилограми режимів форсування струму збудження в запропонованому (а) і в існуючому збуджувачах (б)

Аналіз осцилограм (рис. 8, а і б) показує, що час досягнення струмом збудження форсировочного значення складає відповідно до 0,008 і 0,16 с. Таким чином, при одній і тій же кратності найбільшої напруги збуджувача швидкодія даного пристрою в режимі форсування збудження приблизно в 20 разів вища, ніж традиційних систем збудження.

Доцільність застосування несиметричних збуджувачів пояснюється тим, що енергетичні показники мостових збуджувачів в номінальних режимах роботи, які характеризуються споживанням реактивної потужності: симетричної –  $Q_{fn} = 1,433U_m I_{fn}$ , несиметричної –  $Q_{fn} = 0,827U_m I_{fn}$ , коефіцієнт потужності –  $\chi_{м.с.} = 0,477$ ,  $\chi_{м.н.} = 0,552$  [5].

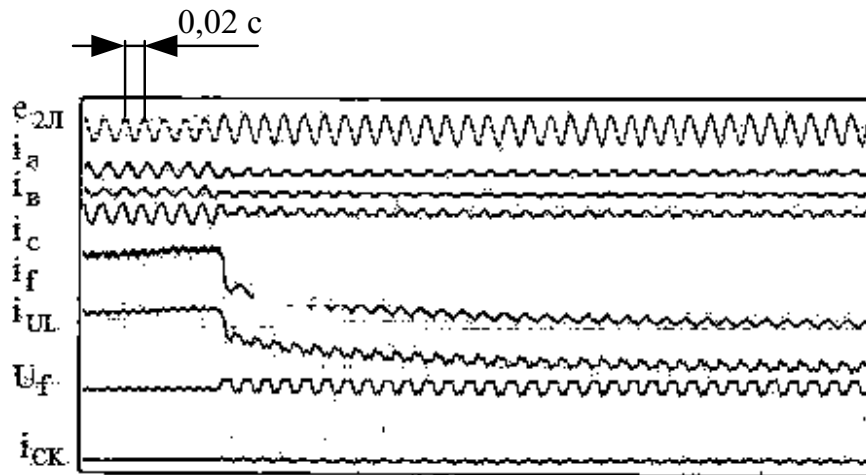
Таким чином доведено, що при рівних значеннях діапазону регулювання симетричні мостові збуджувачі СГ у порівнянні з несиметричними мають значне зниження коефіцієнта потужності на 13,59 % і зростання споживання реактивної потужності на 42,29 %.

Особливістю роботи трифазної мостової несиметричної схеми при активно-індуктивному навантаженні у діапазоні регулювання ( $\pi/3 \leq \alpha \leq \pi$ ) є те, що при знятті сигналу керування не вдається

забезпечити вимикання усіх тиристорів. При знятті сигналу керування здійснюється вимикання двох тиристорів, а третій залишається увімкненим за рахунок ЕРС самоіндукції і через нього протікає струм навантаження. Це призводить до зниження діапазону регулювання напруги і погіршенню використання вентилів за струмом.

Для підвищення ефективності в схему вводять нульовий вентиль, що шунтує навантаження, через який розряджається індуктивність обмотки збудження.

Осцилограма подібного режиму збудження синхронного генератора з несиметричним збуджувачем і відключеному ємнісним накопичувачем енергії приведена на рис. 9.



$i_a, i_b, i_c$  – струми вторинної обмотки трансформатора збуджувача,  $e_{2л}$  – електрорушійна сила вторинної обмотки трансформатора збуджувача,  $i_f$  – струм збудження,  $i_{UL}$  – струм збуджувача,  $U_f$  – напруга збудження,  $i_{СК}$  – струм розряду ємності,

Рисунок 9 – Осцилограма режиму збудження СГ при знятті керуючих імпульсів з тиристорів несиметричного збуджувача

На рис.10 наведена осцилограма режиму збудження при вимиканні збуджувача сильно струмовим апаратом. На рис.11 наведена осцилограма режиму збудження СГ з ЄНЕ із зворотним розрядом перезарядженої ємності.

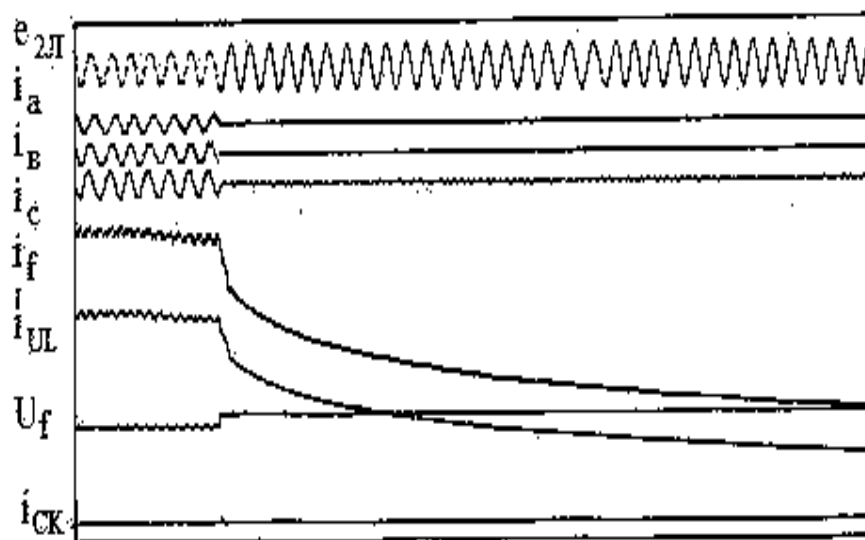


Рисунок 10 – Осцилограма режиму збудження при вимиканні збуджувача сильно струмовим апаратом

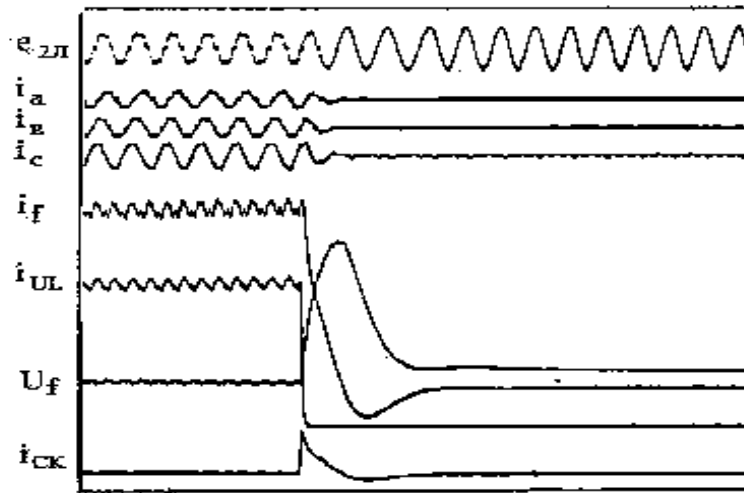


Рисунок 11 – Осцилограма режиму збудження СГ з ЄНЕ із зворотним розрядом перезарядженої ємності

Для коректності експерименту режимів збудження перетворювач живився від незалежного джерела напруги частотою 50 Гц. Таким чином застосування ЄНЕ в контурі збудження та керування останнім забезпечує стабільність роботи автономного генератора, а також вимикання тиристорів збуджувача з одночасним гасінням поля. Зворотний розряд ЄНЕ забезпечує подавлення поля заспокійливої обмотки.

#### Висновки

Виконані теоретичні та експериментальні дослідження особливості режиму збудження синхронного генератора, які дозволяють зробити наступні висновки:

1. Швидкодія режиму форсування струму збудження з використанням несиметричного збуджувача з ЄНЕ на порядок вища порівняно з несиметричним без ЄНЕ.
2. Несиметричні мостові збуджувачі дозволяють підвищити коефіцієнт потужності на 13 % та зменшити споживання реактивної потужності до 40 % в режимі номінального збудження в порівнянні з симетричними.
3. Схеми з примусовою ємнісною комутацією дозволяють надійно вимикати збуджувач у випадку пошкодження елементів останнього.

#### Список використаної літератури

1. А.с.№ 1312715 СССР. МКИ Н 02 Р 9/12, 9/14. Устройство для управления возбуждением синхронной машины/ В.Б.Низимов и С.В.Колычев (СССР).-№ 3965507/24-07; Заявлено 21.10.85; Опубл. 23.05.87, Бюл. № 19. - 3с.
2. А.с. № 1599961 СССР. МКИ Н 02 Р 1/50, 9/12.Устройство для возбуждения синхронного электродвигателя/ В.Б.Низимов (СССР). - № 4624878/24-07; Заявлено18.10.88; Опубл. 15.10.90, Бюл. № 38. - 3с.
3. Fick, P. D. Accurate digital current control of the reluctance synchronous machine with constant current angle [Text] / P. D. Fick, M. J. Kamper // Trans. SA Inst. Electr. Eng. – 2004. – Vol. 95, Issue 1. – P. 47–50.
4. Bansal R. C. Three-Phase Self-Excited Induction Generators : An Overview. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005. vol. 20, Issue 2. Pp. 292–299.
5. Нізімов В.Б., Нізімов Р.В., Сторожко В.С. Спосіб форсування струму збудження синхронного двигуна та пристрій для його реалізації.– Патент 60652 (Україна). Заявлено 24.01.2003р. Надруковано 15.10.2003. Бюл.№10. - 10с.
6. Хоменко В.І. Підвищення стійкості роботи синхронної машини шляхом удосконалення системи збудження / В.І.Хоменко, В.Б. Нізімов, С.В. Количев. – Харків; Східно-Європейський журнал передових технологій «Енергосберегающие технологии и оборудование», 2015. 1/8(73). ISSN 1729-3774/ – С.31– 36. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36498
7. Kyriakides, E. On-line estimation of synchronous generator parameters using an observer for damper currents and a graphical user interface. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004. – Vol. 19, Issue 4. Pp. 499–507.
8. A. Benigni and A. Monti, "A Parallel Approach to Real-Time Simulation of Power Electronics Systems," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 9, pp. 5192-5206, Sept. 2015.

9. Kutsyk A. An application of fuzzy voltage regulator to a static excitation system of a phase compound synchronous generator / A. Kutsyk, M. Semeniuk, O. Kuznyetsov // *Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, 2017 - Pp. 46-49.

10. Хоменко В.І. Техніко-енергетичні показники автономної системи електроживлення на базі синхронного генератора / В.І. Хоменко, В.Б. Нізімов. – *Zbiór artykułów naukowych. Konferencji Międzynarodowej NaukowoPraktycznej "Inżynieria i technologia. Osiągnięcia naukowe, rozwój, propozycje na rok 2016"* (30.12.2016) - Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2016. ISBN: 978-83-65608-33-8/ – С. 66–70.

**V. Khomenko**, Cand. Sc. (Eng), lecturer, **ORCID** 0000-0003-0722-2573  
**V. Nizimov**, Dr. Eng. Sc., Prof., **ORCID** 0000-0002-4580-5262  
**Prydniprovsky State Metallurgical College, Kamianske**  
**Dniprovsky State Technical University, Kamianske**

## **FEATURES OF EXCITEMENT MODES OF THE AUTONOMOUS SYNCHRONOUS GENERATOR AT SIGNIFICANT DISTURBANCES**

Reliability improvement of power supply of consumers' comparable power from the autonomous generating unit in dynamic modes of power surge of the comparative load due to the acceleration of excitation with the use of capacitive energy storage devices and the establishment of the laws and dependencies of their influence on the modes of operation of synchronous generators. The influence of energy storage system in the circuit of a synchronous generator excitation on increasing the life activities of autonomous generating unit has been researched. An algorithm for controlling the excitation circuit of an autonomous generating unit is proposed and substantiated, taking into account the change of the power circuit and the inclusion of capacitive elements in the inertial circuit. The influence of capacitive energy storage in the excitation circuit of synchronous generator on the process of voltage output regulation of autonomous generating unit by means of consumer comparable capacity connection has been investigated is substantiated. The brought mathematical models and algorithm of control over to the contour of excitation. In order to analyze the energy saving measures, the influence of parameters to the contour of excitation on energy exchange processes between the contours of synchronous generator has been considered. A significant improvement in energy performance can be achieved by using asymmetric bridge exciters, which not only reduce reactive power consumption, but also greatly simplify the power converter by replacing the anode or cathode group of controlled valves with diodes, while halving control channels. Calculation and experimental researches proved that the contour parameters of excitation substantially influence on firmness of synchronous generator and initial voltage stabilization. It has been proved that at the same multiplicity of the highest voltage of the exciter, the speed of this device in the mode of forcing the excitation is approximately 20 times higher than traditional excitation systems. In this case, the circuit with forced capacitive switching allows you to reliably turn off the exciter in case of the elements damage of the latter.

**Keywords:** autonomous generating unit, the excitation mode, dynamic stability.

### **REFERENCES**

1. А. с. № 1312715 USSR N 02 P 9/12, 9/14. Ustroystvo dlia upravleniya vobuzhdeniem sinkhronnoy mashyny / V.B. Nizimov i S.V. Kolychev (USSR). - № 3965507/24-07; Zaiavleno 21.10.85; Opubl. 23.05.87, Biul. № 19. – 3с.
2. А. с. № 1599961 USSR N 02 P 1/50, 9/14. Ustroystvo dlia vobuzhdeniya sinkhronnogo elektrodvigateľa / V.B. Nizimov (USSR). - № 4624878/24-07; Zaiavleno 18.10.88; Opubl. 15.10.90, Biul. № 38. – 3с.
3. Fick, P. D. Accurate digital current control of the reluctance synchronous machine with constant current angle [Text] / P. D. Fick, M. J. Kamper // *Trans. SA Inst. Electr. Eng.* – 2004. – Vol. 95, Issue 1. – P. 47–50.
4. Bansal R. C. Three-Phase Self-Excited Induction Generators : An Overview. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005. vol. 20, Issue 2. Pp. 292–299.
5. Nizimov V.B., Nizimov R.V. Storozhko V.S. Sposib forsuvannia strumu zbudzhennia sinkhronnoho dvyhuna ta prystryi dlsa yoho realizatsii – Patent 60652 (Ukraina). Zaiavleno 24.04.2003 r. Nadrukovano 15.10.2003. Biul. № 10. – 10с.
6. Khomenko V.I. Pidvyshchennia stiykosti roboty sinkhronnoi mashyny shlsahom udoskonalennia sustemu zbudzhennia / V.I. Khomenko, V.B. Nizimov, S.V. Kolychev. – Kharkiv; *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy "Enerhosberehayushchye tekhnolohii i oborudovanie"*, 2015. Issue № 1/8 (73). ISSN 1729-3774/ – pp. 31–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36498.
7. Kyriakides, E. On-line estimation of synchronous generator parameters using an observer for damper currents and a graphical user interface. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004. – Vol. 19, Issue 4. Pp. 499–507.

8. A. Benigni and A. Monti, "A Parallel Approach to Real-Time Simulation of Power Electronics Systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 9, pp. 5192-5206, Sept. 2015.

9. Kutsyk A. An application of fuzzy voltage regulator to a static excitation system of a phase compound synchronous generator / A. Kutsyk, M. Semeniuk, O. Kuznyetsov //Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), 2017 - PP. 46-49.

10. Khomenko V.I. Tekhniko-enerhetichni pokazniki avtonomnoi sistemu elektrozhuvlennia na bazi synkhronnoho generatora / V.I. Khomenko, V.B. Nizimov. - Zbiór artykułów naukowych. Konferencji Międzynarodowej NaukowoPraktycznej " Inżynieria i technologia. Osiągnięcia naukowe, rozwój, propozycje na rok 2016" (30.12.2016) - Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2016. ISBN: 978-83-65608-33-8/ – pp. 66–70.

УДК 621.313.322

**В.И. Хоменко**, канд. техн. наук, преподаватель высшей категории, ORCID 0000-0003-0722-2573

**В.Б. Низимов**, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-4580-5262

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское  
Приднепровский государственный металлургический колледж, г. Каменское

## **ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОНОМНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ**

Повышение надежности питания потребителей сопоставимой мощности от автономной генерирующей установки в динамических режимах наброса сопоставимой нагрузки достигается за счет форсирования возбуждения с применением емкостных накопителей энергии и установления закономерностей и зависимостей их влияния на режимы работы синхронных генераторов. Исследовано влияние емкостного накопителя энергии в контуре возбуждения синхронного генератора на повышение устойчивости работы автономной генерирующей установки. Предложен и обоснован алгоритм управления контуром возбуждения генерирующей установки, с учетом изменения силовой схемы и включения емкостных элементов в инерционный контур.

Исследованиями доказано, что параметры контура возбуждения существенно влияют на стойкость синхронного генератора и стабилизацию выходящего напряжения. Доказано, что при одной и той же кратности наибольшего напряжения возбудителя быстродействие данного устройства в режиме форсирования возбуждения приблизительно в 20 раз выше, чем традиционных систем возбуждения. Исследованиями установлено, что схема с принудительной емкостной коммутацией позволяет надежно отключать возбудитель в случае повреждения элементов последнего.

**Ключевые слова:** автономная генерирующая установка, режим возбуждения, динамическая стойкость.

Надійшла 29.06.2020

Received 29.06.2020

O. Terentiev, Dr. Sciences., Prof. ORCID 0000-0003-2523-2804

N. Sergienko, Assos. Prof. ORCID 0000-0001-8284-9072

A. Huzan, student

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

## USE OF INNOVATIVE SYSTEMS FOR EFFICIENT DRILLING OF WELLS IN THE QUARRY OF UKRAINE

*Almost all over Ukraine in the bowels of the Ukrainian crystal shield is more than 500 million m<sup>3</sup> of explored reserves of high quality natural building and finishing stone. Of particular interest are granite deposits as the main strategic raw material for the construction of industrial, defense and civil structures, roads, runways, airfields, transport tunnels, subways and more. Today, more than 150 quarries in Ukraine extract valuable raw materials for the country - natural stone. At the same time, given the high strength and abrasiveness of granites, their extraction is extremely complex, expensive, time consuming. There are no machines that could directly extract strong granite rocks of volcanic and metamorphic origin. To ensure the required volumes of granite mining, it is necessary to pre-grind the monolith of the rock, which is carried out by drilling and blasting. These complex technological operations provide powerful drilling rigs that perform drilling work in strong and very strong rocks [1].*

*In the presented researches the basic indicators influencing efficiency of drilling rigs on quarries of Ukraine are analyzed and established. Rational methods of rock destruction for specific geological conditions of a mining enterprise are considered, substantiated and recommended. Optimization of drilling efficiency and productivity was performed by choosing the method of destruction, hardness of rocks, type of drilling machine and parameters of tools for destruction of rocks [2]. The calculation method presented in the work allows to limit the amount of dust pollution depending on the speed, depth of drilling, distance from the well for blasting, which will control the optimal modes of operation of the drilling machine and drilling modes. The obtained research results confirmed the correctness and efficiency of new innovative systems for drilling hard rocks in the quarries of Ukraine.*

**Keywords:** quarry, destruction of rocks, drilling rig, pneumatic striker.

**Introduction.** One of the key processes in the quarries is drilling work. Effectiveness of their implementation depends primarily on the performance of the drilling equipment. Drilling machines must provide high performance, low cost, environmental requirements required diameter and depth of drilling have independent individual drive, high mobility and speed.

**Analysis of the problem.** Improving the efficiency of drilling and blasting operations in the quarries of Ukraine is the main direction that ensures a constant increase in the extraction of natural resources. Today, open pit mines use a wide range of drilling rigs and technologies to drill wells with diameters ranging from 40 to 350 mm in hard and very hard formations. The main technical and economic indicators of enterprises depend on the efficiency and productivity of drilling. The drilling process is also characterized by significant release of drill dust and explosion products, which have a large impact on environmental pollution and the health of workers.

The extremely high cost and low efficiency of drilling operations is a consequence of the use of outdated drilling rigs with low productivity and ineffective mining destructive tools in the Ukrainian open pits. The development of the latest explosive materials with high energy of destruction allows, during blasting operations, to reduce the diameter of drilled holes to 100 - 150 mm. At the same time, these purposes require more productive, powerful and reliable drilling equipment, which provides high-speed drilling in hard rocks. In recent years, the productivity of drilling rigs has stabilized, but the mining and geological conditions of production have deteriorated significantly. The discrepancy between the parameters and modes of drilling leads to a constant increase in the costs of drilling in hard rocks, which reach 30–40% of the total cost of mining operations [3]. In the modern ecological aspect of protecting nature from mining, it is also important to control the release of large amounts of fine dust during drilling, which affects the health of personnel and environmental pollution.

Therefore, the selection and implementation of productive drilling equipment with substantiation of the main parameters of well drilling to ensure high technical and economic indicators of mining, environmental protection and workers' health is an important theoretical and practical task of the mining industry.

The article is aimed at research and comparative assessment of the main technological and technical parameters of existing and newest innovative drilling equipment for a wide range of complex geological conditions in the quarries of Ukraine.

**The main material.** Table 1 shows the main characteristics of the operating drilling rigs SBS-250, SBU-125, Atlas Copco in the quarries of Ukraine. The main SBS drilling rigs are designed for drilling vertical wells with a diameter of  $d_c = 160-350$  mm and a depth of up to 35 m. The use of these machines with roller cone bits for crushing

---

© О.М. Терентьев, М.І. Сергієнко, А.І. Гузан, 2020



rocks with a strength factor  $f = 6-18$  has low drilling speeds due to their technical imperfections. For example, the use of wells with a diameter of more than 200 mm in hard formations does not lead to a decrease in unit costs. In rocks with high resistance to fracture, the best performance is achieved when using wells with a diameter of 100-180 mm. The use of wells with a diameter of 215–250 mm under these conditions leads to an increase in explosive costs by 20–40% [4]. The main disadvantages of SBC machines are large mass and low resistance of bits in heavily drilled formations, high noise, vibration and dust emissions, accidents, maintenance complexity, low speed [5]. The development of new highly efficient drilling equipment has allowed to improve drilling equipment for drilling with diameters from 100 to 180 mm, which significantly increases productivity and reduces energy consumption of the process. All existing theories of mechanical destruction of rocks can be reduced to the energy theory, according to which the preferred method of destruction, modes and duration of the process, providing the minimum energy consumption for drilling [6].

Table 1. Technical specifications and parameters of drilling rigst

Indicators	Drilling rigst		
	SBC -250	SBU-125	ROC L8 "Atlas Copco"
Productivity, m / h	15	10	30-45
The range of strength of rocks, f	12-18	10-14	16-20
Installed power, kW	398	80	317
Range drilling (H. / Vert.), Deg	0-30°	0-30°	0-90°
Driving speed km / h	0.78-1.2	1.0	3.4
Maximum drilling depth, m	32	25	54
Hole diameter's, mm	250-270	125-160	85 - 203
Weight, т	75.0	8.0	16.8
Drilling method, type	cutting drill	DTH P-125	Down-the-hole Copco-44/54/64
Efforts filing, kN	300	20	40

The principle drilling cutting method is based on the actions of large axial forces and torque on the drill [7]. Summed to slaughter borehole through the drill rod Nash power ( $N$ ), which determines the performance of the method is calculated by the formula:

$$N_{\sigma} = 3 \cdot m_0 \cdot D \cdot n \cdot G, m \quad (1)$$

where  $m_0$  - coefficient taking into account the type of bit and contact strength of rocks;  $D$  - diameter bits, m;  $n$  - number of revolutions bit;  $G$  - axial force on a bit, N.

When percussion-drilling method, using submersible pneumatic drummer. Desktop Authority operates cyclic shock loading at low effort delivery and torque. Summed with the capacity to slaughter NY ( $N_{\sigma}$ ) is defined by the formula:

$$N_{\sigma} = \frac{0,45 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot P_c \cdot V_{\sigma}}{2 \cdot (1 + \tau)}, \quad (2)$$

where  $R$  - striker radius, m;  $P_c$  - the average pressure in the chamber of the forward striker, Pa;  $V_{\sigma}$  - first speed, m/s;  $\tau$  - the ratio of the forward air-strike time to time reverse ( $\tau = 1.4 - 1.6$ );  $A$  - energy single blow, J;  $J$  - impact rate, Hz.

From formula (1) and (2) it follows that during drilling of one diameter drilling opportunities to increase productivity and increasing pressure determined first speed. This required axial force  $G$  (H) on the shock machine is determined by the expression:

$$G = \frac{2 \cdot A \cdot v}{V_y \cdot \eta}, \quad (3)$$

where  $\eta = 0.5 - 0.7$  - efficiency

The principles of the axial force during cutting and air percussion different. When cutting drilling axial force is crucial for power on bottom hole. When air percussion axial clamping force pneumatic drummer to face no

significant effect on the efficiency of the destruction of rocks. In connection with this problem drilling wells submersible shock machines removed. There is a very important indicator of the removal power  $W$  (Wt) per unit axial force:

$$W=N/G, \tag{4}$$

For the cutting method, we have:

$$W_{\theta} = \frac{N_{\theta}}{G} = 3 \cdot m_0 \cdot D \cdot n, \tag{5}$$

and for air percussion:

$$W_{\delta} = \frac{N_{\delta}}{G} = 0,5 \cdot V_{\delta} \cdot \eta, \tag{6}$$

Having real data in drilling wells with a diameter  $D = 0,215$ ;  $m_0 = 0,042$ ;  $D = 0,215$ ;  $n_b = 1,33 \text{ c}^{-1}$ ;  $V_y = 8 \text{ m/s}$ ;  $\eta = 0.5$ . get  $W_{\theta} = 0.036 \text{ Wt/N}$  and  $W_y = 2 \text{ Wt/N}$ .

It follows that the power that is removed from the unit axial force when cutting drilling of 40-50 times less than the percussion-way. This is one of the most important arguments advantages air percussion drilling method, especially for wells

Use tools with an impact-rotary method of drilling with submersible pnevmoudarnykamy is one of the most promising and effective ways. With this method, the destruction of rocks made by impact shock loads at low axial pressures and speeds, and therefore such machines have a much higher performance and minimum energy drilling process [8]. Recently, drilling rigs of the Swedish engineering concern Atlas Copco, equipped with a pneumatic for down-the-hole hammer for rotary drilling, have been operated in the quarries of Ukraine. These rigs can drill holes with a diameter of 85 to 305 mm. with a drilling depth of up to 54 m, in rocks of medium and high strength. They are equipped with replaceable drill rods 5-7 m long with automatic installation during operation. The design of the base machine and drilling rigs allows drilling wells with angles of 0-90 degrees (Figure 1). They have high productivity and speed of drilling, mobility and speed, processing performance, low environmental impact, safe in operation [9].

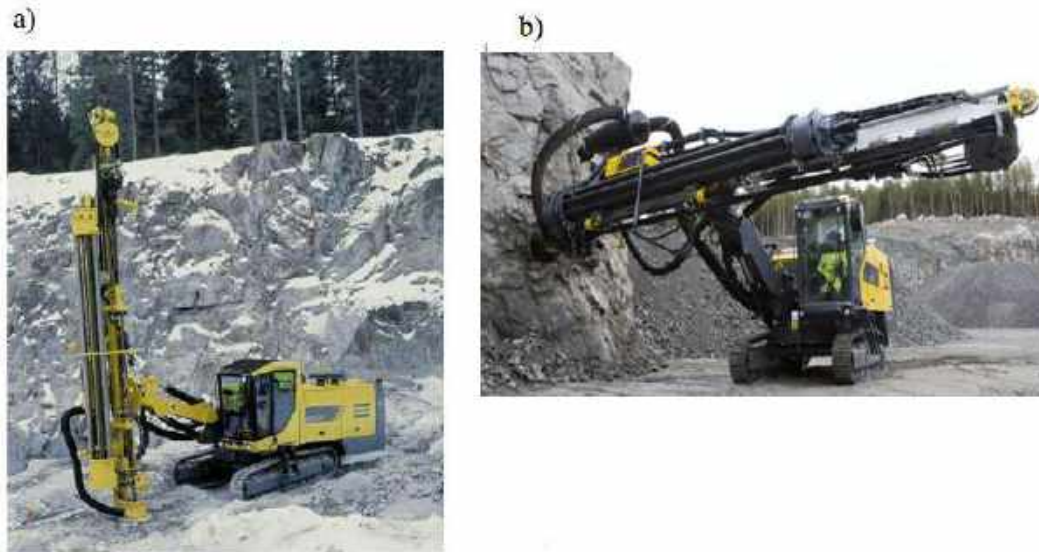


Figure 1. Drilling machine “Atlas Copco” for drilling wells career: a) – vertical; b) – horizontal.

Working equipment machine including compressor, mounted on a single platform. Having tracked and small size provide sufficient conditions for limited mobility and maneuverability. Equipment of diesel driven machine allows it to operate autonomously in small venues and working in an environment where there is no electricity supply system [10]. High-performance drilling rigs with pneumatic punches as provided by the drilling speed (the speed of penetration into the rock) and by minimizing the auxiliary and preparatory operations. Drilling machines "Atlas Copco" equipped with automatic extension rods, thanks to what the ratio of net drilling time to time for preparatory operations is 70/30. Efficiency drilling stalls "Atlas Copco provides powerful submersible pneumatic drummer or hydraulic hammer, designs and sizes which can drill holes with a diameter  $d_c$  from 85 to 305 mm in rocks of medium strength to super-strong (Table 2). The same drilling machine may use several sizes of pneumatic drummer COP.

Table 2. Specifications pneumatic submersible rock breaking hammer "Atlas Copco"

Parameters pneumatic drummer COP	Rock drill down-the-hole (DTH) COP				
	COP-34	COP-44	COP-54	COP-64	COP-84
Leight, мм	982	1059	1143	1312	1458
Hole diametr's, мм	84	100	125,5	142	160
Weight, кг	32	49	84	124	155
Working pressure, bar	6-25	6-25	6-25	6-25	6-25
Air consumption, l/s at:					
10 bar	82	105	126	175	176
18 bar	165	185	245	342	345
24 bar	215	250	370	475	480
Drill still, мм	85-105	105-140	127-152	165-203	195-305

The overall look and design submersible pneumatic drummer COP which is equipped with a drilling machine "Atlas Sopco" shown in Figure 2.

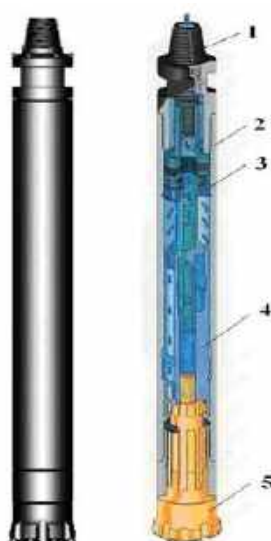


Figure 2 – General view and design of the drilling rig "Atlas Copco".

1 - connecting node with a drill; 2 - the body of the drummer; 3 - spool distribution mechanism; 4 - shock piston; 5 - rock-destroying tool.

Atlas Copco submersible rock drills use special heavy duty drill bits for crushing hard and abrasive formations (fig. 3). They are equipped with ultra-hard, high-strength tungsten carbide and cobalt carbide spherical inserts for productive rock crushing and minimal displacement during high speed drilling [10,11].

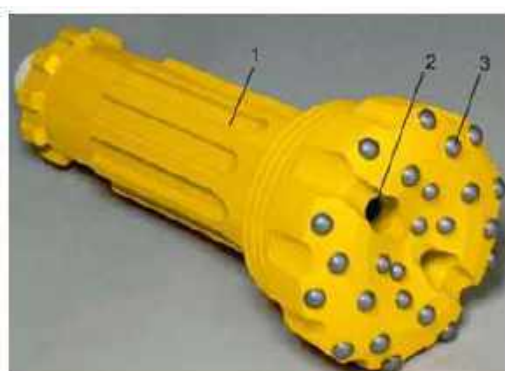


Figure 3. Crown of "Atlas COPCO" machine for crushing extra hard rocks.

1 - tool attachment point; 2 - ventilation holes for rock removal; spherical carbide insert.

To avoid excessive crushing of the rock in the well and the risk of jamming, waste is removed from the well at regular intervals (3-5 seconds) by blowing air in accordance with one of the three operating modes of the Copco air hammer (Fig. 4).

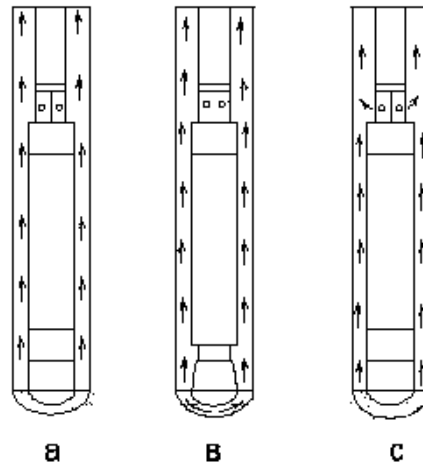


Figure 4 - Scheme of blowdown and cuttings removal: a - blowdown from the bottom of the well; b - blowing with a percussion mechanism; c - purging by actuation of the purge valve. Scheme of blowing and sludge removal: a - blowdown from the bottom of the well; b - blowdown of the percussion mechanism; c - actuation of the blowdown valve.

When blowing the well according to the scheme (a, Fig. 4), the percussion mechanism of the pneumatic hammer stops as soon as the striker rises and falls together with the bit, therefore a large volume of air is blown through the striker and is well cleaned. According to the scheme (b, Fig. 5), the percussion mechanism is triggered and the striker is lowered to the bottom of the well, setting the bit to the percussion position and using a special purge valve (c, Fig. 4).

The use of an original well blowdown scheme and a vacuum cleaner above the wellhead allowed solving a very important task - to reduce emissions and dust concentration, as well as to reduce the man-made load on the environment and workers' health. Dust emissions  $Q$  from the drilling rig at a certain distance from the drilling site  $S$  for different types of machines (Fig.5).

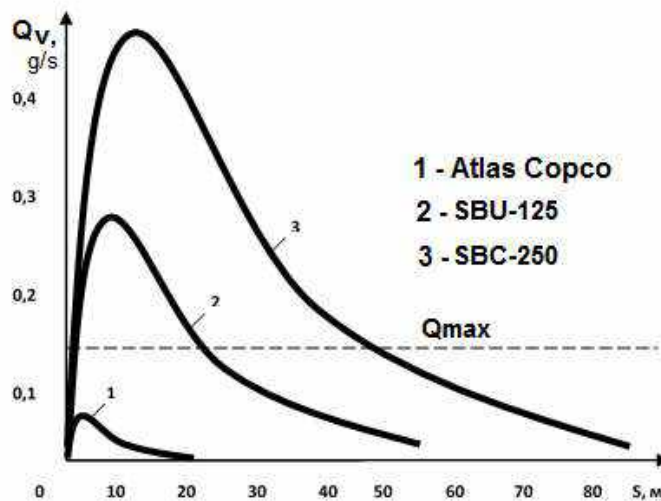


Figure 5 - Dependence of dust emissions on the type of drilling rig

The proposed method for determining dust emissions when drilling blast holes with drilling rigs and methods for destroying rocks made it possible to determine the amount of dust released into the environment. Mass of dust released when drilling wells:

$$m_{n6} = \sum_{i=1}^n Q_{opi} \cdot q_i \cdot T_i \cdot K_2 \cdot 10^{-3} \quad , \quad (7)$$

where:  $Q_{opi}$  is the volumetric power of the  $i$ -th drilling machine; dust extraction of dust from 1 m<sup>3</sup> of drilled rock of the  $i$ -th car, kg / m<sup>3</sup>; Net operating time of the drilling machine per year, h / year;  $n$  - the total number of working machines in the quarry;  $K_2$  - coefficient that takes into account the humidity of the material. The value of  $Q_{opi}$  can be obtained from the indicators of technical capacity:

$$Q_{oni} = Q_{лп} \frac{\pi d^2}{4} \cong 0,785 Q_{лп} \cdot d^2, \text{ m}^3/\text{h} \quad (8)$$

Mass of dust released when drilling wells per unit time:

$$m_{\text{дрп}} = Q_{oni} \cdot q_i / 3600, \text{ g/s} \quad (9)$$

The maximum one-time emissions of hazardous products from drilling are shown in the table. 4:

Table 4 - Results of calculating dust emissions during the operation of various drilling rigs

The results of the research carried out on the productivity of drilling rigs in the quarries of Ukraine are presented in the graphs (Fig. 6). The dependences of the drilling speed  $V_b$  on the strength of rocks in the range  $f = 5-20$  have been established. The research was carried out for quarries of Ukraine, where rocks and other minerals such as granite, marble, gabbro, labradorite, iron quartzite, diabase, diorite, travertine, sandstones, shales are developed and mined in difficult conditions.

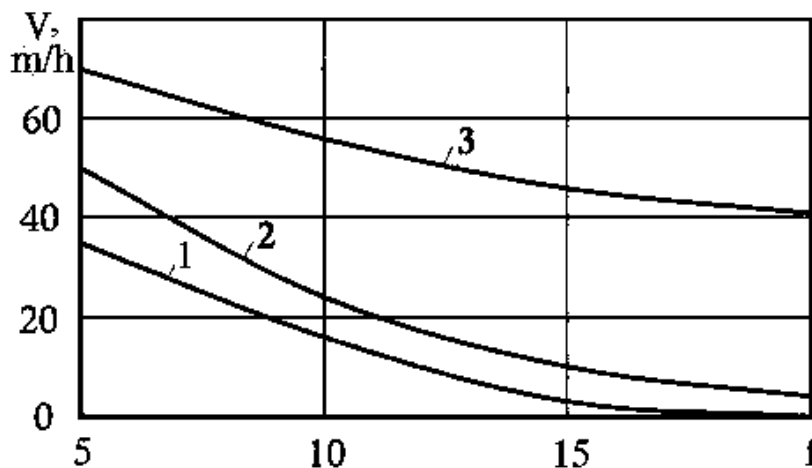


Figure 6. Dependence of the mechanical drilling speed on the strength of rock.:  
1 - SBC- 250; 2 - SBU- 125; 3 - "Atlas Copco ROC-L8".

As can be seen from the graph (Fig. 6), with rock strength  $f = 10$ , the drilling speed of the ROC-L8 drilling rig with COP DTH hammers is 2 times higher than that of SBU-125, and 6 times higher than SBC-250. When drilling wells with rock strength  $f = 14$ , the productivity of the ROC-L8 drilling rig is 3 times higher than that of the SBU-125, and 4 times higher than that of the SBC-250. With rock strength  $f = 18$ , the ROC-L8 rig has a 2-fold advantage in drilling speed over SBU-125, and 6 times over SBC-250. The productivity of ROC-L8 drilling rigs in the quarries of Ukraine in 2018 was 5600 m, which is 20% higher than that of the SBU-125 (4650 m). The productivity of the SBC-250 machine was 4200 m per month. Figure 7 shows the structure of discounted costs for drilling one running meter of a well for various drilling rigs.

Types drilling rigs	Average volume productivity, $Q_{opi}$ m <sup>3</sup> /h, by rock hardness					Dust suppressors	Specific dust release, kg/m <sup>3</sup>
	f=5-10	f=10-14	f=12-14	f=14-16	f=16-18		
SBC	1,46	1,41	1,21	0,98	0,83	ВІІІ	0,9
						УСІІ	1,3
						БЗІІ	3,2
SBU	2,18	2,02	1,80	1,50	1,29	ВІІІ	0,7
						УСІІ	0,9
						БЗІІ	2,35
Atlas Copco	6,07	5,61	5,161	4,65	4,29	ВІІІ	0,3

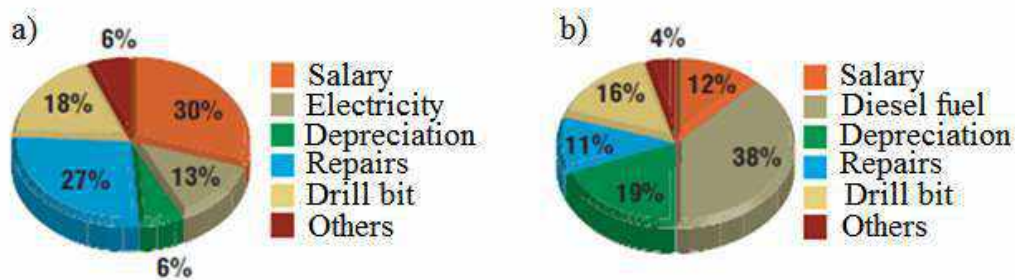


Figure 7. Structure of the cost of drilling: a) – SBC; b) – Atlas Copco.

Cost structure analysis shows that Atlas Copco's pneumatic submersible drilling rigs COP outperforms the SBC roller cutters primarily in terms of annual productivity [12]. This is due to the destruction of hard rocks with high-performance pneumatic hammers, an autonomous diesel drive, full automation of drilling support (replacement and extension of drill rods, replacement of bits, horizontal drilling), which reduces the drilling time and shortens the drilling time. transition from well to well. All Atlas Copco mechanisms are hydraulically driven, which provides good control and optimization of drilling parameters. But it should be borne in mind that while foreign cars are new, the cost of their repair is insignificant, but every year of operation it will grow.

Inefficient drilling rigs SBC-250 and SBU-125 are limited by their technical capabilities and energy efficiency, as well as by the conditions of use. Proceeding from the fact that drilling speed is an integral and comprehensive indicator of drilling operations in open pits, and especially the destruction of hard and heavy rocks, the use of Atlas Copco drilling machines with COP DTH hammers is the best option and a very promising direction of drilling equipment. The use of high-performance Atlas Copco machines, along with the development and implementation of modern explosives, makes it possible to reduce the drilling diameter, which will lead to a decrease in blasting operations, which significantly improves both the explosive and technical and economic indicators of mining enterprises in general.

**Conclusions.** It is necessary to select drilling equipment on the basis of a technical and economic calculation of the conditions for achieving the minimum cost of the entire complex of processes: drilling, explosives, excavation, transportation, crushing, as well as the cost of explosives. The results of operation of Atlas Copco machines with COP DTH hammers have confirmed their effectiveness in drilling in a wide range of strengths in open pit mining [13].

COP down-the-hole hammers are more promising in use than SBC drilling rigs due to their increased productivity, efficiency, and drive motor power. High mobility and speed reduce technical waste of time. Atlas Copco drilling rigs provide high technical capabilities for high-precision drilling of wells with a diameter of 35 to 305 mm, a depth of 54 m in the range of 0 - 90 degrees.

The well blowdown system leads to high purity of cuttings, which qualitatively affects the efficiency of blasting operations. A reliable dust extraction system and a sealed cabin ensure the necessary hygienic standards during drilling, minimize vibration and noise impact on personnel and the environment. Reduces the emission of drill dust into the environment. The disadvantage is the high initial cost of drilling rigs and high requirements for the quality of the working fluid of the hydraulic drive.

Analysis of studies of the efficiency of Atlas Copco drilling machines in foreign and Ukrainian open pits shows their high productivity, efficiency and promising application.

## REFERENCES

1. V.F. Byzov, "Osnovy tehnologhii girnychogo vyrobnyctva", pidruchnyk, "Girnyctvo", Kryvyj Rig.: Mineral, p. 247, 2000.
2. Z.R. Malanchuk, V.S. Havrish and V.A. Striha, "Tehnologhii vidkrytoi rozrobky korysnyh kopalyn", navch. posib., Rivne, NUVGP, p. 285, 2013.
3. O.M. Terentiev, A.J. Klechov, A.I. Kruchkov and N.I. Sergienko, "Tehnologichni parametry rujnuvannja girskyh porid pry clasychnomu i molekularno-hvylyjovomu pidhodah", Energetyka: ekonomika,tehnologii, ekologiya: Scientific Journal, no.1, pp. 73-82, 2019.
4. Yu.I. Protasov, "Razrushenie gornyh porod", Uchebnik,Izdatelstvo: Gornaya kniga, ISBN: 5-7418-0032-7; p.455. 2003.
5. V.V. Olizarenko, "Osnovy ekspluatatsii gornyh machine i oborudovaniya", ucheb.posobie, M.: Nedra, p.395, 2008.
6. O.M. Terentiev, A.J. Klechov and N.I. Sergienko, " Statyko-dynamichne rychlennja merzlyh porid", Naukoviy Journal "Geoinzhenerija", vol.1, pp. 28-39, 2020.

7. B.A. Katanov, "Perspektivy razvitiya burovogo oborudovaniya karierov", Fundamentalnye issledovaniya, no.12-2, pp. 228-230, 2007.
8. R.Yu. Poderny. Stanki rotary drilling wells on open tender career, Hornaja elektromehanyka, no. 12, pp. 25-27, 2006.
9. B.A. Katanov, M.s. Safonov, "Instrument dlja bureniya vzryvnyh skvazhin na karjerah". Moskva: Nedra, p.173, 2014.
10. N.N. Strabykin, "Technika bureniya vzryvnyh skvazhin v merzlyh porodah", M.; Nedra, p.172, 1989.
11. M.I. Sergienko, V.P. Kotljarov, "Perspektyvni metody pidvychnnyya robotozdatnosti detaley girnychyh mashyn lazernoyu obrobkoyu", Girnyctvo, Zbirnyk naukovykh prac., -K: НТУУ "КПІ" ЗАТ "Техновибух", 2011.- Вип.15 Р. 108-115
12. A.S.Tanayno, A.A.Lipin, "Sostojanie i perspektivy udarno-vrachatel'nogo bureniya vzryvnyh skvazhin na karjerah", Physico-tehnicheskiye problemyrazrabotki poleznyh iscopaemyh.Ucheb.posob. M.:Nedra, p.182, 2004.
13. <http://www.atlas.copco>. Burovi stanky "Atlas Copco" dlya vidkrytysh hirnychyh robit. Sayt kompanii "Atlas Copco", 2017.

УДК.622.24.05

**О.М. Терентьев**, д-р техн. наук, проф. ORCID 0000-0003-2523-2804

**М.І. Сергієнко**, викладач, ORCID 0000-0001-8284-9072

**А.І. Гузан**, студент

**Національний технічний університет України**

**"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"**

## **ЗАСТОСУВАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН НА КАР'ЄРАХ УКРАЇНИ**

Майже по всій Україні в надрах українського кристалічного геологічного щита знаходиться понад 500 млн. м<sup>3</sup> розвіданих запасів високоякісного природного будівельного та оздоблювального каменю. Особливу важливість для країни представляють родовища граніту як основної стратегічної сировини для будівництва промислових, оборонних та цивільних споруд, доріг, злітно-посадкових смуг, аеродромів, транспортних тунелів, метро, тощо. Сьогодні в Україні понад 150 кар'єрів видобувають цінну для країни сировину - природний камінь. У той же час, враховуючи високу міцність і абразивність гранітів, їх видобуток надзвичайно складний, дорогий, трудомісткий. Немає машин, які могли б безпосередньо розробляти міцні гранітні породи вулканічного та метаморфічного походження. Для забезпечення необхідних обсягів видобутку і послідувочої переробки граніту, необхідно попередньо подрібнити моноліт гірської породи. Цей складний технічно і технологічний процес здійснюється потужними буровими установками. в міцних і дуже міцних гірських породах бурінням від десятків до сотень свердловин, діаметром від 80 до 350 мм, і глибини до декількох десятків метрів. Процес завершують зарядженням пробурених свердловин спеціальною вибухівкою, і завершають масовим вибухом.

У представлених дослідженнях проаналізовано та встановлені основні показники, що впливають на ефективність і продуктивність бурових установок на кар'єрах України. Розглянуто, обґрунтовано та рекомендовано раціональні способи руйнування гірських порід для конкретних гірничо-геологічних умов видобувного підприємства. Оптимізація ефективності і продуктивності буріння проводилась шляхом вибору способу руйнування, від міцності гірських порід, типу бурової машини та параметрів породоруйнівних інструментів. Представлена в роботі методика розрахунку дозволяє обмежити пилове забруднення зони бурових робіт в залежності від швидкості і глибини буріння, дозволить вибирати оптимальні режими роботи бурової машини. Отримані результати досліджень підтвердили правильність та ефективність нових інноваційних систем буріння твердих порід на кар'єрах України.

**Ключові слова:** кар'єр, руйнування гірських порід, бурова установка, пневматичний ударник.

Надійшла 30.06.2020

Received 30.06.2020

О.А. Сірий, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-5811-9037  
А.С. Соломаха, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0002-1061-6277  
Т.В. Чирка, канд. техн. наук, наук. співр. ORCID 000-0002-8843-7025  
Д.З. Пакош, магістр, ORCID 0000-0001-5811-9037  
Національний технічний університет України «Київський  
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗПИЛЕННЯ ЗРІДЖЕНОГО ГАЗУ ДЛЯ ДВЗ

В роботі представлені результати чисельного моделювання процесу розпилення зрідженої суміші пропан-бутану. Метою роботи є розробка чисельної моделі термогідродинамічного процесу розпилення зріджених газів та визначення теплофізичних та геометричних параметрів факелу розпилення з ціллю удосконалення існуючої схеми паливоподачі двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ). У роботі представлено теоретичні аспекти процесу розпилення зрідженого газу та визначено основні теплофізичні параметри, необхідні для проведення чисельних розрахунків досліджуваного явища. Застосовано метод чисельного моделювання, що базується на усередненому за Рейнольдсом рівнянні Нав'є-Стокса, модель налаштована за методом скінченних об'ємів. Виконано чисельні експерименти при впорскуванні зрідженої суміші пропан-бутану у потік повітря протягом періоду часу, достатнього для згорання в циліндрі ДВЗ. Встановлено залежність глибини проникнення паливного струменю у потік окисника, що набігає, в залежності від тиску подачі газу. Отримані профілі швидкостей, температур та концентрацій впорскуваної суміші та газової фази. Проведено теоретичну оцінку середнього розміру краплин розпилюваної рідини.

**Ключові слова:** глибина проникнення струменю, розпил, атомізація, зріджений газ, чисельна модель.

**Вступ.** Розпилення рідин в газових середовищах є важливим технологічним процесом в багатьох галузях. Існує велика кількість пристроїв для розпилення рідини, які являють собою розпилювачі чи форсунки. Розпилення струменю рідини відбувається за рахунок кінетичної енергії рідини, приведеного до високої швидкості повітря чи газу чи механічної енергії, прикладеної ззовні обертовим чи віброуючим пристроєм. Оскільки процес розпилення має випадковий характер, то результуюча розпилювана рідина характеризується широким діапазоном розмірів краплин.

Одним з важливих напрямків застосування розпилювання - двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ). Згорання рідкого пального в дизельних двигунах, двигунах з іскровим запалюванням, газових турбінах, ракетних двигунах та промислового паливоспалюючому обладнанні залежить від ефективності розпилення палива в об'ємі окисника, що призводить до зростання питомої площі поверхні палива і дозволяє досягнути високого ступеня змішування та випаровування. У більшості систем спалювання зменшення розміру краплини палива приводить до вищих об'ємних показників теплоти спалювання, легшого запалювання, ширшого діапазону горіння, нижчих показників забруднюючих викидів з вихлопними газами.

Як правило, для здійснення розпилення використовують розпилювачі (атомізатори), основною вимогою при цьому являється висока відносна швидкість між рідиною, що розпилюється, та середовищем, куди здійснюється впорскування. Деякі атомізатори дозволяють досягнути таких параметрів за рахунок витоку рідини із високою швидкістю у відносно повільний потік газу чи повітря. Альтернативним підходом досягнення значної різниці швидкостей між рідною та газоподібним середовищем є повільне виштовування рідини у високошвидкісний потік газу (розпилення повітряним потоком).

При витіканні рідини через малий отвір під високим надлишковим тиском потенційна енергія перетворюється у кінетичну (швидкість). Для типового гідрокарбонатного палива при відсутності втрат на тертя тиск у соплі падає до 138 кПа, продукуючи швидкість на виході 18,6 м/с. Так як швидкість зростає як квадратний корінь тиску, то при 689 кПа швидкість становитиме 41,5 м/с, а при 5,5 МПа - 117 м/с.

Простий кільцевий отвір використовують для впорскування рідини в навколишнє повітря. Найкраще розпилення досягається за рахунок зменшення розміру отвору, але на практиці зазвичай обмежують мінімальний розмір отвору приблизно 0,3 мм. Найчастіше прості отвори атомізаторів (сопел) використовують у турбореактивних пальниках, дизельних та ракетних двигунах.

Характеристики процесу розпилення залежать від розміру та геометрії, фізичних властивостей розпилюваної фази (впорскуваної рідини) і нерозривної фази (газового середовища, у яке здійснюється впорскування). Для простих сопел діаметр отвору є вирішальним в процесі розпилення рідини. Теорія передбачає і експеримент підтверджує, що середній розмір краплини є приблизно пропорційний до квадратного кореня діаметру струменя рідини. Отже, збільшення у розмірах сопла приводить до зменшення подрібнення крапель розпалюваної рідини.

© О.А. Сірий, А.С. Соломаха, Т.В. Чирка, Д.З. Пакош, 2020



Характеристики потоку рідини та спрею більшості розпилювачів значним чином залежать від властивостей рідини таких як густина, в'язкість і поверхневий натяг. Значимість густини для процесу розпилення є применшеною тим фактом, що більшість рідин показують лише мінорні різниці у цій властивості. Більше того, наявні дані впливу густини рідини на середній розмір краплини показує її досить низький вплив.

Важливою характеристикою рідини в процесі розпилення є поверхнєве напруження, що відображає силу опору формування нових поверхонь (процесу руйнування струменю на краплини). Число Вебера являється відношенням сил інерції до сил поверхневого натягу, що є корисним безрозмірним параметром для кореляції розміру краплин. Для більшості чистих рідин в контакт з повітрям поверхневий натяг зменшується зі зростанням температури [1].

Не менш вагомий вплив на атомізацію має в'язкість, зростання якої приводить зниження числа Рейнольдса і також затримує розвиток будь-якої природної нестабільності в струмені. Комбінований ефект полягає в затримці дезінтеграції та зростанні розміру краплин у розпилюваній рідині. В загальному, зростання в'язкості при використанні простих конічних сопел має несприятливий на якість розпилення вплив, оскільки втрачає через в'язкість достатньо великі, то відповідно менше енергії залишається для розпилення і результати розпилення є більш «грубими» [2].

**Мета дослідження.** Метою роботи є розробка і тестування спрощеної чисельної моделі теплогідродинамічного процесу розпилення зріджених газів та визначення вхідних параметрів з використанням результатів експериментальних досліджень. Використання уточненої чисельної моделі спростить процес вдосконалення системи живлення двигуна зрідженим газом, яка забезпечує ефективне сумішоутворення для стаціонарних та середньої потужності транспортних двигунів відповідно до сучасних екологічних стандартів.

Розуміння процесу атомізації рідини та його ключових параметрів складають основу у розробці спрощеної чисельної моделі теплогідродинамічного процесу розпилення зріджених газів та вимагають попередньої детермінації в якості вхідних параметрів.

**Теоретичні основи і результати досліджень.** Вивчення випаровування багатокомпонентних рідких краплин слід розпочинати з розгляду випаровування однієї краплини з точки зору рівнянь збереження маси, часток та енергії рідкої та газової фаз. Додаткові припущення і спрощення ведуть до простіших моделей випаровування, придатних для CFD моделювання. Маса- та теплопереносу у моделюванні процесу випаровування спрею виражаються за допомогою критеріїв Шервуда та Нуссельта, відповідно.

Випаровування – процес фазового переходу, у якому молекули рідини долають сили міжмолекулярного притягування і відділяються у навколишнє газове середовище. При підведенні теплоти до рідини її температура, а, отже, і кінетична енергія молекул рідини, зростає, що характеризується пришвидшенням процесу випаровування. Також зменшення навколишнього тиску збільшує спричиняє зростання швидкості випаровування.

Чисельне моделювання виконано з використанням пакету прикладних програм газової динаміки (CFD) ANSYS CFX 14.5.

Дискретизації моделі здійснена з використанням методу скінченних об'ємів, що дозволяє проводити розрахунки при низькому споживанні оперативної пам'яті та характеризується швидкістю отримання результатів навіть при високих значеннях числа Рейнольдса турбулентних потоків.

Серед наявних літературі підходів у моделюванні процесу випаровування рідини вприскуваної рідини та виборі моделі турбулентності можна виділити пряме числове моделювання (DNS), усереднені по Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стокса (RANS) та метод великих вихорів (LES). DNS ґрунтується на прямому розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса та отриманні детальної картини турбулентних потоків [3-6], але має обмеження у застосуванні, а саме для низьких значень чисел Рейнольдса, що не відповідає запитам поточного дослідження. LES полягає у явному розрахунку значних за масштабами ділянок турбулентності, тоді як вплив дрібних вихорів розраховується з використанням правил підсіткового замикавання. Не дивлячись на підвищену точність розрахунку турбулентних потоків LES вимагає значні обчислювальні потужності. Оскільки в даному дослідженні цікавить прикладна сторона процесу випаровування, а саме теплогідродинамічна задача утворення парогазової суміші та її теплотехнічні характеристики, отримання усереднених по часу полів швидкостей за допомогою RANS із суттєвою економією обчислювальних ресурсів [7] визначає подальше застосування його в якості моделі турбулентності та k-ε моделі обчислення в'язкості вихору.

Розрахунок процесу вприску суміші зріджених газів пропану та бутану ґрунтується на основі рівнянь транспорту, а саме рівняння нерозривності, моменту та збереження енергії.

Рівняння нерозривності має вигляд

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (1)$$

де  $\nabla(\rho U)$  - дивергенція густини потоку частинок рідини;  
 $\rho$  - густина частинок рідини,  $t$  - час.

Рівняння руху

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla(\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \tau + S_M \quad (2)$$

де тензор напруженості  $\tau$  відноситься до швидкості деформації

$$\tau = \mu \left( \nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla U \right) \quad (3)$$

Рівняння енергії

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\rho U h_{tot}) = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(U \tau) + US_M + S_E \quad (4)$$

де  $h_{tot}$  - ентальпія, що відноситься до статичної ентальпії  $h(T, p)$  через

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2 \quad (5)$$

$\nabla(U \tau)$  - відображає роботу, що відповідає в'язкому напруженню. Це моделює внутрішнє нагрівання у рідині за рахунок в'язкості і нехтується у потоці рідини.

$US_M$  - відповідає за роботу моментів зовнішніх джерел, які нехтуються при моделюванні.

Краплини описуються розміром – діаметром, швидкістю, температурою та складом. Діаметр являється найбільш загальною мірою [2]. Як правило, розмір краплини описується певним середнім значенням – середнім діаметром Саутера (SMD,  $d_{32}$ ) та залежить від типу сопла, витрати рідини, тиску подачі та розпилювача. SMD – діаметр такої краплини, що має відношення об'єму до площі поверхні рівне відношенню між сумою всіх об'ємів краплин до суми всіх площ поверхонь краплин.

Оскільки експериментальне визначення середнього розміру краплин розпилюваної рідини характеризується певною специфікою та складністю реалізації (зйомка з низьким рівнем експозиції, аналіз лазерної дифракції (LDA) [8], а також не являється безпосередньою метою даного дослідження (теплотехнічні параметри технології розпилення зрідженого газу в системі ДВЗ), то доцільно скористатися існуючими емпіричними рівняннями.

Серед емпіричних рівнянь для визначення середнього діаметру краплини часто використовують рівняння Ніроюсу та Kadota (1974), Ніроюсу та Arai (1990) [8], що базуються на числі Рейнольдса, числі Вебера та діаметрі випускного отвору сопла  $d_0$ . При повному розпиленні рідини застосовується формула  $SMD = 8,7(Re_i We_i)^{-0,28} d_0$  (6)

Існуючі формули [9-12] застосовувалися до різних типів сопел та умов розпилювання та вимагають уточнення та корегування у відповідності з досліджуваною моделлю та експериментом. Тому розрахункове рівняння повинне відповідати якнайближче параметрам рідини та використовуваного сопла.

Вприск суміші зрідженого газу здійснюється за допомогою сопла під тиском (LPi). Розпилення здійснюється з певним конічним профілем (full cone), тобто при виході із отвору сопла краплини слідує траєкторії, визначеній формою вихідного отвору сопла. В результаті таке розпилення має стійкий кут та однорідний розподіл краплин. Розмір краплин та розподіл розпилення характеризуються значною передбачуваністю та незалежністю від ламінарного потоку.

У виборі формули для розрахунку середнього діаметру краплин слід також враховувати розпилення рідини, що супроводжується її фазовою зміною внаслідок падіння тиску та відповідних температур (так звані спалахуючі спреї).

Гемчі [13] дослідив спалахуючу атомізацію гідрокарбонатів, що містять n-гексадекан та n-бутан (рис. 1).

Дослідження розміру краплини здійснювалося на основі аналізу отриманих фотознімків та зведені до наступної кореляції (відносна похибка вимірювання 6 % при довірчій ймовірності  $W = 0,95$ ):

$$SMD = 118,4 - 28,3(\Delta T^* - K) \quad (6),$$

де  $\Delta T^*$  – безрозмірний ступінь перегріву,

$K$  – безрозмірне число кавітації, що показує різницю тисків та вимірює опір потоку до кавітації.

$$K = \frac{P_0 - P_v}{1/2 \rho U^2} \quad (7),$$

де  $P_0$  – тиск середовища, у яке здійснюється впорскування,

$P_v$  – тиск середовища подачі рідини до сопла,

$\rho$  – густина рідини,

$U$  – швидкість витікання рідини із сопла.

$$\Delta T^* = \Delta T / \Delta T_{crit} = (T_{inj} - T_{sat}(P_0)) / (T_{sat}(P_{inj}) - T_{sat}(P_0)) \quad (8),$$

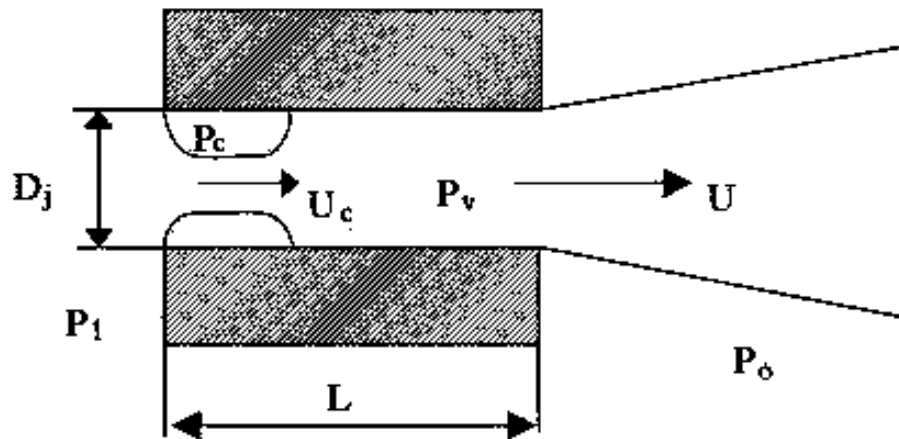


Рисунок 1 – Параметри форсунки та розпилюваної рідини

де  $T_{inj}$  – температура рідини, що впорскується, К;

$T_{sat}(P_0)$  – температура насичення рідини при тиску навколишнього середовища  $P_0$ , К;

$T_{sat}(P_{inj})$  – температура насичення рідини при тиску перед подачею в сопло, К;

В статті розглядається нестационарна задача моделювання високошвидкісного струменю суміші пропану і бутану у зрідженому стані з форсунки LPG 2A (рис. 2, а) та представляє собою поліпропіленову трубку із внутрішнім діаметром 1мм та довжиною 150 мм, захищену латунним корпусом, що установлюється безпосередньо у канал, де здійснюється розпилювання. Геометрична комп'ютерна модель, що побудована для проведення чисельного експерименту, завдяки симетричності може бути представлена у половинному вигляді (рис 2, б).

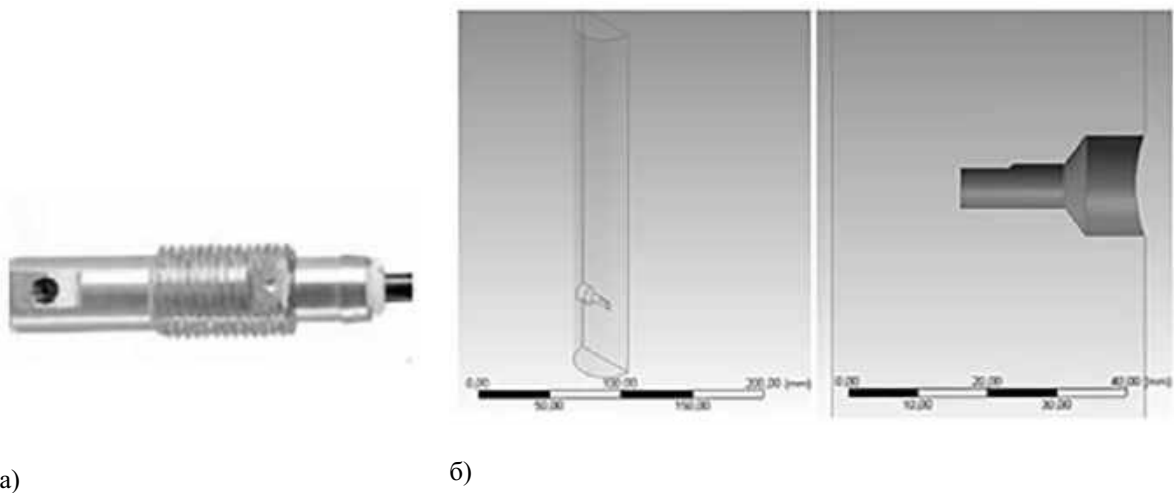


Рис. 2 – Форсунка типу LPG 2A та її геометрична модель чисельної симуляції процесу розпилення зрідженого газу (повне зображення моделі та ділянка з деталізацією форсунки)

Дискретизація моделі здійснена з використанням методу скінченних об'ємів, тому генерування сітки наявної геометричної моделі здійснено тетраедрами (рис. 3).

Граничні умови наступні: подача суміші зріджених пропану та бутану у співвідношеннях (100:0, 50:50, 0:100) газу при температурі 293 К в трубу діаметром 45 мм та довжиною 300 мм при різних швидкостях у повітряний потік з температурою 293 К та швидкістю 30 м/с, що відповідає наближеній витраті повітря необхідній для спалювання суміші пропану та бутану.

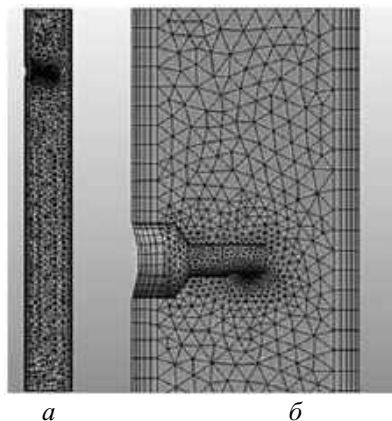


Рис. 3 – Згенерована сітка геометричної моделі: *a* – повне зображення моделі; *б* – ділянка з деталізацією форсунки

На виході задані граничні умови вихідного потоку в середовище з тиском 1 атм. Впорскувана суміш зрідженого газу розглядається як така, що являє собою еквівалентну за масою кількість палива, необхідного для виконання такої ж роботи, яку отримують при спалюванні дизельного палива. Розрахунки необхідної кількості впорскуваного у циліндр зрідженого газу та повітря приведені у табл. 1 для усереднених показників двигунів Isuzu автобусів «Богдан» міського типу. Експериментальні дослідження виконані в умовах дослідного експериментального стенду [14].

Таблиця 1 – Розрахунок середнього діаметру краплин розпилюваної зрідженої пропан-бутанової суміші

Компоне нт	$P_0$ , МПа	$P_1$ , МПа	$\Delta P$ , МПа	$P_2$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$U$ , м/с	$T_{inj}$ , К	$T_{sat}(P_0)$ , К	$T_{sat}(P_{inj})$ , К	$K_{crit}$	$K$	$\Delta T^*$	SMD, $\mu\text{m}$	SMD <sub>avg</sub> , $\mu\text{m}$
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,1	0,5	0,095	0,405	528	39,9	293	230,9	268,18	0,82	0,72	1,67	50,78	68,61
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,1	0,5	0,104	0,396	582	39,9	293	272,2	314,34	0,82	0,64	0,49	86,45	68,61
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,1	1	0,189	0,811	528	56,43	293	230,9	292,11	0,82	0,84	1,01	65,80	77,34
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,1	1	0,208	0,792	582	56,43	293	272,2	341,86	0,82	0,74	0,30	88,87	77,34
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,1	2	0,378	1,622	528	79,8	293	230,9	320,78	0,82	0,90	0,69	73,25	81,65
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,1	2	0,417	1,583	582	79,8	293	272,2	374,87	0,82	0,80	0,20	90,04	81,65

Моделювання випаровування та конденсація пропано-бутанової суміші ґрунтується на масових потоках та відтоках в підобластях випаровування та конденсації. Проведення моделювання теплогідродинамічного процесу впорскування суміші зріджених газів вимагає попереднього обчислення параметрів границі розділення рідини та газу, міжфазного коефіцієнту дифузії, теплоти випаровування, коефіцієнту масоперенесення між рідиною та газом для суміші пропан-бутану, локальний крок лінеаризації міжфазного масопереносу.

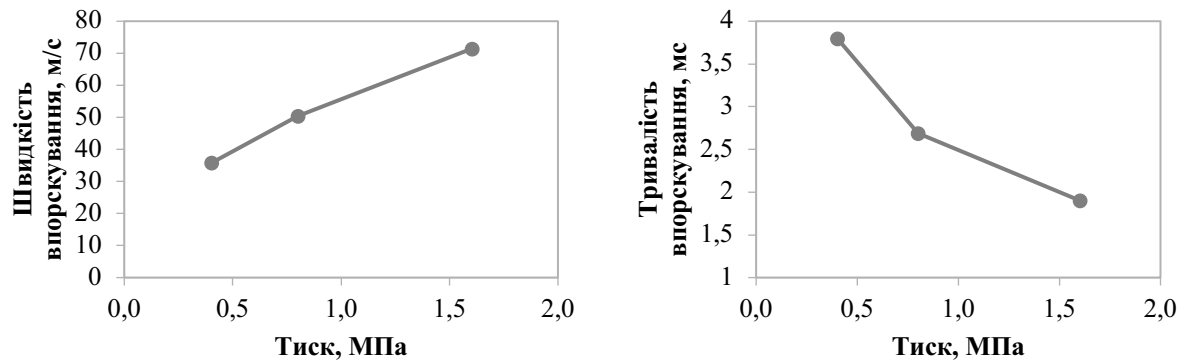
Оскільки подача пального через форсунку є дозованою та обмеженою у часі, тому розглядаємо нестационарну задачу із завданням тривалості подачі суміші зрідженого палива, що залежить від швидкості впорскування, та кроком розрахунку 0,1 мс. Оскільки тривалість залежить від швидкості впорскування, що в свою чергу залежить від тиску, тоді слід використати залежності тривалості впорскування та швидкості впорскування від тиску (рис. 4).

Для моделювання процесу впорскування було використано матеріали із бібліотеки розрахункового комплексу – суміші зріджених пропану-бутану та повітря. Причому, газова суміш пропан-бутану після випаровування вважається змінною за компонентами суміш за рахунок змішування з повітрям, тоді як впорскувана суміш зріджених газів пропан-бутану – незмінна за складом компонентів.

Проведенню чисельного розрахунку передувала перевірка літератури на наявність даних, які б могли бути використані для верифікації розробленої числової моделі. Близькими за суттю дослідження наведені у джерелі [15], де розглядається процес впорскування зрідженого бутану при різному надлишковому тиску та різній тривалості впорскування при кімнатній температурі.

Порівняння результатів розрахунку впорскування зрідженого бутану при тиску 2 МПа та тривалістю впорскування 2 мс з літературними даними здійснено на основі глибини проникнення та приведені на (рис. 5, а) [8]. Середньоквадратичне відхилення результатів досягає 25% та значною мірою визначається відмінностями геометричних характеристик застосовуваних інжекторів, заданих фізичних властивостей зрідженого газу та середнього розміру розпилюваної краплини, розрахованої на основі відомої в літературі емпіричної формули. Тому отримані результати дають можливість якісно оцінити отримані в подальшому результати чисельного розрахунку впорскування зрідженого газу та потребує уточнюючої верифікації на розробленому експериментальному стенді.

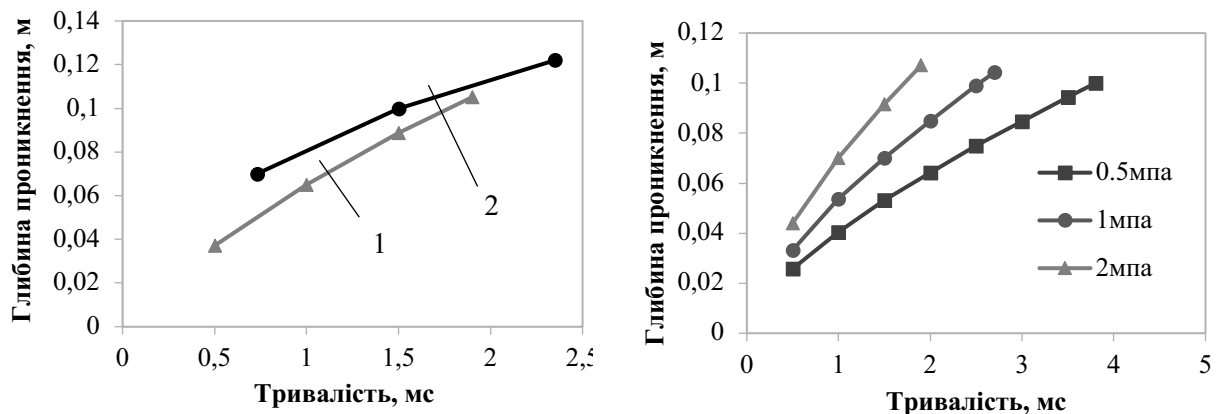
Глибину проникнення доцільніше оцінювати без впливу повітряних потоків для формування суміші згоряння для різних складових зрідженого газу та їх суміші. Проведені чисельні розрахунки швидкості та температури пропану, бутану та їхньої суміші у пропорції 50 %:50 % при швидкості впорскування, що відповідає 2 МПа на вході у форсунку, представлені на рисунках.



а) б)

Рисунок 4 – Швидкість (а) та тривалість (б) впорскування в залежності від тиску

Як видно на рис. 5, б, проведено розрахунки залежності глибини проникнення пропану-бутану при тиску впорскування 0,5 МПа, 1 МПа, 2 МПа в проміжку часу до 4 мс. Впорскування здійснювалося у середовище із атмосферним тиском. Кількість впорскуваної суміші залишається постійною, тому зростання тиску впорскування відображається на тривалості подачі зрідженого газу. Із зростанням тиску впорскування зростає глибина проникнення.



а) б)

Рис. 5 – Глибина проникнення струменя у потік окисника в залежності від часу впорскування (а) та часу відкриття форсунки (б), 1 – розрахунок, 2 – Simón M. et all

Оскільки в реальних умовах пальне формує суміш із повітрям, то результати чисельних розрахунків відповідають схемі при подачі повітря перед форсункою.

Проведені розрахунки процесу впорскування суміші пропану і бутану у повітряний потік представлені на рис. 6 – 8.

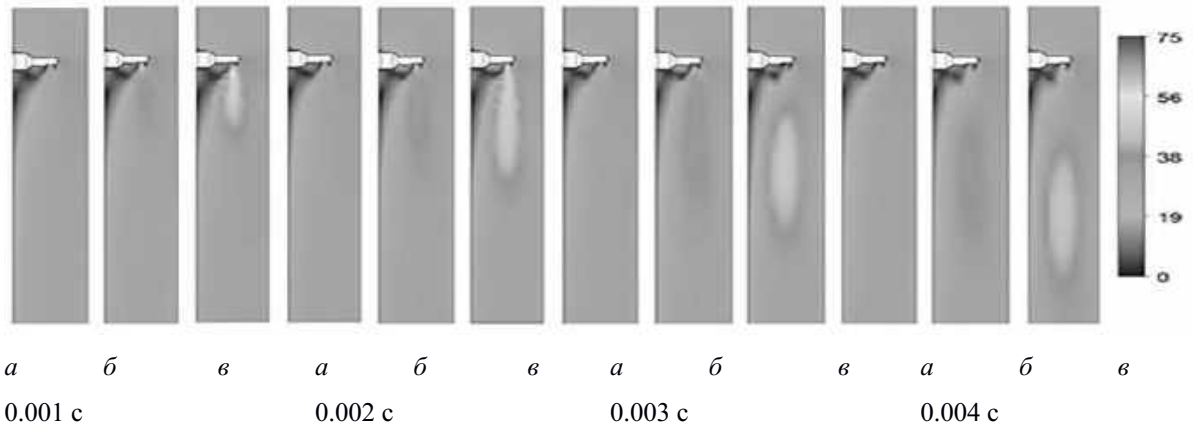


Рисунок 6 – Поля швидкостей повітря та суміші пропан-бутан при зміні часу та тиску впорскування (а – 0,5 МПа, б – 1 МПа, в – 2 МПа)

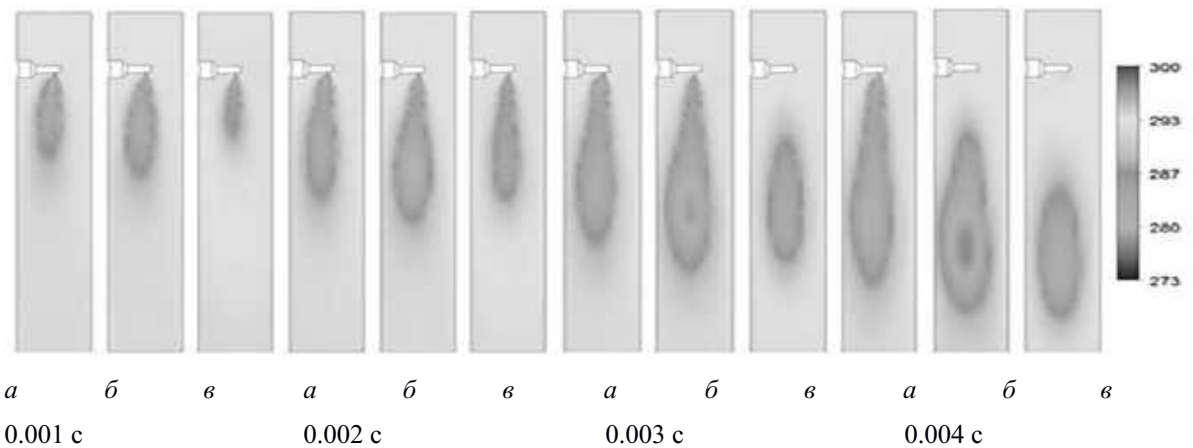


Рисунок 7 – Температурні поля повітря та суміші пропан-бутан при різному часі та тиску впорскування (а – 0,5 МПа, б – 1 МПа, в – 2 МПа)

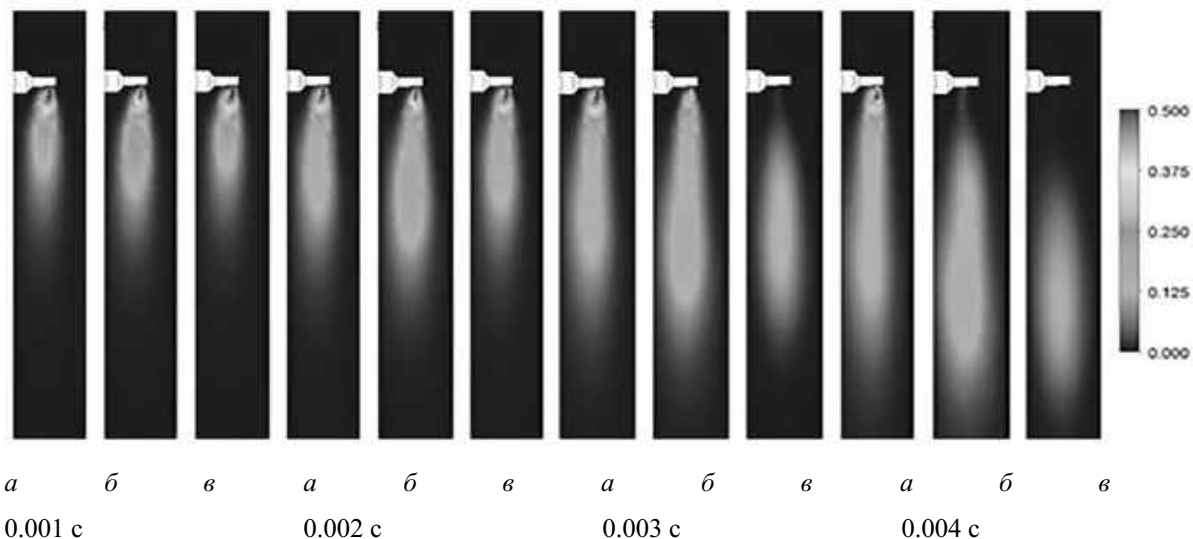


Рисунок 8 – Поля концентрацій суміші пропан-бутан при різному часі та тиску впорскування (а – 0,5 МПа, б – 1 МПа, в – 2 МПа)

При розміщенні форсунки у каналі проявляється вплив повітряного потоку на форму впорскуваної суміші зрідженого газу за рахунок створення ділянок завихрень за інжектором, що зміщує впорскувану рідину у сторону основи монтажу інжектора.

Аналізуючи графіки температурних полів по перерізу каналу на рисунку 7, слід відзначити заохоложені ділянки нижче 280 К. Випаровування впорскуваного зрідженого газу у зв'язку з різкою зміною його тиску з 2 МПа до атмосферного тиску спричинює заохолодження повітряно-газового потоку, що розглядається перспективним з точки зору підвищення ефективності роботи циклу ДВЗ.

#### **Висновки**

1. Систематизовані теоретичні аспекти процесу впорскування зріджених газів та визначено основні фізичні параметри, необхідні для проведення подальшого чисельного моделювання, а саме емпірично встановлено середній розмір розпилюваної краплини в залежності від надлишкового тиску та інші фізичні параметри.

2. Вибраний найбільш оптимальний метод чисельного моделювання, що базується на усередненому за Рейнольдсом рівнянні Нав'є-Стокса та проведена дискретизація моделі за допомогою методу скінченних об'ємів.

3. Розроблена чисельна модель, що дозволяє моделювати теплогідродинамічні процеси впорскування зріджених газів у канал подачі підготовленої повітряно-паливної суміші у циліндр ДВЗ з відносною похибкою 17,8 %.

4. Проведені чисельні експерименти з використанням розробленої моделі з наступними етапами дослідження:

а. Впорскування пропану, бутану та їхньої суміші у повітряне середовище та встановлення глибини проникнення спрею за проміжок часу подачі достатньої для спалювання в одному циклі роботи циліндра ДВЗ та отримані поля швидкостей, температур та концентрацій газової фази.

б. Проведення дослідження впорскування суміші пропану та бутану у співвідношенні 50 %:50 % при різному тиску впорскування: 0,5 МПа, 1 МПа, 2 МПа. Встановлено залежність глибини проникнення від тиску подачі газу.

с. Впорскування суміші пропан-бутану у повітряний потік при різному тиску впорскування: 0,5 МПа, 1 МПа, 2 МПа. Отримані профілі швидкостей, температур та концентрацій газової фази впорскуваної суміші та повітря.

#### **Список використаної літератури**

1. Christensen L.S., Steely S.L. Monodisperse atomizers for agricultural aviation applications: NACA CR-159777. 1980, 82p.

2. Nasser Ashgriz, Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications. Springer Science+Business Media, LLC 2011.

3. Gorokhovski M., Herrmann M., Modeling primary atomization: Annu. Rev. Fluid Mech. pp. 343–366. 2008.

4. Luo, K., Pitsch, H., Pai, M. G., Desjardins, O.. Direct numerical simulations and analysis of three-dimensional n-heptane spray flames in a model swirl combustor: Proceedings of the Combustion Institute. 33(2). 2143–2152. 2011. doi:10.1016/j.proci.2010.06.077.

5. Li Y., Gu W., Wang D., He J. Direct numerical simulation of polydisperse aerosol particles deposition in low Reynolds number turbulent flow: Annals of Nuclear Energy. vol. 121. 223–231. 2018. doi:10.1016/j.anucene.2018.07.034

6. Fréret L., Thomine O., Direct Numerical Simulation of polydisperse evaporating sprays in 3 D jet configuration using Euler-Euler and Euler-Lagrange formalisms. vol.3. 2012.

7. Kolaitis Dionysios I., Maria A., Founti Numerical Simulation of Diesel Spray Evaporation in a “Stabilized Cool Flame” Reactor: A Comparative Study, Flow, Turbulence and Combustion. vol. 82. p.599–619. 2009. doi:10.1007/s10494-008-9171-1.

8. Simón M.-M., Fausto S., Vicente B., J. Manuel Riesco-Avila. Liquid Sprays Characteristics in Diesel Engines, Fuel Injection: IntechOpen. August 17th 2010. DOI: 10.5772/9724.

9. Semião V., Andrade P., Carvalho M. da G. Spray characterization: Numerical prediction of Sauter mean diameter and droplet size distribution. Fuel. 75(15). 1707–1714. 1996. doi:10.1016/s0016-2361(96)00163-9.

10. Dahl H.D., Muschelknautz E. Chem. Eng. Tech. 15:pp. 221-231. 1992.

11. Troesch H.A. Zerstäubung von Flüssigkeiten. Dissertation. Fortschrittsberichte VDI. Reihe 3. Nr. 607, 1999.

12. Glaser H.W., Brennst. Wärme Kraft 38. 5:193-200. 1986.

13. Gemci T., Yakut K., Chigier N., Ho T.C. Experimental study of flash atomization of binary hydrocarbon liquids. International Journal of Multiphase Flow, 30(4), 395–417. 2004. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2003.12.003.

14. Сірий О.А., Соломаха А.С., Пакош Д.З. Дослідження процесу розпилення зрідженої суміші пропан-бутану для двигунів внутрішнього згорання. Екологічні науки : науково-практичний журнал. 2020. № 2(29). Т. 1. С. 48-53.

15. Piątkowski P., Bohdal T. Testing of Ecological Properties of Spark Ignition Engine Fed with LPG Mixture Rocznik Ochrona Środowiska. T.13. pp.607-618. 2011.

A. Sirij, PhD, Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-5811-9037  
A. Solomakha, PhD, Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-1061-6277  
T. Chyrka, PhD, RF., ORCID 000-0002-8843-7025  
D. Pakosh, Master's student, ORCID 0000-0001-5811-9037

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

## FEATURES OF LIQUID GAS SPRAYING PROCESS SIMULATION FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINE

The paper presents the results of numerical modeling of the spraying process a propane-butane liquefied mixture. The aim of the work is to develop a numerical model of the thermohydrodynamic process of liquefied gas spraying and to determine the thermophysical and geometric parameters of the spray torch in order to improve the existing fuel supply scheme of the internal combustion engine (ICE). The main theoretical aspects of the liquefied gas spraying process and the main thermophysical parameters required for numerical calculations of the studied phenomenon are presented in the paper. A numerical simulation method based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes equation is used, and the model is tuned using the finite volume method. Numerical experiments were performed by injecting a liquefied propane-butane mixture into the air stream for a period of time sufficient for combustion in the internal combustion engine cylinder. The dependence of the depth of penetration of the fuel stream into the flow of oxidizing oxide, depending on the gas supply pressure, is established. Profiles of velocities, temperatures and concentrations of the injected mixture and gas phase are obtained. Theoretical estimation of the average droplet size of the sprayed liquid is carried out.

**Keywords:** depth of jet penetration, spray, atomization, liquefied gas, numerical model.

### REFERENCES

1. L.S. Christensen and S.L. Steely, Monodisperse atomizers for agricultural aviation applications, NACA CR-159777, February 1980.
2. Nasser Ashgriz. Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications. Springer Science+Business Media, LLC 2011.
3. M. Gorokhovski, M. Herrmann, Modeling primary atomization, Annu. Rev. Fluid Mech. 40 398 (2008) 343–366.
4. K. Luo, H. Pitsch, M.G. Pai, and O. Desjardins, Direct numerical simulations and analysis of three-dimensional n-heptane spray flames in a model swirl combustor. Proceedings of the Combustion Institute, 33(2), pp. 2143–2152, 2011. doi:10.1016/j.proci.2010.06.077.
5. Li, Y., Gu, W., Wang, D., & He, J. Direct numerical simulation of polydisperse aerosol particles deposition in low Reynolds number turbulent flow. Annals of Nuclear Energy, 121, 223–231. doi:10.1016/j.anucene.2018.07.034
6. L. Fréret, O. Thomine, Direct Numerical Simulation of polydisperse evaporating sprays in 3 D jet configuration using Euler-Euler and Euler-Lagrange formalisms, vol.3, 2012.
7. I. Kolaitis Dionysios and A. Maria, Founti Numerical Simulation of Diesel Spray Evaporation in a "Stabilized Cool Flame" Reactor: A Comparative Study, Flow, Turbulence and Combustion, vol. 82, p.599–619. 2009. doi:10.1007/s10494-008-9171-1.
8. Simón Martínez-Martínez, Fausto Sanchez, Vicente Bermudez and J. Manuel Riesco-Avila, Liquid Sprays Characteristics in Diesel Engines, Fuel Injection, Daniela Siano, IntechOpen, August 17th 2010. DOI: 10.5772/9724.
9. V. Semião, P. Andrade and M. da G. Carvalho, Spray characterization: Numerical prediction of Sauter mean diameter and droplet size distribution. Fuel, 75(15), 1707–1714. 1996. doi:10.1016/s0016-2361(96)00163-9.
10. H.D. Dahl and E. Muschelknautz, Measurement of the droplet size distribution of a full cone nozzle, Chem. Eng. Tech. 15:221-231, 1992.
11. H. A. Troesch, Zerstäubung von Flüssigkeiten, Dissertation, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 3, Nr. 607, 1999.
12. H. W. Glaser, Brennst. Wärme Kraft 38, 5:193-200, 1986.
13. T. Gemci, K. Yakut, N. Chigier and T.C. Ho, Experimental study of flash atomization of binary hydrocarbon liquids. International Journal of Multiphase Flow, 30(4), 395–417. 2004. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2003.12.003
14. O. Siriyi, A. Solomakha, D. Pakosh Investigation of the process of spraying a liquefied propane-butane mixture for internal combustion engines. Ecological sciences: scientific and practical journal, Vol. 2(29), pp. 48-53, 2020.
15. P. Piątkowski and T. Bohdal., Testing of Ecological Properties of Spark Ignition Engine Fed with LPG Mixture. Rocznik Ochrona Środowiska, Vol. 13, pp.607-618, 2011.

Надійшла 15.07.2020

Received 15.07.2020



**О.О. Закладний**, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2813-3692

**В.В. Прокопенко**, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-5518-5802

**Т.В. Гребенюк**, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-9287-2919

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## СИСТЕМА ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Діагностування стану електрообладнання при його виготовленні, ремонті та профілактичних перевірках є невід'ємною частиною технологічного процесу. Приладів для діагностування потребують підприємства промислово-енергетичного комплексу, залізничного й морського транспорту, гірничодобувні, збагачувальні й целюлозно-паперові комбінати, ремонтні заводи і т. ін. При серійному й масовому виробництві природним є прагнення максимально автоматизувати виробничий процес, що містить у собі також етап випробування електричних машин. Дослідження показали, що трудомісткість контрольних операцій становить до 15% трудомісткості виготовлення електродвигунів. Середні норми часу на проведення приймально-здавальних випробувань однієї електричної машини середньої потужності складають 3...35 год. Середні норми часу на обробку результатів приймально-здавальних випробувань однієї машини становлять 0,6...4 год. Природно, що така висока трудомісткість проведення випробувань і обробки їх результатів змушує шукати шляхи автоматизації випробувань. Електродвигуни, як правило, розраховані на термін служби 15...20 років без капітального ремонту, за умови правильної їх експлуатації. Під правильною експлуатацією розуміється робота відповідно до номінальних параметрів, зазначених в паспортних даних електродвигуна. Однак на практиці має місце значне відхилення від номінальних режимів експлуатації. Це, передусім, низька якість напруги живлення й порушення правил технічної експлуатації: технологічні перевантаження, умови навколишнього середовища (підвищені вологість, температура), зниження опору ізоляції, порушення охолодження. Наслідком таких відхилень є аварійні режими роботи електродвигунів. У окремих підгалузях промисловості аварійність електродвигунів коливається від 20 до 50% на рік. Вихід з ладу електродвигуна призводить до важких аварій і значних матеріальних збитків через простої обладнання, затрати на усунення наслідків аварій і ремонт електродвигуна, що вийшов з ладу. Ремонт електричної машини потужністю 1 кВт обходиться в 250-300 грн. Щоб оцінити вартість ремонту потужнішої машини, треба помножити цю цифру на потужність двигуна. Крім цього, робота на аварійних режимах призводить до підвищеного енергоспоживання та збільшення споживаної реактивної потужності.

**Ключові слова:** діагностування, електродвигун, аварійні режими, автоматизація випробувань.

**Вступ.** На сьогоднішній день існує ряд прикладів реалізації стендів для діагностики електродвигунів при їх виробничому або післяремонтному випробуванні.

Розроблена система діагностування - це програмно-апаратний комплекс, призначений для поточного моніторингу й післяремонтних випробувань, дослідження та аналізу реального стану електромеханічних систем, експериментальної оцінки стану електродвигуна й видачі рекомендацій щодо умов експлуатації діагностованої електричної машини. Система визначає параметри електричних машин без приєднання до них навантажувальних пристроїв. Випробування проводяться при зниженій напрузі.

Система визначає номінальну потужність, частоту обертання, струм, момент, а також активний та індуктивний опори обмоток, електромагнітну сталу часу, електромеханічну сталу часу, швидкість ідеального холостого ходу (синхронну) та момент інерції двигуна [1].

Алгоритм роботи системи діагностування, складається з:

- циклу випробувань, що включає послідовну роботу машини у трьох динамічних режимах – короткого замикання, холостого ходу та вільного вибігу;
- проведення контрольних вимірювань значень струму двигуна, частоти обертання та тривалості режимів короткого замикання, холостого ходу та вільного вибігу;
- обробки результатів тестування за допомогою спеціального математичного апарату й визначення параметрів випробовуваного двигуна;
- формування нового паспорта діагностованої машини.

© О.О. Закладний, В.В. Прокопенко, Т.В. Гребенюк, 2020

**Матеріал і результати досліджень.** Проведені експерименти й розрахунки показують, що при роботі в межах робочих частин механічних характеристик при зміні напруги двигун постійного струму (ДПС), або при частотному керуванні асинхронний двигун (АД) чи синхронний (СД) можна представити лінійним об'єктом. За цих умов складна система нелінійних рівнянь приводиться до лінійної передатної функції, для чого необхідно апроксимувати експериментальні криві перехідного процесу лінійними диференціальними рівняннями необхідного порядку. Отримані в результаті реальної апроксимації передатні функції електродвигуна з коефіцієнтами в числовому вигляді будуть ураховувати весь набір вихідних параметрів і залежностей системи без додаткових допущень, що призводять до істотної відмінності їх від реального об'єкта. Статичні характеристики, наприклад, ДПС при різних напругах наведені на рис. 1.

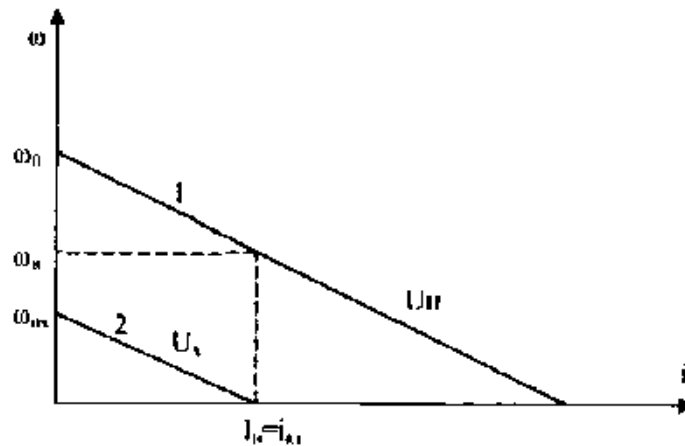


Рисунок 1 - Статичні характеристики ДПС при різних напругах.

Характеристика 1 відповідає номінальній напрузі живлення, а 2 – зниженій. При пуску ротор двигуна почне обертатися лише після того, як його момент стане більшим від статичного. Тому процес пуску складається з двох періодів – режиму короткого замикання та, власне, пуску двигуна [2].

При зазначених вище умовах, електродвигунам в межах робочих напруг притаманна практично стала жорсткість механічних характеристик. Тобто відношення напруги до частоти обертання залишається сталим. Це дозволяє для зменшення струму двигуна проводити режим короткого замикання при низькій напрузі живлення  $U_x$ . Доцільно задатися такою напругою, при якій струм короткого замикання буде чисельно дорівнювати номінальному струму  $I_{кз} = I_n$ .

Для визначення другої точки на характеристиці 2 необхідно провести пуск двигуна в режимі холостого ходу. В результаті знаходимо точку  $\omega_{0x}$ . Знаючи дві точки, можна побудувати характеристику 2 при напрузі  $U_x$ . Щоб отримати значення номінальної частоти обертання  $\omega_n$  необхідно характеристику 2 підняти вище, пропорційно збільшенню напруги від  $U_x$  до  $U_n$ . Задаючись струмом  $I_{кз} = I_n$ , по характеристиці 1 знаходять значення  $\omega_n$ .

**Режим короткого замикання.** При досліді короткого замикання на статор подається знижена напруга  $U_x$ , ротор загальмовується, а у випадку фазного ротора обмотки шунтуються накоротко на кільцях. Напруга, що подається на статор, повинна бути практично симетричною й номінальної частоти [3].

У процесі тесту одночасно вимірюють напругу, струм статора (лінійний струм  $I_{кз}$  короткого замикання), споживану потужність  $P_{кз}$  (кВт), початковий пусковий момент (для електродвигунів малої й середньої потужності), а безпосередньо після дослідів визначають опір обмотки статора між виводами, що відповідає температурі наприкінці дослідів.

Закон зміни струму носить експоненціальний характер (рис. 2)

$$I = I_{кз} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + I_{нач} e^{-\frac{t}{T}}.$$

Методика визначення параметрів двигуна за результатами режиму короткого замикання полягає в наступному:

- осцилографують процес короткого замикання  $I(t)$  при зниженій напрузі;
- визначають усталене значення струму  $I_{кз}=I_n$ ,  $\frac{U_x}{R} = I_{кз}$ ;
- електромагнітну сталу якірного (статорного) кола двигуна  $T$  визначають за умови, що при  $t=T$  струм досягне значення  $I=0,632I_{кз}$ .
- розраховують опір якірного (статорного) кола двигуна  $R = U_x / I_{кз}$  ;
- визначають індуктивність якірного (статорного) кола двигуна  $L = TR$  ;

- визначають тривалість перехідного процесу  $t_{пп}$  і перевіряють величину  $T$ ;
- виміряють опір ізоляції обмоток стосовно корпусу машини й між обмотками й опір обмоток при постійному струмі. При цьому опір обмоток відповідає сталій температурі, отриманій при випробуванні на нагрівання. Ця температура досягається автоматично в режимі короткого замикання;
- визначають коефіцієнт трансформації (для двигуна з фазним ротором) як відношення фазних напруг статора і ротора.
- випробують ізоляції обмоток на електричну міцність щодо корпусу машини й між обмотками й на електричну міцність міжвиткової ізоляції обмоток статора й фазного ротора;
- визначають втрати та коефіцієнт потужності короткого замикання  $\cos\varphi_{кз} = P_{кз}/(U_{кз} I_{кз})$ .
- початковий пусковий момент визначають розрахунково за обмірюваними втратами  $P_{кз}$  короткого замикання (чисельно рівним потужності, споживаній при дослідженні)  $M_{кз} = P_{кз2}/\omega_0$ , де  $P_{кз2} = P_{кз} - P_{кз1} - P_c$  - втрати в обмотці ротора при досліді короткого замикання;  $P_{кз1} = I_{кз}^2 R_1$  - втрати в обмотці статора при досліді короткого замикання;  $P_c$  - втрати в сталі з досліді холостого ходу [4].

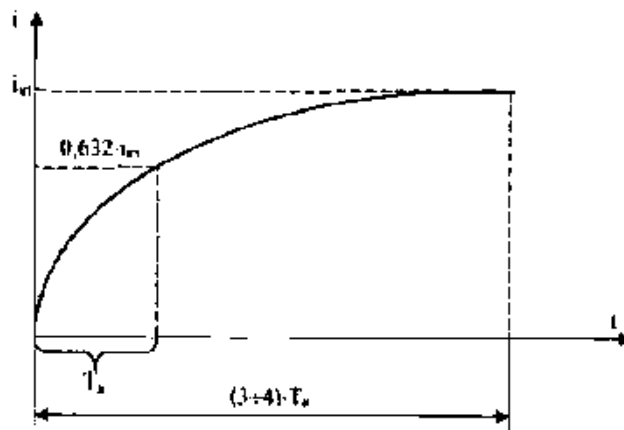


Рисунок 2 - Закон зміни струму

Для графічного зображення результатів досліді короткого замикання відкладають у функції напруги наступні величини: струм короткого замикання  $I_{кз}$ , втрати короткого замикання  $P_{кз}$ , коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_k$  й обертаючий момент при короткому замиканні  $M_{кз}$ . Оскільки дослід короткого замикання проводиться при зниженій напрузі, то при визначенні струму й обертаючого моменту, що відповідають номінальній напрузі, необхідно ввести поправку на насичення шляхів потоків розсіювання. Для цього будується залежність струму короткого замикання від напруги. Зростання струму від напруги приймають таким, що йде по дотичній і визначають точку перетину дотичної з віссю абсцис  $U_{кз0}$ . Тоді струм короткого замикання при номінальній напрузі  $I_{кзн}$  знаходять за формулою

$$I_{кзн} = (U_n - U_{кз0}) I_{кз} / (U_{кз} - U_{кз0}),$$

де  $I_{кз}, U_{кз}$  - відповідно найбільші струм і напруга, вимірювані в процесі досліді;  $U_n$  - номінальна напруга.

Обертовий момент при короткому замиканні, що відповідає номінальній напрузі, називається початковим пусковим обертаючим моментом  $M_{кзн}$

$$M_{кзн} = (I_{кзн}/I_{кз})^2 M_{кз},$$

де  $M_{кз}$  - обертаючий момент при найбільшій напрузі з досліді короткого замикання.

Початковий пусковий струм і початковий пусковий момент можна також визначити при пуску, а початковий пусковий момент, крім того, вимірюють при зніманні статичної кривої моменту. Величина початкового пускового моменту залежить від відносного положення зубців статора й ротора в момент вимірювання. Тому за величину початкового пускового моменту приймають найменше з отриманих при вимірюваннях його значень [5].

**Режим холостого ходу.** При прийнятно-здавальних випробуваннях вимірюють струм і втрати холостого ходу лише за номінального значення напруги.

Апроксимуючи криву частоти обертання двигуна диференціальним рівнянням другого порядку, знаходимо перехідну функцію у вигляді

$$\omega = \omega_0 \left( 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right),$$

де  $T_1$  і  $T_2$  - фіктивні сталі часу, причому  $T_1 > T_2$ .

Крива струму також має аперіодичний характер і при пуску з нульовим моментом опору визначається виразом

$$I = I_{\text{кз}} \frac{T_M}{T_1 - T_2} \left( e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right),$$

де  $T_M = J \frac{R}{C^2}$  - електромеханічна стала двигуна, с;  $C$  - конструктивна стала двигуна;  $J$  - момент інерції двигуна, кгм<sup>2</sup>

Тривалість перехідного процесу (рис. 3) пуску двигуна без навантаження визначається більшою сталою часу, тобто  $T_1$ .

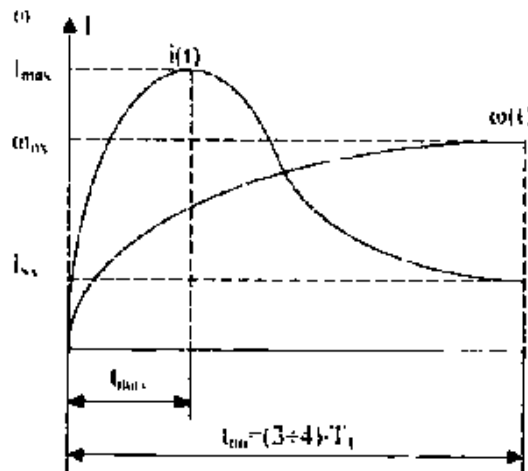


Рисунок 3 - Тривалість перехідного процесу пуску двигуна без навантаження

Методика визначення параметрів двигуна за результатами режиму холостого ходу полягає в наступному:

- осцилографують процес холостого ходу, тобто зміну струму й швидкості в часі при зниженій напрузі;
- визначають сталі значення швидкості  $\omega_{0x}$  й  $I_{xx}$  (струм холостого ходу);
- розраховують конструктивну сталу двигуна  $C = U_x / \omega_{0x}$ ;
- перераховують значення отриманих параметрів на природну характеристику. Визначають величину  $\omega_n = \frac{U_n}{C} - \frac{I_n R}{C} = \omega_0 - \frac{I_n R}{C}$ ;
- визначають тривалість перехідного процесу й знаходять величину  $T_1$ ;
- визначають втрати холостого ходу. Ці випробування роблять у режимі холостого ходу при сталому тепловому стані частин електродвигуна. Оскільки неможливо встановити сталий тепловий стан підшипників безпосереднім вимірюванням їх температури, цього досягають шляхом обертання електродвигуна без навантаження з частотою холостого ходу. При досліді холостого ходу вимірюють лінійну напругу  $U_{0л}$  між всіма фазами, частоту мережі, лінійний струм  $I_{0л}$  статора в кожній фазі й споживану потужність [6].

Коефіцієнт потужності холостого ходу обчислюється як  $\cos\varphi_0 = P_0 / (U_{0л} I_{0л})$ .

Результати досліді холостого ходу зазвичай зображують графічно - шляхом побудови залежності втрат  $P_0$ , фазного струму  $I_0$  і коефіцієнта потужності  $\cos\varphi_0$  у функції напруги.

У процесі досліді вимірюють лінійні напруги  $U_n$ , струм  $I$  та споживану з мережі потужність  $P_1$ . За результатами вимірів визначають коефіцієнт потужності та з урахуванням втрат - коефіцієнт корисної дії ККД.

- визначають максимальний обертаючий момент. Максимальний обертаючий момент - один з основних показників АД. Кратність максимального обертаючого моменту й перевищення температури електродвигуна обмежують можливості підвищення потужності двигуна в даному габариті.

Оскільки безпосередній вимір обертаючого моменту потребує зміну навантаження електродвигуна, то максимальний обертаючий момент знайдемо способом визначення кривої обертаючого моменту при пуску за результатами дослідів холостого ходу й короткого замикання.

Цей спосіб використовується зазвичай для знаходження максимального моменту електродвигунів великої потужності, коли здійснити навантаження випробуваного двигуна за допомогою навантажувальної машини не можливо. Для визначення кривої обертаючого моменту випробуваний двигун пускають

вхолосту, а процес пуску записується за допомогою ЕОМ. Основні труднощі проведення цього дослідження - короткочасність періоду пуску. Для подовження часу пуску необхідно збільшити момент інерції випробуваного двигуна, з'єднуючи його з іншою електричною машиною, ротор якої служить додатковою маховою масою, або з важким маховиком. В запропонованій методиці застосовується зниження напруги, що підводиться до випробуваного двигуна [7].

Зазвичай фіксується кутове прискорення, пропорційне обертаючому моменту. При цьому виникають наступні труднощі. Прискорення в процесі пуску змінюється внаслідок залежності пускового струму у функції ковзання, тому отримані значення обертаючого моменту перелічуються на номінальну напругу пропорційна квадрату напруги.

Крім того, на початкову частину процесу пуску спотворюваний вплив роблять перехідні процеси при включенні, а на машини з підшипниками ковзання - ще й високе значення їхнього початкового моменту тертя. Для усунення впливів, що спотворюють, застосовується попереднє обертання випробувального двигуна в протилежному напрямку. Змінюючи чергування фаз, двигун реверсує і записують криву обертаючих моментів. Масштаб моменту визначається за значенням початкового пускового моменту, одержаного з дослідження короткого замикання. При реверсуванні початковий пусковий момент відповідає частоті обертання, що дорівнює нулю [8].

При визначенні максимального обертаючого моменту знаходять відповідному цьому моменту ковзання з застосуванням тахометра.

- визначають мінімальний обертаючий момент. Точне визначення величини мінімального обертаючого моменту АД має важливе значення, тому що зниження його нижче припустимого з стандарту може привести до "застрявання" електродвигуна на малій частоті обертання при пуску під навантаженням. Такий режим роботи близький до режиму короткого замикання і є аварійним.

Мінімальний обертаючий момент визначається із кривої обертаючого моменту, знятої у процесі пуску.

**Режим вільного вибігу** полягає у відімкненні двигуна від мережі. Електромагнітний момент двигуна в цьому випадку дорівнює нулю, і гальмуватися він буде під дією сил тертя (рис. 4).

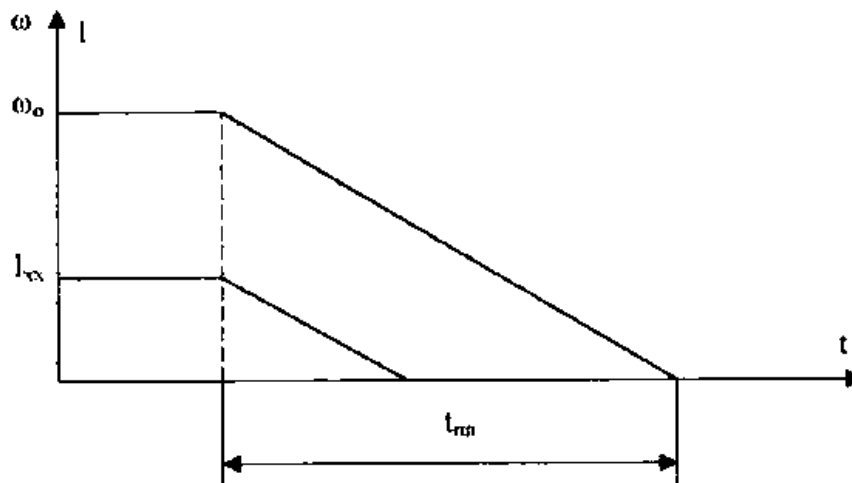


Рисунок 4 - Електромагнітний момент двигуна у режимі вільного вибігу

Методика визначення параметрів двигуна за результатами режиму вільного вибігу полягає в наступному:

- осцилографують процес вільного вибігу  $\omega(t)$  при зниженій напрузі;
- визначають тривалість перехідного процесу;
- розраховують момент інерції  $J$ , електромеханічну сталу двигуна  $T_m$ , сталі  $T_1$  і  $T_2$ , максимальне значення струму  $I_{max}$  і час  $t_{max}$ .

Момент інерції двигуна можна визначити з рівняння руху

$$J = M \frac{t_{тп}}{\omega_0} = \frac{U_x I_{хх} t_{тп}}{\omega_0^2},$$

де  $M$  – електромагнітний момент двигуна в початковий момент гальмування.

Знаючи момент інерції, знаходять електромеханічну сталу двигуна  $T_m$

Зв'язок між сталими часу визначається з виразів

$$T_m = T_1 + T_2; T_m T_{я} = T_1 T_2.$$

Знаючи  $T_1$  і  $T_2$ , можна знайти максимальне значення струму

$$I_{\max} = I_{\text{кз}} \frac{T_{\text{м}}}{T_2} \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{-\frac{T_1}{T_1 - T_2}},$$

і час, при якому струм досягає максимального значення

$$t_{\max} = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2}.$$

Після виконання усіх трьох режимів встановлюється наступний двигун. Одночасно контролер передає масив записаних даних в ЕОМ, яка їх обробляє та виводить на дисплей чи пристрій друку. Якщо отримані параметри двигуна, що випробовується, не виходять за допустимі межі, то це означає, що двигун пройшов прийнятно-здавальні випробування.

Номинальними показниками АД, значення яких установлені в паспортних даних або технічних умовах, є: ККД  $\eta$ , коефіцієнт потужності  $\cos\phi_0$ , максимальний момент  $M_{\text{м}}$ , а для двигунів з короткозамкненим ротором, крім того, початковий пусковий момент  $M_{\text{п}}$  і початковий пусковий струм  $i_{\text{п}}$ .

Області на параметри електродвигунів ( $i_0, i_{\text{к}}, P_0$  і  $P_{\text{к}}$ ), розраховані за номінальними даними з урахуванням допусків, дозволяють здійснити контроль номінальних параметри електродвигунів за результатами прийнятно-здавальних випробувань.

З цією метою за результатами діагностування необхідно нанести в координатах  $i_0$ - $i_{\text{к}}$ ;  $p_0$ - $p_{\text{к}}$ ;  $i_{\text{к}}$ - $p_{\text{к}}$  точки відповідні отриманим значенням параметрів прийнятно-здавальних випробувань. Розташування точок усередині всіх припустимих областей свідчить про відповідність номінальних даних випробуваного двигуна вимогам технічних умов з урахуванням допусків згідно з Держстандартом. Якщо хоч одна точка виходить за межі однієї із областей, це свідчить про те, що принаймні по одному номінальному параметру електродвигун не задовольняє необхідним вимогам.

За положеннями точок у областях (у тому випадку, якщо вони виявилися усередині областей) можна також одержати уявлення про величину номінальних даних випробуваного двигуна.

Для контролю, діагностування й аналізу зміни номінальних параметрів АД пропонується використати автоматизовану випробувально-діагностувальну систему із застосуванням ЕОМ, схема якої показана на рис.5.

Алгоритм контролю номінальних показників АД з короткозамкненим ротором на даній схемі представлений за значеннями струмів і втрат холостого ходу й короткого замикання ( $i_0, p_0, i_{\text{к}}, p_{\text{к}}$ ).

Методика діагностування причин відхилень струмів і втрат холостого ходу й короткого замикання в процесі виробництва АД зводиться до визначення напрямків зсувів точок у припустимих зонах.

Цифрове вимірювання струмів і втрат холостого ходу й короткого замикання здійснюється за наведеною методикою. Відповідні канали перетворення вимірювальної системи побудовані на аналогових інтегруючих перетворювачах змінного струму й потужності трифазного кола з уніфікованими вихідними сигналами постійного струму (0...5 мА).

Дана система має 7 основних етапів випробувань АД. На першому етапі випробувань контролюється обрив фаз, а на другому - опори ізоляції обмоток щодо корпусу двигуна й між обмотками. На третьому і четвертому здійснюються випробування міжвиткової ізоляції обмоток на електричну міцність. На п'ятому електродвигуни випробовуються у режимах холостого ходу й короткого замикання. Шостий етап призначено для випробувань ізоляції обмоток щодо корпусу й між обмотками на електричну міцність, а сьомий - для вібраційних тестувань.

Під час випробувань на етапах 1-4, 6 і 7 блок порівняння видає негативний результат, якщо на відповідному етапі електродвигун не витримує випробування, якщо витримує - позитивний.

При випробуваннях АД на 5-му етапі в режимах холостого ходу й короткого замикання вимірюються струми й втрати.

Діагностування й відбраковування АД здійснюються шляхом обробки результатів вимірювань параметрів холостого ходу й короткого замикання випробуваних двигунів по алгоритму наведеному на рис.7.3.

Далі обробкою результатів вимірювань параметрів холостого ходу й короткого замикання придатних АД здійснюють їхній статичний аналіз.

Для кожного придатного АД оформляють протокол випробувань з реквізитами двигуна.

Удосконалювання алгоритму функціонування в програмі ЕОМ спрямовано на забезпечення цифрового програмного керування роботою вимірювального комплексу й на використання додаткових процедур контрольно-вимірювальної, досліджувальної й діагностичної роботи для підвищення достовірності контролю параметрів і діагностування АД.

Пристрій визначає номінальні параметри двигуна:

- номінальну потужність;
- номінальну частоту обертання;

- номінальний струм;
- номінальний момент;
- внутрішні параметри:
- активний та індуктивний опори якоря;
- електромагнітну сталу часу;
- сталу двигуна;
- електромагнітну сталу часу;
- швидкість ідеального холостого ходу двигуна;
- момент інерції двигуна.

Тестування механічних і робочих характеристик проводять у процесі розгону електродвигуна. При цьому опір обмоток відповідає сталій температурі, отриманій при випробуванні на нагрівання. Ця температура досягається автоматично в режимі короткого замикання.

Експеримент, проведений з кількома двигунами ДК90-250-12М показав, що:

- для режиму короткого замикання  $i_{кз}=I_n=2,2$  А;  $t_{пп}=0,03$ с;  $T_я=7,52 \cdot 10^{-3}$ с;  $R_я=24$  Ом;  $L_я=0,181$ Гн;
- для режиму холостого ходу  $I_{хх}=0,5$ А;  $\omega_{0х}=345,6$  с<sup>-1</sup>;  $t_{пп}=1,6$ с;  $T_1=0,89$ с;  $C_d=0,153$ ;  $\omega_n=1091,52$ с<sup>-1</sup>;
- для режиму вільного вибігу  $t_{пп}=1$ с;  $J=8,78 \cdot 10^{-4}$  кгм<sup>2</sup>;  $T_m=0,9$ с;  $T_1=0,892$ с;  $T_2=7,587 \cdot 10^{-3}$  с;

$I_{max}=1,0$  А;  $t_{max}=0,566$ с.

Електронно-обчислювальна машина (ЕОМ) відповідно до записаної програми здійснює керування процесом досліджень, переводить випробуваний електродвигун у різні досліджувані режими, комує вимірювачі, приймає інформацію від вимірювачів електричних і неелектричних величин, здійснює необхідні обчислення й видає оброблену інформацію на друк. Вимірювач електричних величин посилає через відповідні блоки ЕОМ миттєві значення вимірюваних величин через однакові проміжки часу з великою частотою. В ЕОМ ці дані обробляються й видаються на друкувальний пристрій або графобудівник. Для побудови кривих використовуються діючі значення обмірюваних електричних величин.

Процес автоматизації випробувань проводиться у два етапи. Мета першого етапу - підвищення точності визначення характеристик електродвигунів і скорочення малопродуктивної праці. На цьому етапі проводять випробування електродвигунів на нагрівання й визначають опору обмоток при постійному струмі й у холодному стані, характеристики холостого ходу, робочі, короткого замикання й механічну, а також імовірність безвідмовної роботи.

На другому етапі операції зняття показань приладів замінені обробкою інформації на міні-ЕОМ.

Блок вимірюваних величин містить набір однотипних блоків первинної реєстрації даних – давачів напруги (ДН) і струму (ДС), аналого-цифровий перетворювач (АЦП) та загальну шину даних. Масштабування сигналів виконується датчиками вимірюваних величин і вхідними подільниками, на виході яких включені фільтри, а далі - АЦП з гальванічною розв'язкою. На виході АЦП формується 11- розрядний код вимірюваної величини зі старшим знаковим розрядом. За допомогою буферного регістру 11 - розрядний код поступає на спільну шину даних.

Обчислювальний комплекс проводить необхідні обчислення згідно заданого алгоритму випробувань. Для збільшення швидкодії процесу вимірювання використано принцип прямого доступу до пам'яті, який реалізовано за допомогою спеціального контролера, який забезпечує синхронізацію пристроїв первинного збору інформації і ОЗУ. Після занесення в контролер початкових умов (адреси областей ОЗУ, числа вимірювань) він може працювати в автономному режимі, приймаючи на себе управління шиною адреси і даних.

Після закінчення процесу вимірювання система управління повертається у вихідний стан, що дозволяє обчислювальному комплексу перейти до обчислення за підпрограмами попередньої обробки даних та передати масив даних до периферійних пристроїв. Мініміально можливий час вимірювання визначається продуктивністю обчислювального комплексу, часом звернення до пам'яті і часом перетворення АЦП.

Випробування електродвигунів в статичному і динамічному режимах виконуються за допомогою послідовного, через рівні проміжки часу, занесення в оперативну пам'ять обчислювального комплексу контрольованих параметрів ( $\omega$ ,  $I$ ,  $U$ ) з подальшою обробкою результатів вимірювань. При цьому обчислювальний комплекс отримує необхідну інформацію від системи вимірювальних датчиків та виробляє управляючі впливи для наступного кроку вимірювання. В пам'ять автоматизованої системи вводиться програма реалізації алгоритму вимірювання і програма обробки результатів. Результатом циклу вимірювання буде масив даних, з яких після відповідної обробки можна виділити значення струмів, напруги і частоти обертання двигуна.

**Висновки.** Стенд є універсальним, оскільки дозволяє проводити випробування електродвигунів змінного струму (асинхронних і синхронних) та двигунів постійного струму. Система діагностування визначає параметри електричних машин без сполучення їх з навантажувальними пристроями та проводить випробування при зниженій напрузі живлення. Для цього цикл випробувань складається з послідовної роботи машини у трьох динамічних режимах – короткого замикання, холостого ходу та вільного вибігу.

Розроблена система діагностування електричних машин дозволяє одержати достовірні результати випробувань, прискорити проведення контрольних вимірювань і підвищити продуктивність праці. ЕОМ використовується не лише для обробки результатів випробувань, але й при керуванні процесом випробувань, статистичному контролю й аналізі результатів випробувань (не лише при вибіркового, але й при суцільному контролі).

#### **Список використаної літератури**

1. Ермолаев С.А. Эксплуатация энергооборудования в сельском хозяйстве / С.А. Ермолаев, Е.П. Масюткин, В.Ф. Яковлев. – Киев: Фирма “Инкос”, 2005. – 670 с.
2. И. Я. Браславский. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З.И. Ишматов, В.Н. Поляков. – Москва, Асадема 2004, 256 с.
3. Закладний О.М. Електропривод: навч. посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 316 с
4. П.В. Тютёва Оценка стоимости асинхронных двигателей при изменении геометрии поперечного сечения / П.В. Тютёва, О.О. Муравлева // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316. № 4, с.183-186
5. Д.И. Родькин. Системы динамического нагружения и двагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях / Д.И. Родькин – М.: недра, 1992. – 236 с.
6. Закладний О.О. Методика функціонального діагностування енергоефективності асинхронного електропривода. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2013. №1, с. 79-84.
7. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
8. Котеленец Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учебник для вузов / Н.Ф. Котеленец, Н.А. Акимова, М.В. Антонов. – М.: Издательский центр “Академия”, 2003. – 384 с.

**O. Zakladnyi**, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-2813-3692  
**V. Prokopenko** Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-5518-5802  
**T. Hrebenuk**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.; **ORCID** 0000-0002-9287-2919  
**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

#### **TECHNICAL DIAGNOSTIC SYSTEM FOR ELECTRIC MOTOR TESTS**

*Diagnosing the condition of electrical equipment during its manufacture, repair and preventive inspections is an integral part of the technological process. Devices for diagnostics are required by enterprises of the industrial and energy complex, railway and sea transport, mining, concentrating and pulp and paper mills, repair plants, etc.*

*In serial and mass production, the desire to automate the production process as much as possible is natural, which also includes the stage of testing electric machines. Studies have shown that the complexity of control operations is up to 15% of the complexity of the manufacture of electric motors. The average time norms for conducting acceptance tests of one electric machine of average power make 3 ... 35 hours. The average time for processing the results of acceptance tests of one machine is 0.6 ... 4 hours. Naturally, such a high complexity of testing and processing their results makes us look for ways to automate testing.*

*Electric motors are usually designed for a service life of 15... 20 years without major repairs, provided they are properly operated. Proper operation means operation in accordance with the nominal parameters specified in the passport data of the motor. However, in practice there is a significant deviation from the nominal modes of operation. These are, first of all, low quality of supply voltage and violation of rules of technical operation: technological overloads, environmental conditions (the raised humidity, temperature), decrease in resistance of isolation, cooling disturbance.*

*The consequence of such deviations are emergency modes of operation of electric motors. In some subsectors of industry, the accident rate of electric motors ranges from 20 to 50% per year. Failure of the electric motor leads to severe accidents and significant material damage due to downtime, the cost of repairing the consequences of accidents and repair of the failed electric motor. Repair of an electric car with a capacity of 1 kW costs 250-300 UAH. To estimate the cost of repairing a more powerful machine, you need to multiply this figure by the engine power. In addition, operation in emergency modes leads to increased power consumption and increased reactive power consumption.*

**Keywords:** *diagnostics, electric motor, emergency modes, test automation.*



**REFERENCES**

1. Ermolaev S.A. Operation of power in agriculture / S.A. Ermolaev, E.P. Masyutkyn, V.F. Yakovlev. – Kiev: Fyrma “Ynkos”, 2005. – 670 p.
2. Y. Ya. Braslavskyy. Energy-saving asynchronous electric drive/ Y. Ya. Braslavskyy, Z.Y. Yshmatov, V.N. Polyakov. – Moskva, Academia 2004, 256 p.
3. Zakladnyi O.M. Electric drive: teach. guidance / O.M. Zakladnyi, V.V. Prokopenko, O.O. Zakladnyi. –K.: NTUU «KPI», 2007. – 316 p.
4. P.V. Tyuteva. Valuation of asynchronous motors when changing the cross-sectional geometry / P.V. Tyuteva, O.O. Muravleva // Yzvestyya Tomskoho polytekhnicheskoho unyversyteta. 2010. V. 316. # 4, p.183-186
5. D.Y. Rod'kyn. Systems of dynamic loading and diagnostics of electric motors with post-repair tests / D.Y. Rod'kyn – M.: Nedra, 1992. – 236 p.
6. Zakladnyi O.O. Methods of functional diagnostics asynchronous electric energy. Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya. 2013. #1, p. 79-84.
7. Syromyatnykov Y.A. Modes of operation of asynchronous and synchronous motors / Y.A. Syromyatnykov; edited by L.H. Mamykonyantsa. – 4th ed. revised and enlarged. – M.: Energoatomisdat, 1984. – 240 p.
8. N.F. Kotelenets, N.A. Akimova, and M.V. Antonov, Tests, operation and repair of electric machines: Textbook for high schools, Moscow, Russia: Publishing Center "Academy", 2003.

Надійшла 17.07.2020

Received 17.07.2020

В.В. Михайленко, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-0973-4612

В.А. Святненко, старший викладач

Ю.М. Чуняк, асистент, ORCID 0000-0002-4506-912X

В.І. Бачинський, студент

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА З П'ЯТНАДЦЯТИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ І АКТИВНО-ІНДУКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Метою роботи є використання методу багатопараметричних функцій з використанням пакету MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами.

У цій статті проведено аналіз електромагнітних процесів в електричних колах напівпровідниковими комутаторами. Створено математичну модель для аналізу електромагнітних процесів в напівпровідникових перетворювачах з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги. Наведено графіки, що відображають електромагнітні процеси у електричних колах. Стаття присвячена розвитку методу багатопараметричних функцій шляхом розробки нових математичних моделей та визначення функцій і алгоритмічних рівнянь для аналізу за підсистемними складовими електромагнітних процесів у розгодуваних електричних колах з напівпровідниковими комутаторами і ланками з синусоїдальними, постійними і імпульсними напругами. Напівпровідникові комутатори можуть виконувати високочастотне змінення структури електричних кіл і широтно-імпульсну модуляцію фазних і лінійних напруг трифазної мережі електроживлення, виконуючи регулювання вихідних напруг напівпровідникових перетворювачів параметрів електричної енергії.

**Ключові слова:** електромагнітні процеси, вихідні напруга та струм, багатопараметричні модулюючі функції, напівпровідникові комутатори, моделювання.

Аналіз використання електричної енергії, а також розвиток напівпровідникової техніки дозволяють використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою переключення вентилів значно більшої від частоти змінної напруги промислової мережі. Розвиток техніки дозволяє використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою переключення вентилів значно більшої від частоти змінної напруги промислової мережі. В тих випадках, коли за вимогами навантаження необхідно забезпечити його гальванічну розв'язку з енергетичною мережею при багатозонному регулюванні вихідної напруги, в якості проміжних структур доцільно використовувати структури перетворювачів частоти з однократною модуляцією (ПЧ з ОМ). У [1-3] показана доцільність використання структур ПЧ з ОМ в діагностичних комплексах електромеханічних систем для побудови вторинних джерел живлення з різним видом вихідної енергії. У даній роботі проводиться аналіз використання тієї ж структури в якості ланки високої частоти перетворювачів трифазної напруги в постійну напругу при підключенні силових модуляторів (СМ) до фазних проводів енергетичної мережі і широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) постійної напруги при восьмизонному керуванні. Таке з'єднання дозволяє покращити форму вхідних струмів перетворювача за рахунок відсутності в них гармонік, які кратні трьом.

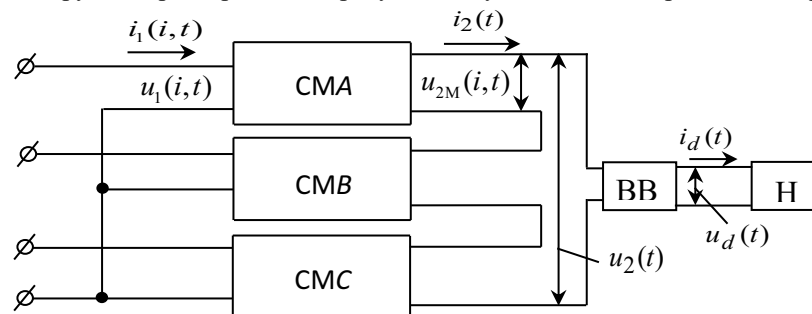


Рис. 1. Структурна схема перетворювача

Структурна схема перетворювача показана на рис. 1. На структурній схемі позначені:  $СМ_A$ ,  $СМ_B$ ,  $СМ_C$  – силові модулятори відповідних фазних напруг, сукупність яких представляє собою ланку високої частоти перетворювача,  $ВВ$  – високочастотний випрямляч,  $Н$  – навантаження. Кожний з  $СМ$  складається з  $N$  інверторів випрямленої напруги (ІВН), які включені енергетичними входами паралельно і навантажені на узгоджувальні трансформатори (ТВ), з'єднані вторинними обмотками послідовно.

При складанні математичної моделі перетворювача з комп'ютерною орієнтацією її застосування використовуємо метод багатопараметричних модулюючих функцій [2], який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача. При цьому приймемо такі припущення: вхідна енергетична мережа симетрична і її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди ІВН представляються ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори в кожній з зон регулювання вихідної не мають втрат, а навантаження перетворювача має еквівалентний активно-індуктивний характер.

Така структура дозволяє реалізувати багатоканальний спосіб перетворення параметрів електромагнітної енергії мережі, при якому в  $СМ$  здійснюється розгалужена модуляція миттєвих значень фазних напруг трифазної енергетичної мережі, частоти  $\omega_1$ , відповідними еквівалентними модулюючими впливами  $\psi(\alpha_p, t)$ , частоти  $\omega_2$ . В результаті такої операції на виході кожного з ІВН формується промодульована напруга

$$u_{2M}(p, i, t) = \frac{1}{k_T} u_1(i, t) \phi(i, t) \psi(\alpha_p, t), \quad (1)$$

де:  $i = 1, 2, 3$  – номери фазних напруг енергетичної мережі, відповідно  $A, B, C$ ;  $k_T$  – коефіцієнти трансформації узгоджувального трансформатора;  $p = 1, 2, 3, \dots, n$  – номер зони регулювання вихідної напруги, збігається з номером інвертора  $СМ$ ;  $\phi(i, t)$  – функції прямокутних синусів, які співпадають за положенням в часовій області з відповідними фазних напругами мережі:

$$\phi(i, t) = \text{sign} \left\{ \sin \left( \omega_1 t - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right) \right\}; \quad (2)$$

де:  $u_1(i, t)$  – миттєві значення фазних напруг енергетичної мережі:

$$u_1(i, t) = U_{1m} \sin \left( \omega_1 t - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right); \quad (3)$$

$U_{1m}$  – амплітудне значення фазної напруги.

Еквівалентні модулюючі впливи подамо виразом

$$\psi(\alpha_p, t) = \frac{1}{2} \sum_2 \text{sign}(\sin(\omega_2 t \pm \alpha_p(t) - \varphi)), \quad (4)$$

де  $\alpha_p(t)$  – кути управління, за рахунок зміни яких забезпечується ШПР вихідної напруги перетворювача;  $\varphi$  – початкова фаза еквівалентних модулюючих впливів.

При багатозонному регулюванні вихідної напруги перетворювача забезпечується почергово зміна кутів управління в діапазоні від  $0$  до  $90^\circ$ . Умови зміни кутів управління у окремих зонах подамо у вигляді:

$\alpha_p(t) = 0$ , якщо  $t < \frac{(p-1)T}{N=20}$ ;  $\alpha_p(t) = 180^\circ$ , якщо  $t > \frac{pT}{N=20}$ , а інакше  $\alpha_p(t) = f_\mu(p, 20, t)$ , де

$f_\mu(p, 20, t)$  – функція, яка задає закон зміни  $\alpha_p(t)$ , яка залежить від номера зони  $p$  і їх кількості

Вихідну напругу  $u_2(t)$  ланки високої частоти перетворювача, згідно з його структурною організацією і з виразом (1), запишемо сумою

$$u_2(t) = \sum_{p=1}^{N=8} \sum_{i=1}^3 \frac{1}{k_\delta} u_1(i, t) \phi(i, t) \psi(\alpha_p, t), \quad (5)$$

а вихідну напругу перетворювача  $u_d(t)$  як випрямлену напругу (6) подамо виразом

$$u_d(t) = \sum_{p=1}^{N=8} \sum_{i=1}^3 \frac{1}{k_{\delta}} u_1(i,t) \phi(i,t) \psi(\alpha_p, t) v(t), \quad (6)$$

де:  $v(t)$  – функція прямокутного синуса, що співпадає за часом з положенням вихідної напруги  $u_2(t)$  ланки високої частоти перетворювача

$$v(t) = \text{sign}(u_2(t)). \quad (7)$$

Часові діаграми вихідних напруг ІВН  $u_{2M}(p, i, t)$ , ланки високої частоти  $u_2(t)$  і перетворювача  $u_d(t)$ , побудовані за (5) і (6) при зміні величини кута управління  $\alpha_p$  по лінійному закону в координатах від часу  $t$ , подані на рис. 3.

Для більш детального аналізу вихідної напруги перетворювача в (5) позначимо  $u_1(i,t) \phi(i,t) = |u_1(i,t)|$  і, враховуючи (3) та (4), а також те, що в (6)  $\psi(\alpha_p, t) v(t) = |\psi(\alpha_p, t)|$ , алгоритмічне рівняння перепишемо у вигляді

$$u_d(t) = \frac{1}{2k_T} \sum_{p=1}^{N=15} \left( \sum_{i=1}^3 U_{1m} \sin(\omega_1 t - \frac{(i-1)2\pi}{3}) \left| \sum_2 \sin n(\omega_2 t \pm \alpha_p(t) - \varphi) \right| \right). \quad (8)$$

Струм навантаження знайдемо, як реакцію одноконтурного  $RL$ -ланцюга на дію напруги (6). Для цього диференціальне рівняння, складене для вихідного контуру перетворювача, представимо в виді

$$D(t, y) = \frac{u_d(t)}{L} - \frac{R}{L} y_0, \quad (9)$$

де:  $y_0$  – визначається з початкових умов;  $R$  і  $L$  – відповідно активний опір і індуктивність навантаження.

Рішення (9) відносно струму навантаження визначимо числовим методом у вигляді матриці

$$i_d(t) = \text{rkfixed}(y, 0, k, s, D), \quad (10)$$

де:  $y$  – вектор початкових умов;  $0, k$  – часовий інтервал рішень;  $s$  – кількість точок на часовому інтервалі рішень;  $D$  – вектор функція диференціальних рівнянь.

Часові діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача і вихідного струму ланки високої частоти для восьмизонного регулювання представлені на рис. 2.

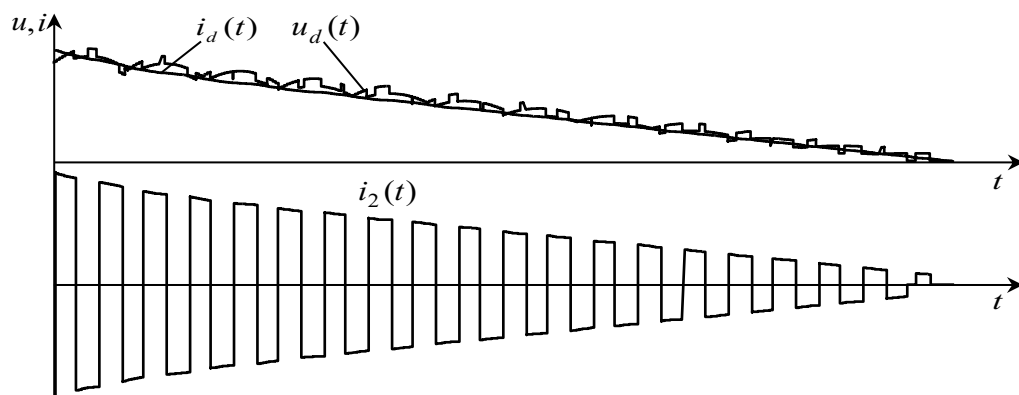


Рис. 2. Часові діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача і вихідного струму ланки високої частоти

Враховуючи ту обставину, що на інтервалах нульових пауз (7) струм навантаження підтримується в контурі навантаження і діодів ВВ за рахунок енергії, яка запасається в індуктивності за попередні цикли роботи перетворювача і з енергетичної мережі не споживається, то для визначення вихідного струму  $i_2(t)$  ланки високої частоти достатньо (10) перемножити на функцію (7), що має одиничну амплітуду і співпадає за часом з (6). Тоді

$$i_2(t) = i_d(t)v(t) \quad (11)$$

Для визначення вхідних струмів інверторів кожної  $p$ -ї зони регулювання врахуємо, що  $i_2(t)$  протікає в загальному контурі всіх СМ, утвореному послідовно з'єднаними вторинними обмотками узгоджувальних трансформаторів і приймемо до уваги алгоритмічне рівняння (6) і те, що (2), (4) і (7) є функціями одиничної амплітуди.

При цьому у загальному виді

$$i_1(n, i, t) = \frac{i_2(t)\psi(\alpha_p, t)\phi(i, t)}{k_T} \quad (12)$$

Для визначення вхідних СМ у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги підсумуємо вхідні струми відповідних ІВН. Враховуючи (12), загальний вираз для вхідних струмів СМ подамо у вигляді

$$i_1(i, t) = \sum_{p=1}^{N=15} i_1(p, i, t), \quad (13)$$

де:  $i_1(p, i, t)$  – вхідні струми ІВН.

Часові діаграми вхідних струмів  $i$ -х фаз енергетичної мережі в координатах фазних напруг, побудовані за (13), представлені на рис. 3.

Таким чином, приведені результати досліджень показують ефективність подання математичної моделі перетворювача відносно напруги навантаження, струму навантаження і струмів, що споживаються з вхідної мережі узагальнюючими функціями багатопараметричного виду. Узагальнюючі функції багатопараметричного виду ефективні і для інших перетворювачів модуляційного типу.

Дослідження показують ефективність використання багатопараметричних модулюючих функцій для моделювання і розрахунку електромагнітних процесів у розгалужених електричних колах напівпровідникових перетворювачів з багатозонним високочастотним широтноюімпульсним регулюванням їхньої вихідної напруги при живленні RL-навантаження.

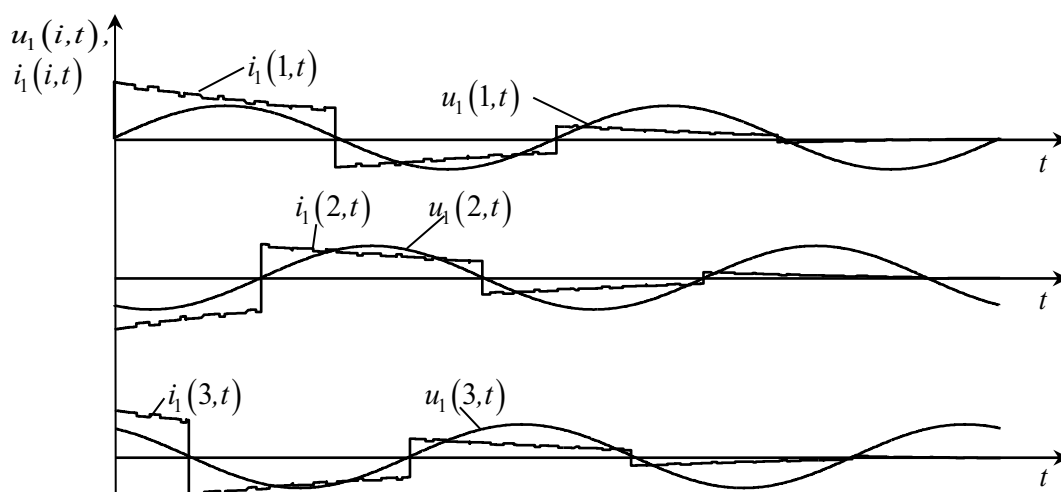


Рис. 3. Часові діаграми вхідних струмів та напруг  $i$ -х фаз енергетичної мережі

### Висновки

В результаті досліджень можна зробити висновок, що доцільно використовувати програмний пакет MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів та оптимізації параметрів напівпровідникових перетворювачів. Такий підхід дозволяє зменшити нестабільність режимів у технологічному навантаженні та режимів споживання електроенергії від мережі електроживлення.

### Список використаної літератури

1. Mykhailenko V, Mikhnenko, G., Charnyak O., “Study of the electromagnetic processes in converter with three zoned regulations of the voltage”, *Адаптивні системи автоматичного управління*, Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, №2, 2019, С. 48-53, doi: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.35.2019.197430>.
2. Розіскулов С. С., Михайленко В. В., Перетятко Ю. В., “Регулювання тривалості перехідних процесів у напівпровідникових формувачах біполярних розрядних імпульсних струмів”, *Технічна електродинаміка*, Київ: ІЕД НАНУ, № 4, 2016, С. 41 – 43, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.041>.
3. Сенько В. І., Михайленко В. В., Юрченко М. М., Юрченко О. М., Чуняк Ю. М., “Аналіз електромагнітних процесів у колах з напівпровідниковими перетворювачами з сімнадцятизонним регулюванням вихідної напруги”, *Технічна електродинаміка*, Київ: ІЕД НАНУ, № 5, 2016, С. 23 – 25, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.023>.

V. Mihaylenko, PhD in Technical Sciences, assistant professor, ORCID 0000-0002-0973-4612

V. Sviatnenko, senior teacher

J. Chunyak, assistant teacher, ORCID 0000-0002-4506-912X

V. Bachinskiy, student

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## STUDY OF CONVERTER WITH FIFTEEN ZONE REGULATION VOLTAGE AND ACTIVE-INDUCTIVE LOADS

Analysis of the electromagnetic processes is organized beside this article in electric circuit with semiconductor commutator. Mathematical model is created for analysis electro-magnetic processes in semiconductor converter with width pulsed regulation of the output voltage. The brought graphs, which reflect the electromagnetic processes in electric circuit. Method much parametric functions was used when performing calculation. The mathematical model of the converter is created for fifteen zoned regulations of the output voltage. Article is devoted to the development of a method of multi-parametric modulating functions by means of working out of new mathematical models and definition of functions and the algorithmic equations for the analysis on subsystem components of electromagnetic processes in electric circuits of variable structure with sinusoidal, direct and pulsing voltage. Introduction of functions with discrete parameters in the algorithmic equations for analysis of processes in circuits with semiconductor commutators simplifies modeling on subsystem components. The mathematical model of steady-state processes and transients in electric circuits of semiconductor converters of modulation type with multi-channel zonal use of phase and line voltages of a three-phase network of power supplies is developed. The mathematical model of electric circuits of thyristor shapers of electro-discharge pulses for the analysis and the matching of capacitors charging modes with decrease several times of electric resistance of technological load is also created. The obtained results have a great value for development theoretical electrical engineering in a direction of simplification of calculations of electromagnetic processes in electric circuits with semi-conductor converters of the electric power. The Electromagnetic processes in electric circuit under width-pulse regulation possible to analyse with use the algorithmic equations multivariable function, which argument are a system parameters semiconductor commutator, signal of control, phases to network of the power supply and time. Introduction multivariable function with discrete parameter in algorithmic equations of the analysis formed and connecting processes in electric circuit of the variable structure allows to reflect change of this structure under system components, simplifying modeling and analysis of such processes to account of the generalization of the got equations. Except specified correlations and diagrams designed model allows to analyse forms of the output voltages and current of the separate power modules.

**Keywords:** electromagnetic processes, output voltage and current, multi parametric modulating functions, semi-conductor commutators, modeling.

### REFERENCES

1. Mykhailenko V, Mikhnenko, G., Charnyak O., “Study of the electromagnetic processes in converter with three zoned regulations of the voltage”, *Adaptive automatic control systems*, Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, №2, 2019, P. 48-53, doi: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.35.2019.197430> (Eng.).

2. Roziskulov S. S., Mykhailenko V. V., Peretyatko Y. V., “Regulation of transient duration in semiconductor shapers of bipolar discharge pulse currents, Technical electrodynamics, Kyiv: IED NASU, № 4, 2016, P. 41 – 43, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.041> (Ukr.).

3. Senko V. I., Mykhailenko V. V., Yurchenko N. N., Yurchenko O. N., Chunya J. M., “ Analysis of electromagnetic processes in circuits with semiconductor converters with seventeen-zone output voltage regulation”, Technical electrodynamics, Kyiv: IED NASU, № 5, 2016, P. 23 – 25, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.023> (Ukr.).

**В.В. Михайленко**, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-0973-4612

**В.А. Святненко**, старший преподаватель

**Ю.М. Чунык**, ассистент, ORCID 0000-0002-4506-912X

**В.И. Бачинский**, студент

**Национальный технический университет Украины**

**”Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПЯТНАДЦАТИЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ И АКТИВНО-ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ**

В этой статье проведено анализ электромагнитных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами. Создано математическую модель для анализа электромагнитных процессов в полупроводниковых преобразователях с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения. Приведено графики, которые отражают электромагнитные процессы в электрических цепях. При выполнении расчетов использовался метод многопараметрических функций. Математическая модель преобразователя создана для пятнадцатизонного регулирования выходного напряжения. Статья посвящена развитию метода многопараметрических модулирующих функций путем разработки новых математических моделей и определения функций и алгоритмических уравнений для анализа по подсистемным составляющим электромагнитных процессов в разветвленных электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами и звеньями с синусоидальными, постоянными и импульсными напряжениями. Полупроводниковые коммутаторы могут осуществлять высокочастотное изменение структуры электрических цепей и широтно-импульсную модуляцию фазных и линейных напряжений трехфазной сети электропитания, реализуя регулирование выходных напряжений полупроводниковых преобразователей параметров электрической энергии.

**Ключевые слова:** электромагнитные процессы, выходные напряжение и ток, структура, многопараметрические модулирующие функции, полупроводниковые коммутаторы, моделирование.

Надійшла 19.08.2020

Received 19.08.2020

# ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621. 311

В.А. Побігайло, к.т.н., доц., ORCID 0000-0003-2673-7329  
В.П. Калінчик, к.т.н., доц., ORCID 0000-0003-4028-0185  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

## ПОБУДОВА СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ У ПРИСТРОЯХ ОБМЕЖЕННЯ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

*На разі зростання рівнів та кількості струмів короткого замикання, існують проблеми, пов'язані з підвищенням ефективності методів та засобів обмеження струмів короткого замикання, які є актуальними у контексті розвитку енергетичного сектору України. Ключовим аспектом тут є інтенсифікація темпів зменшення витрат електроенергії у виробничих системах електропостачання (ВСЕП), що може бути досягнуто шляхом впровадження нових або з підвищеною ефективністю існуючих методів та засобів обмеження струмів короткого замикання. Присутня наукова та практична актуальність вдосконалення функціонування засобів обмеження струмів короткого замикання (КЗ), сформульована мета та завдання наукового дослідження. В якості рішення уперше запропоновано та досліджено спосіб управління обмеження струмів короткого замикання у ВСЕП з використанням струмообмежуючого реактора з керованим шунтом. Розроблено алгоритм дії системи «реактор - керований шунт». У роботі проведено аналіз статистичних характеристик ознаки-функції, а також доведений зв'язок статистичних характеристик ознаки-функції і характеристик самого випадкового процесу. Для цього використовувався математичний апарат теорії викиду випадкових функцій. Проведено результативний аналіз оптимальних ознак реалізації системи обмеження струмів КЗ «реактор - керований шунт», що характеризують пред'явлені випадкові процеси, при якому фізичну реалізацію способу класифікації можна розглядати у якості лінійного класифікатора, який дозволяє реалізувати лінійну дискримінантну функцію у просторі ознак. Слід також зазначити, що обмеження струмів КЗ в ВСЕП за схемою «реактор - керований шунт» має певні суттєві переваги перед іншими існуючими на сьогоднішній день засобами обмеження струмів КЗ.*

**Ключові слова:** струм короткого замикання, реактор, керований шунт, прийняття рішення, енергоефективність, зниження витрат електричної енергії.

**Актуальність.** Серед проблем розвитку енергетичного комплексу України важливе місце в умовах зростання рівнів струмів короткого замикання (КЗ) займають питання підвищення ефективності методів і засобів їх обмеження. При цьому основним чинником є інтенсифікація темпів зменшення витрат електричної енергії у електропостачальних виробничих системах (ЕПВС), що може бути досягнуто реалізацією нових і підвищенням ефективності існуючих методів і засобів обмеження струмів КЗ. Якщо розглядати питання зменшення витрат електричної енергії шляхом модернізації і заміни обладнання, то такі рішення вимагають ретельного аналізу сучасних умов роботи електрообладнання, а так само і значних капітальних вкладень. Проблема ускладнюється тим, що в ЕПВС є значна кількість обладнання, яке потрібно замінити за умовами ймовірнісних струмів КЗ і обладнання з виробленим терміном служби або значним зносом, одночасно з цим промисловість не забезпечує потреби виробничих систем у відповідному електрообладнанні. Це призводить до того, що можливості існуючого струмообмежуючого обладнання не завжди використовуються ефективно, а капітальні вкладення можуть бути економічно невиправданими, також не враховуються можливості використання енергозберігаючих схемних рішень. Тому питання про такий спосіб вирішення даної проблеми необхідно вирішувати з урахуванням техніко-економічного аналізу. Дослідження показують, що питання зниження витрат електричної енергії під час відсутності струмів КЗ у ЕПВС, потребують нових підходів при їх вирішенні [1-4]. Це пов'язано як з подальшим підвищенням ефективності функціонування засобів і методів обмеження струмів КЗ, що використовуються на сьогоднішній день, так і з активним використанням принципово нових засобів і методів обмеження струмів КЗ, а саме – пристроїв керування засобами обмеження струмів КЗ, з метою функціонального вдосконалення [1-4].

© В.А. Побігайло, В.П. Калінчик, 2020



Проведений аналіз вже існуючих засобів і методів обмеження струмів КЗ свідчить, що до теперішнього часу використання пристроїв керування системами обмеження струмів КЗ не використовувалося. Необхідність та актуальність цих рішень доводить, що, підвищуючи ефективність засобів обмеження струмів КЗ, завдяки пристроям керування засобами обмеження струмів КЗ, можна знизити витрати, які пов'язані з обслуговуванням устаткування, що обмежує струми КЗ, за рахунок зменшення витрат у режимі відсутності аварійних процесів, а саме струмів КЗ, тобто здійснити реальне енергозбереження при обмеженні струмів КЗ у ЕПВС [1-7]. Лінійний реактор, що включається послідовно у відповідну лінію (приєднання), обмежує струм КЗ і підтримує відповідний рівень залишкової напруги в вузлах попередньої увімкненої мережі при КЗ. Лінійні струмообмежуючі реактори можуть бути індивідуальні - для однієї лінії і групові - для декількох ліній. Обмотки реакторів виконуються, як правило, з багатожильного ізольованого проводу - мідного або алюмінієвого, на номінальні струми 630 А і більше. Однак, в ньому у безаварійному нормальному режимі роботи, тобто відсутність струмів КЗ, мають місце витрати активної і реактивної потужності, які призводять до витрат електричної енергії. Ця особливість роботи струмообмежуючих реакторів і є суттєвим недоліком, але враховуючи їх ефективність обмеження струмів КЗ у ЕПВС, слід відзначити, що застосування такого засобу має бути вдосконалено за допомогою впровадження пристроїв керування засобами обмеження струмів КЗ.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності функціонування засобів обмеження струмів КЗ у виробничих системах за рахунок оптимізації режимів їх функціонування.

Для досягнення поставленої мети у статті необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати необхідність вдосконалення засобів та методів обмеження струмів КЗ;
- запропонувати систему «реактор – керований шунт», для підвищення ефективності функціонування засобів обмеження струмів КЗ;
- розробити алгоритми, які використовуються для побудови системи розпізнавання образів, при обмеженні струмів КЗ у ЕПВС за допомогою системи «реактор – керований шунт»;
- запропонувати методику визначення виду нелінійного перетворення для побудови системи розпізнавання образів, при обмеженні струмів КЗ у ЕПВС за допомогою системи «реактор – керований шунт»;
- запропонувати структурну схему блока розпізнавання образів системи «реактор – керований шунт».

**Пристрій управління обмеженням струмів короткого замикання за системою «реактор – керований шунт».**

Пропонується реалізацію використання моделей теорії розпізнавання образів у вигляді пристрою управління обмеженням струмів КЗ. У пристрої включення і відключення індуктивного опору здійснюється автоматично при виникненні струму КЗ [9, 10, 11]. Принцип дії пристрою заснований на порівнянні вимірюваного струму з еталонним і формуванні сигналу управління, який впливає на індуктивний опір. На рис. 1 представлена структурна схема пристрою обмеження струму КЗ. У розрив електричної мережі 1 включений індуктивний опір (струмообмежувальний реактор) 2, який шунтується комутаційним елементом 3. До електричної мережі підімкнено блок вимірювання струмів 4 (магніторезистивний датчик струму або датчики, засновані на ефекті Хола), пов'язаний з аналізатором 5, керуючий вихід якого через перетворювач 6 підімкнений до входу керування комутаційного елемента 3 (високовольтний тиристорний вимикач).

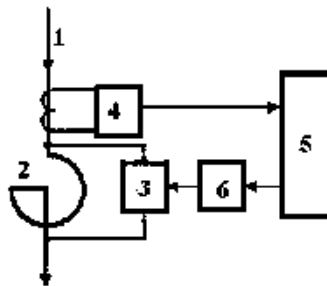


Рисунок 1. Схема пристрою обмеження струму КЗ

Пристрій для обмеження струму КЗ працює таким чином. Інформація з блоку вимірювання струмів 4 поступає на аналізатор 5. У разі, коли  $\Delta I_T \geq \delta I$ , режим контрольної точки є аварійним, і пристрій 6 формує сигнал управління для комутаційного елемента 3, який і відключає комутаційний елемент 3, а індуктивний опір 2 обмежує струм КЗ. Після цього інформація з блоку вимірювання струмів 4 знову поступає на аналізатор 5. В усіх інших випадках пристрій 6 формує сигнал управління для комутаційного елемента 3, який включає комутаційний елемент 3, що закорочує індуктивний опір 2. Після цього інформація з блоку вимірювання струмів 4 знову поступає на аналізатор 5. Періодично через відрізки часу  $\Delta t$  ( $\Delta t = T/N$ , де  $T$  – інтервал контролю,  $N$  – число точок контролю) рис. 3.5, вимірюють величину фактичного струму

електричної мережі  $I_{тф}$ . Визначають величину розузгодження  $\Delta I_T$  між фактичним  $I_{тф}$  і заданим (еталонним)  $I_{тэ}$  струмом на контрольований інтервал часу  $T$ .

$$\Delta I_T = \sqrt{\sum_{t=1}^n (I_{тф} - I_{тэ})^2}$$

де  $I_{тэ}$  – величина, що враховує умови пуску електродвигуна при навантаженні, визначається з виразу  $I_{тэ} = 1,8 I_{норм}$ .

У випадку якщо  $\Delta I_T \geq \delta I$  (де величина  $\delta I$ , наприклад  $\delta I = 0,1$ , встановлюється кроком дискретизації), формується дія, яка управляє відімкненням комутуючого елементу.

**Алгоритми, які використовуються для побудови системи розпізнавання образів, при обмеженні струмів КЗ за системою «реактор – керований шунт».**

Для вирішення завдань обмеження струмів КЗ можуть бути використані алгоритми класифікації і розпізнавання образів. При розробці методів класифікації можливі два види підходів [12-14]. Перший полягає в розбитті сукупності об'єктів на заздалегідь обумовлене число класів (кластерів). Другий припускає виявлення природного розшарування об'єктів на класи із заздалегідь не обумовленим їх числом. Завдання обмеження струмів КЗ частіше відносяться до завдань першого типу, коли визначаються нормальний, передаварійний і аварійний стани. Процедури групування об'єктів у класи можна поділити на три основні види:

- ієрархічні процедури (агломеративні і девизимні). У їх основі полягають алгоритми покрокового об'єднання (або розподіли) об'єктів у кластери. При цьому на кожному кроці об'єднуються (розділяються) довколишні (найбільш віддалені) об'єкти. Відстань між об'єктами визначається вибраною метрикою;
- паралельні процедури. Вони реалізуються за допомогою ітераційних алгоритмів, де на кожному кроці використовуються всі об'єкти, тобто утворення декількох кластерів відбувається одночасно;
- послідовні процедури. Вони реалізуються на основі ітераційних алгоритмів, причому на кожному кроці використовується лише частина сукупності.

У даних завданнях ієрархічні алгомеративні процедури дають наочну інтерпретацію отриманих у процесі класифікації результатів, проте ієрархічні алгоритми не придатні для умов автоматичної класифікації і не можуть бути використані при розв'язанні поставленої задачі. Напрямок використання ітеративних процедур паралельного і послідовного типу теж був відхилений для вирішуваної задачі через причину, що їх складно реалізувати у разі обмеження за швидкодією знаходження відповідного рішення. Важливим класом вирішення завдань класифікації є використання дискримінантного аналізу, який використовує лінійні рішення функції.

Загальний вигляд лінійної вирішальної функції задається формулою

$$d(x) = \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_n x_n + \omega_{n+1} x_{n+1} = w_0'' x + \omega_{n+1},$$

де вектор  $w_0'' = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)''$  називається ваговим або параметричним.

Загальноприйнято в усі вектори образів вводити після останньої компоненти 1 і представляти лінійну вирішальну функцію у вигляді

$$d(x) = w'' x,$$

де  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n, 1)''$  та  $w = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, \omega_{n+1})''$  - поповнені вектори образів і вагової відповідності. Оскільки одна і та сама величина вводиться в описи усіх образів, основні геометричні властивості відповідних класів не задіяні. Зазвичай, з контексту можна визначити, був або не був поповнений вектор образів або ваговий вектор. Надалі ми, як правило, називатимемо  $x$  і  $w$ , що входять у функцію  $d(x) = w'x$ , просто вектором образу і ваговим вектором відповідно.

Передбачається, що у разі розбиття на два класи вирішальна функція  $d(x)$  має властивість:

$$d(x) = w'x \begin{cases} \geq 0, & \text{если } x \in \omega_1, \\ < 0, & \text{если } x \in \omega_2. \end{cases}$$

При розбитті на декілька класів  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$ , тобто передбачається, що об'єкти належать більш ніж двом класам. Кожен клас відділяється від усіх інших однією роздільною поверхнею. В цьому випадку існує  $M$  вирішальних функцій, що мають властивість

$$d_i(x) = w_i'x \begin{cases} \geq 0, & \text{если } x \in \omega_i, \\ < 0, & \text{если } x \notin \omega_i, \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, M,$$

де  $w_i = (\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{in}, \omega_{i,n+1})''$  - ваговий вектор відповідний  $i$ -й вирішальній функції.

Кожен клас відділяється від будь-якого іншого окремо взятого класу «індивідуальною» роздільною поверхнею, тобто класи попарно розділюються. В цьому випадку існує  $M(M-1)/2$  (число поєднань з  $M$  класів

по два) розділяючих поверхонь. Вирішальні функції мають вигляд  $d_{ij}(x) = w_{ij}''x$  і мають властивість, що якщо образ  $x$  належить класу  $\omega_i$ , то  $d_{ij}(x) > 0$  для всіх  $j \neq i$ , крім того,  $d_{ij}(x) = -d_{ji}(x)$ .

Не такою вже й рідкістю завдання, де наявна комбінація випадків. Для їх вирішення вимагається менше  $M(M-1)/2$  розділяючих поверхонь, абсолютно необхідних в тій ситуації, коли усі класи поділені лише попарно. Існує  $M$  вирішальних функцій  $d_k(x) = w_k''x, k=1, 2, \dots, M$ , таких, що якщо образ  $x$  належить класу  $\omega_i$ , то

$$d_k(x) > d_j(x) \quad \text{для всіх } j \neq i.$$

Ця ситуація є різновидом випадку, оскільки можна покласти  $d_{ij}(x) = d_i(x) - d_j(x) = (w_i - w_j)''x = w_{ij}''x$ ,

де  $w_{ij} = w_i - w_j$ . Легко переконатися у тому, якщо  $d_i(x) > d_j(x)$  для усіх  $j \neq i$ , тобто якщо класи поділені як наведено вище. Метод нелінійного перетворення полягає у тому, що і представлений для класифікації процес, і еталон піддають нелінійному перетворенню і як міру схожості використовують функціонал

$$S = \int_0^T \{\varphi[x(t)] - \varphi[z(t)]\}^2 dt,$$

де  $\varphi$  - оператор перетворення.

Вирішальне правило може бути записане у вигляді

$$x(t) \in \{X_j(t)\}, \text{ якщо } S_j < S_v; \quad j = \overline{1, N} \quad v = \overline{1, N}1.$$

Зазвичай вимоги до високої якості кластеризації зводяться до наступного:

1. Об'єкти усередині класів мають бути тісно пов'язані між собою.
2. Об'єкти різних класів мають бути в найменшій мірі пов'язані між собою.
3. За інших рівних умов розподіл об'єктів по класах має бути рівномірним.
4. Кількість класів розбиття повинна визначатися структурою зв'язків між об'єктами.

Якщо для  $N$  об'єктів задана матриця  $R = \|r_{ij}\|$  зв'язків між ними, і на основі алгоритмів кластеризації вироблена класифікація цих об'єктів на класи  $A_1, \dots, A_m$ , що не перетинаються, то кількісною оцінкою виробленої кластеризації може бути величина

$$f(r_0, A) = \sum_{K=1}^m \sum_{i,j \in A_K} (r_{ij} - r_0),$$

де

$r_{ij}$  - показник зв'язку між  $i$ -м і  $j$ -м об'єктами;  $r_0$  - поріг істотності зв'язку.

При заданому значенні  $r_0$  оптимальному розбиттю об'єктів на  $m$  класів відповідатиме максимальне значення  $f(r_0, A)$ . Як правило, при попарному порівнянні і виявленні кращого з двох наявних об'єктів  $a$  і  $b$  будується матриця порівнянь, коли

$$C(a, b) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } a \text{ краще } b; \\ 0 - \text{у іншому випадку.} \end{cases}$$

Завдання ранжирування полягає у впорядкуванні об'єктів, що утворюють систему, за зменшенням (зростанням) значення деякої ознаки. При цьому

$$C(\Omega) = \langle i_1, i_2, \dots, i_n \rangle,$$

де  $i_j$  - номер  $j$ -го об'єкту при вказаному впорядкуванні;  $\Omega$  - множина, що складається з безмежності перестановок довжини  $n$ .

#### Опис методу детермінованих процесів системи розпізнавання образів.

У більшості випадків ці процеси сприймаються розпізнавальним пристроєм, у вигляді напруги або струму, тому під об'єктами розпізнавання розумітимемо перехідні процеси, які описуються функціями  $x(t)$  і зміни поточного значення струму, що є законом, на виході об'єкту, який діагностується. Сукупність функцій  $x(t)$ , що характеризують виділений  $j$ -й стан об'єкту, утворює деяку множину вихідних даних, яку асоціюватимемо з  $j$ -м класом перехідного процесу і позначати  $\{X_j(t)\}$ .

У функціональному просторі вводиться відстань між функціями

$$S = \int_0^T [x(t) - z(t)]^2 dt,$$

де  $x(t)$  - перехідний процес невідомого класу;  $z(t)$  - еталонне значення моделі процесу;  $T$  - часовий проміжок, на якому здійснюється порівняння процесів.

Очевидно, що наведений вираз має усі властивості, властиві мірі схожості, і за ним можна судити про близькість вимірюваного перехідного процесу до еталону. Метод нелінійного перетворення полягає в тому, що і пред'явлений для розпізнавання перехідний процес, і еталон піддають нелінійному перетворенню і як міру схожості використовують функціонал

$$S = \int_0^T \{\varphi[x(t)] - \varphi[z(t)]\}^2 dt, (1)$$

де  $\varphi$  - оператор перетворення.

Вирішальне правило може бути записане у вигляді

$$x(t) \in \{X_j(t)\}, \text{ якщо } S_j < S_v; j, v = 1, 2, \dots, N; j \neq v. (2)$$

Структурна схема пристрою який реалізує вирішальне правило (2), наведена на рис. 2. Такий пристрій включає набір нелінійних елементів (НЕ), суматорів, квадраторів та інтеграторів, згрупованих в  $N$  каналів аналізу. Вхідна інформація про перехідний процес невідомого класу в кожному каналі піддається нелінійному перетворенню і порівнюється з перетвореним еталоном класу, номер якого співпадає з номером каналу. У загальному випадку спосіб перетворення в кожному каналі, що визначається характеристикою нелінійного елемента, вибирається незалежно від інших каналів. На виходах інтеграторів накопичуються значення квадратів відхилень перетворюваної вхідної інформації, що характеризує поточний процес від перетвореного еталонного, відповідного класу, тобто визначається значення міри близькості  $S_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ). Ці значення поступають на компаратор, який визначає найменше значення з усіх  $S_j$ , відносячи тим самим пред'явлену інформацію до  $j$ -го класу.

У  $j$ -й клас увійдуть ті функції, перетворені координати яких відрізняються від перетворених координат деякої заздалегідь вибраної еталонної функції не більше, ніж на деяку величину  $\varepsilon_j$ , визначену допустимими межами відхилення параметрів системи, що діагностується, від своїх номінальних значень, тобто

$$x(t) \in \{X_j(t)\}, \text{ якщо } S_j = \int_0^T \{\varphi[x(t)] - \varphi[z(t)]\}^2 dt \leq \varepsilon_j; j = 1, 2, \dots, N.$$

Таким чином, як загальна властивість перехідного процесу одного класу вибирається відстань між поточним і еталонним, після їх нелінійного перетворення, мета якого полягає в мінімізації цієї відстані, тобто в ущільненні даних усередині одного класу при одночасному збільшенні відстані між реальними даними і еталонами різних класів. Принципова можливість такого підходу базується на принципі стислих зображень, яка сформульована теоремою Банаха [12-14]. Для ілюстрації ефекту ущільнення отриманих даних на осцилограмах (рис. 3 а, б) наведено приклади застосування двох видів нелінійного оператора  $\varphi(x)$  до сукупності  $x(t)$ . З ілюстрацій видно, що перетворені сукупності  $\varphi[x(t)]$  утворюють компактніші групи, ніж початкові. Отже, можна чекати, що відповідний вибір відповідного оператора перетворення дозволить контрастувати дані в тому сенсі, як це сказано вище.

**Методика** визначення виду нелінійного перетворення системи «реактор – керований шунт». Використання функціонала (3.1) як міри близькості, пред'явленого  $x(t)$  до еталону  $z(t)$ , припускає визначення такого оператора  $\varphi(x)$ , який дозволив би досить чітко контрастувати дані різних класів. Обмежуючись двома класами даних і однією загальною еталонною функцією, покажемо правило знаходження оператора перетворення. Заздалегідь введемо критерій ефективності перетворення, виходячи з таких міркувань. Нехай функція  $x_\varepsilon(t)$  з сукупності функцій  $\{X_1(t)\}$  першого класу після перетворення має найменше значення міри близькості з перетвореним еталоном  $z(t)$ , тобто

$$\{X_1(t)\}. S_\varepsilon = S\{\varphi[x_\varepsilon(t)], \varphi[z(t)]\} = \min \text{ при } x_\varepsilon(t) \in \{X_1(t)\}.$$

Нехай, крім того,  $\varepsilon$  функція  $x_\delta(t)$  з нескінченості іншого класу  $\{X_2(t)\}$ , міра схожості якої після перетворення з тим самим еталоном  $z(t)$  максимальна і дорівнює  $S_\delta$ . Визначимо  $x_\varepsilon(t)$  та  $x_\delta(t)$  як граничні функції першого і другого класів відповідно.

Тоді як критерій ефективності перетворення зручно використовувати наступне співвідношення:

$$\eta = \frac{S\{\varphi[x_\delta(t)], \varphi[z(t)]\}}{S\{\varphi[x_\varepsilon(t)], \varphi[z(t)]\}} = \frac{S_\delta}{S_\varepsilon},$$

яке характеризує роздільність даних першого і другого класів. При  $\eta > 1$  дані змішані; тобто завжди має місце помилка класифікації; при  $\eta < 1$  дані повністю роз'єднані.

Припустимо, що усі функції  $\{X(t)\}$  після зведення їх до інтервалу  $[0, 1]$  належать функціональному простору  $L^2$ , тоді вони можуть бути представлені лінійною комбінацією поліномів Лежандра [12-14] (вважаємо, що число поліномів  $m+1$  забезпечує достатню міру точності представлення):

$$x(t) = \sum_{i=0}^m c_i L_i(t), (3)$$

де  $L_i(t)$  - поліноми Лежандра, що задовольняють умові ортонормування:

$$\int_0^1 L_i(t)L_j(t)dt = \begin{cases} 0, & i \neq j; \\ 1, & i = j, \end{cases}$$

де

$c_i$  - коефіцієнти розкладання.

У цьому випадку кожній функції  $x(t)$  може бути співставлений  $(m+1)$  мірний вектор з координатами  $c_0, c_1, c_2, \dots, c_m$  і обернений. Ця обставина робить особливо наочною вибрану метрику: відстань між двома функціями співпадає з відстанню між відповідними їм векторами, тобто нескінченість вхідних функцій ізометричній нескінченості векторів відповідної розмірності. Дійсно, нехай  $x_1(t)$  і  $x_2(t)$  узяті з нескінченості вхідних функцій. Міра близькості між ними

$$S[x_1(t)x_2(t)] = \int_0^1 [x_1(t) - x_2(t)]^2 dt.$$

Цим функціям відповідають  $(m+1)$  - мірні вектори  $c=(c_0, c_1, \dots, c_m)$ ,  $b=(b_0, b_1, \dots, b_m)$ , квадрат відстані між якими

$$S(c, b) = \sum_{i=0}^m (c_i - b_i)^2.$$

З іншого боку

$$S[x_1(t)x_2(t)] = \int_0^1 \left[ \sum_{i=0}^m (c_i - b_i)^2 L_i(t) \right]^2 dt = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m (c_i - b_i)(c_j - b_j) \int_0^1 L_i(t)L_j(t) dt \quad \text{або, враховуючи}$$

властивість ортогональності,

$$S[x_1(t)x_2(t)] = \sum_{i=0}^m (c_i - b_i)^2 = S(c, b).$$

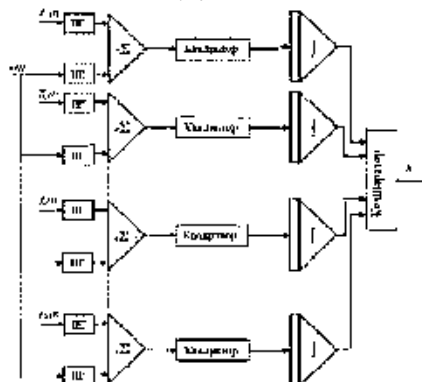


Рисунок 2. Структурна схема пристрою розпізнавання

Повертаючись до питання вибору оператора перетворення, позначимо нескінченість вхідних функцій, що апроксимуються з достатньою точністю  $m+1$  поліномами Лежандра, через  $U$ . Цю множину, внаслідок її ізоморфізму і ізометрії з  $m+1$  - мірним векторним простором, будемо завжди, якщо це зручно, ототожнювати з останнім. Кожна вхідна функція з  $U$  піддається нелінійному перетворенню за допомогою оператора  $\varphi$ , внаслідок чого нескінченість  $U$  відображується в нескінченості перетворених функцій  $\{\varphi[x(t)]\}$ , яку назвемо нескінченістю образів вхідних функцій і позначимо через  $V$ . Очевидно, що у загальному випадку образи в просторі  $V$  займають по відношенню один до одного інше положення в сенсі встановленої відстані, ніж їх прообрази у просторі  $U$ . Якщо перетворена функція  $\varphi[x(t)]$  може бути представлена своїм розкладанням у степеневий ряд, обмежений до  $n$  членів

$$\varphi[x(t)] = \sum_{i=0}^n A_i x^i(t), (4)$$

то оператор перетворення  $\varphi(x)$  визначається своїми коефіцієнтами  $A_i$  ( $i=0, 1, \dots, n$ ). Отже, завдання оператора перетворення еквівалентне завданню коефіцієнтів перетворення  $A_i$ .

Вирішимо поставлене завдання для перетворення другого порядку, пширивши потім результати на перетворення довільного порядку. У першому випадку простір перетворених функцій є сукупністю результатів перетворення другого порядку, тобто вхідній функції  $x(t)$  відповідає вихідна функція

$$\varphi[x(t)] = A_0 + A_1 x(t) + A_2 x^2(t). (5)$$

Знайдемо коефіцієнти перетворення другого порядку над нескінченністю лінійних комбінацій  $m+1$  поліномів Лежандра. Представимо еталонну функцію рядом відповідно до виразу (3):

$$z(t) = \sum_{i=0}^m c_i L_i(t), (6)$$

тоді гранична функція, що належить першому класу, може бути записана у вигляді:

$$x_\varepsilon(t) = \sum_{i=0}^m (c_i + \varepsilon_i) L_i(t), (7)$$

де  $\varepsilon_i$  – задана величина відхилення  $i$ -го коефіцієнта розкладання граничної функції першого класу від відповідного коефіцієнта розкладання еталонної функції.

Вважатимемо функцію  $x_\delta(t)$  що не належить першому класу, якщо значення відхилень коефіцієнтів її розкладання в ряд Лежандра не менше, ніж  $\varepsilon_i$  ( $\delta_i \geq \varepsilon_i$ ); тоді гранична функція другого класу

$$x_\delta(t) = \sum_{i=0}^m (c_i + \delta_i) L_i(t).$$

Знайдемо відстань між перетвореною граничною функцією першого класу і перетвореною еталонною функцією, позначивши скорочено  $x_\delta(t) = x_\delta$ ;  $z(t) = z$ ;  $L_i(t) = L$ :

$$S_\varepsilon = S\{\varphi(x_\varepsilon), \varphi(z)\} = \int_0^1 \{\varphi(x_\varepsilon) - \varphi(z)\}^2 dt.$$

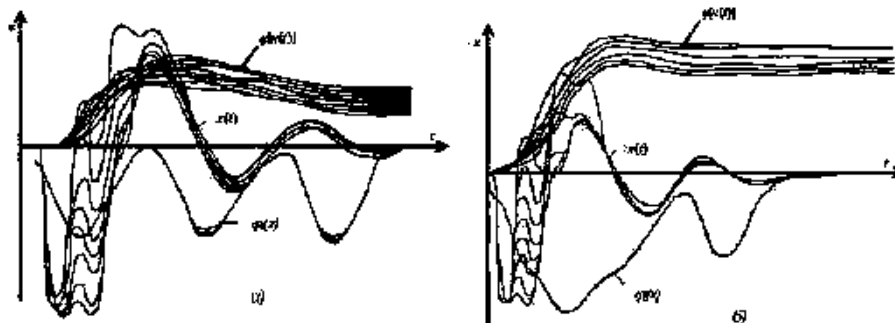


Рисунок. 3. Графік перетворення сигналів: а) з оператором  $\varphi_1(x)$ ; б) з оператором  $\varphi_2(x)$ .

Права частина цього виразу, з урахуванням (3.5), може бути записана у вигляді:

$$\int_0^1 [A_1(x_\varepsilon - z) + A_2(x_\varepsilon^2 - z^2)]^2 dt,$$

а після підстановки (6) і (7):

$$\begin{aligned} S_\varepsilon = & \int_0^1 \{A_1 \sum_{i=0}^m \varepsilon_i L_i + A_1 [\sum_{i=0}^m (c_i + \varepsilon_i)^2 L_i^2 + 2 \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j>i}^m (c_i + \varepsilon_i)(c_j + \varepsilon_j) L_i L_j - \\ & - \sum_{i=0}^m c_i^2 L_i^2 - 2 \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j>i}^m c_i c_j L_i L_j]\}^2 dt = \int_0^1 \{A_1 \sum_{i=0}^m \varepsilon_i L_i + A_2 [\sum_{i=0}^m \varepsilon_i^2 L_i^2 + \\ & + 2 \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j>i}^m (\varepsilon_j c_i + \varepsilon_i c_j + \varepsilon_i \varepsilon_j) L_i L_j]\}^2 dt = \beta_1 A_1^2 + 2\beta_{1,2} A_1 A_2 + \beta_2 A_2^2, \end{aligned}$$

де використані позначення:

$$\beta_1 = \int_0^1 \left\{ \sum_{i=0}^m \varepsilon_i L_i \right\}^2 dt; \quad \beta_{1,2} = \int_0^1 \varepsilon_i L_i \left[ \sum_{k=0}^m \varepsilon_k^2 L_k^2 + 2 \sum_{k=0}^{m-1} \sum_{j>k}^m (\varepsilon_k c_j + c_k \varepsilon_j + \varepsilon_k \varepsilon_j) L_k L_j \right] dt;$$

$$\beta_2 = \int_0^1 \left[ \sum_{i=0}^m \varepsilon_i^2 L_i^2 + 2 \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j>i}^m (\varepsilon_i c_j + c_i \varepsilon_j + \varepsilon_i \varepsilon_j) L_i L_j \right]^2 dt.$$

Аналогічно, відстань між функцією  $x_\delta(t)$  і еталонною функцією може бути записана у вигляді:

$$S_\delta = S\{\varphi(x), \varphi(z)\} = \alpha_1 A_1^2 + 2\alpha_{1,2} A_1 A_2 + \alpha_2 A_2^2,$$

де  $\alpha$  виходять з відповідних  $\beta$  заміною  $\varepsilon$  на  $\delta$ , і, відповідно, коефіцієнт ефективності перетворення

$$\eta = \frac{\alpha_1 A_1^2 + 2\alpha_{1,2} A_1 A_2 + \alpha_2 A_2^2}{\beta_1 A_1^2 + 2\beta_{1,2} A_1 A_2 + \beta_2 A_2^2}.$$

Розділивши чисельник і знаменник на  $A_2^2$ , і позначивши  $A_1/A_2$  через  $r$ , маємо:

$$\eta = \frac{\alpha_1 r^2 + 2\alpha_{1,2} r + \alpha_2}{\beta_1 r^2 + 2\beta_{1,2} r + \beta_2}. \quad (8)$$

Максимізувавши коефіцієнт ефективності по  $r$  звичайним способом, знайдемо дві точки, підозрілі на екстремум. Потім підстановкою цих значень в (8) знайдемо точку, що дає максимум і вирішення до поставленого завдання. У такій само послідовності вирішується завдання пошуку коефіцієнтів перетворення  $(m+1)$ -го порядку над нескінченністю поліномів Лежандра  $(m+1)$ -й міри. Нехай

$$z(t) = \sum_{i=0}^m c_i L_i; \quad x_\varepsilon(t) = \sum_{i=0}^m (c_i + \varepsilon_i) L_i; \quad x_\delta(t) = \sum_{i=0}^m (c_i + \delta_i) L_i.$$

Після перетворення у ступеневий ряд порядку  $n+1$  згідно (4) наведені розкладання наберуть вигляду:

$$\varphi[z(t)] = A_0 + A_1 \sum_{i=0}^m c_i L_i + \dots + A_k \left( \sum_{i=0}^m c_i L_i \right)^k + \dots + A_n \left( \sum_{i=0}^m c_i L_i \right)^n;$$

$$\varphi[x_\varepsilon(t)] = A_0 + A_1 \sum_{i=0}^m (c_i + \varepsilon_i) L_i + \dots + A_k \left[ \sum_{i=0}^m (c_i + \varepsilon_i) L_i \right]^k + \dots + A_n \left[ \sum_{i=0}^m (c_i + \varepsilon_i) L_i \right]^n;$$

$$\varphi[x_\delta(t)] = A_0 + A_1 \sum_{i=0}^m (c_i + \delta_i) L_i + \dots + A_k \left[ \sum_{i=0}^m (c_i + \delta_i) L_i \right]^k + \dots + A_n \left[ \sum_{i=0}^m (c_i + \delta_i) L_i \right]^n.$$

Користуючись рівнянням, яке легко доводиться методом математичної індукції, а саме:

$$\left( \sum_{i=0}^m c_i \right)^n = \sum_{i_1=0}^m \sum_{i_2=0}^m \dots \sum_{i_n=0}^m c_{i_1} L_{i_1} \dots c_{i_n} L_{i_n},$$

можна надати перетвореним функціям наступний вигляд:

$$\varphi[z(t)] = A_0 + A_1 \sum_{i=0}^m c_i L_i + A_2 \sum_{i_1=0}^m \sum_{i_2=0}^m c_{i_1} c_{i_2} L_{i_1} L_{i_2} + \dots + A_n \sum_{i_1=0}^m \sum_{i_2=0}^m \dots \sum_{i_n=0}^m c_{i_1} c_{i_2} \dots c_{i_n} L_{i_1} L_{i_2} \dots L_{i_n}, \quad (9)$$

$$\varphi[x_\varepsilon(t)] = A_0 + A_1 \sum_{i=0}^m (c_i + \varepsilon_i) L_i + A_2 \sum_{i_1=0}^m \sum_{i_2=0}^m (c_{i_1} + \varepsilon_{i_1})(c_{i_2} + \varepsilon_{i_2}) L_{i_1} L_{i_2} + \dots$$

$$\dots + A_n \sum_{i_1=0}^m \sum_{i_2=0}^m \dots \sum_{i_n=0}^m (c_{i_1} + \varepsilon_{i_1})(c_{i_2} + \varepsilon_{i_2}) \dots (c_{i_n} + \varepsilon_{i_n}) L_{i_1} L_{i_2} \dots L_{i_n}, \quad (10)$$

$$\varphi[x_\delta(t)] = A_0 + A_1 \sum_{i=0}^m (c_i + \delta_i) L_i + A_2 \sum_{i_1=0}^m \sum_{i_2=0}^m (c_{i_1} + \delta_{i_1})(c_{i_2} + \delta_{i_2}) L_{i_1} L_{i_2} + \dots$$

$$\dots + A_n \sum_{i_1=0}^m \sum_{i_2=0}^m \dots \sum_{i_n=0}^m (c_{i_1} + \delta_{i_1})(c_{i_2} + \delta_{i_2}) \dots (c_{i_n} + \delta_{i_n}) L_{i_1} L_{i_2} \dots L_{i_n}.$$

Тоді відстань між перетвореною граничною функцією першого класу і перетвореною еталонною функцією

$$S_\varepsilon = S\{\varphi[x_\varepsilon(t)], \varphi[z(t)]\} = \int_0^1 \{\varphi(x_\varepsilon) - \varphi(z)\}^2 dt,$$

після підстановки (9) і (10) дає

$$S_\varepsilon = \int_0^1 \left\{ A_1 \sum_{i=0}^m \varepsilon_i L_i + A_2 \sum_{i_1=0}^m \sum_{i_2=0}^m [(c_{i_1} + \varepsilon_{i_1})(c_{i_2} + \varepsilon_{i_2}) - c_{i_1} c_{i_2}] L_{i_1} L_{i_2} + \dots \right. \\ \left. \dots + A_n \sum_{i_1=0}^m \sum_{i_2=0}^m \dots \sum_{i_n=0}^m [(c_{i_1} + \varepsilon_{i_1})(c_{i_2} + \varepsilon_{i_2}) \dots (c_{i_n} + \varepsilon_{i_n}) - c_{i_1} c_{i_2} \dots c_{i_n}] L_{i_1} L_{i_2} \dots L_{i_n} \right\}^2 dt.$$

Позначивши коефіцієнти при шуканих  $A_1, A_2, \dots, A_n$  через  $b_1(t), b_2(t), \dots, b_n(t)$  відповідно, отримаємо

$$S_\varepsilon = \int_0^1 \left[ \sum_{i=1}^n b_i(t) A_i \right]^2 dt = \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^n A_{i_1} A_{i_2} \int_0^1 b_{i_1}(t) b_{i_2}(t) dt.$$

Розраховуючи аналогічним чином відстань між перетвореною еталонною функцією і найближчою перетвореною, що не належить цьому класу, отримаємо:

$$S_\delta = \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^n A_{i_1} A_{i_2} \int_0^1 g_{i_1}(t) g_{i_2}(t) dt,$$

де

$g_i(t)$  – коефіцієнт при відповідній складовій, і вираз для коефіцієнта ефективності набуває вигляду:

$$\eta = \left( \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^n A_{i_1} A_{i_2} \int_0^1 g_{i_1}(t) g_{i_2}(t) dt \right) / \left( \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^n A_{i_1} A_{i_2} \int_0^1 b_{i_1}(t) b_{i_2}(t) dt \right). \quad (11)$$

Узявши похідні по  $A_i$ , і прирівнявши їх до нуля, знайдемо коефіцієнти нелінійного перетворення, що надають максимум виразу (11). З фізичної точки зору ця можливість пояснюється тим, що нелінійне перетворення надає вагу тим коефіцієнтам розкладання, на які чинить більший вплив досліджуваний параметр. Саме тому введений критерій ефективності перетворення дозволяє визначити вид оператора перетворення для контрастування кожного параметра. Таким чином, у цьому розділі розглянуто завдання діагностики стосовно детермінованих систем, тобто тих у яких впливом випадкових відмов можна нехтувати.

#### Аналіз ознак реалізації системи розпізнавання образів.

Перш ніж перейти безпосередньо до знаходження оператора нелінійного перетворення, необхідно проаналізувати вираз

$$S = \int_0^T \varphi[x(t)] dt - \varphi_0, \quad (12)$$

причому для зручності викладання результату трактуватимемо з точки зору геометричного представлення завдання розпізнавання.

Покажемо, що для досліджуваного способу класифікації можна визначити такий набір ознак, що характеризують пред'явлені випадкові процеси, при якому фізичну реалізацію способу можна розглядати у якості лінійного класифікатора, що реалізує лінійну дискримінантну функцію у просторі ознак. Для цього представимо праву частину виразу (3.12) у вигляді наближеної рівності

$$\int_0^T \varphi[x(t)] dt - \varphi_0 \approx \sum_{q=1}^Q \varphi[x(t_q)] \Delta t - \varphi_0,$$

де  $x(t_q)$  – ордината реалізації  $x(t)$  у момент часу  $t_q$  ( $q=1, 2, \dots, Q$ );  $\Delta t=T/Q$  – період квантування реалізації за часом.

Виконуючи тепер квантування реалізації  $x(t)$  по  $d+1$  амплітудним рівням (рис. 4) і розраховуючи число ординат реалізації  $r(x_k)=R(x_k)/\Delta x$ , що доводяться на одиницю ширини кожного амплітудного інтервалу  $\Delta x=x_{k+1}-x_k$ , прилегло до рівня  $x_k$ , маємо при  $d$  амплітудні інтервали

$$S \approx \sum_{k=1}^d r(x_k) \Delta x \varphi(x_k) \Delta t - \varphi_0 = T \sum_{k=1}^d \varphi(x_k) \frac{r(x_k) \Delta t}{T} \Delta x - \varphi_0, \quad (13)$$

де  $x_k$  – значення  $k$ -го рівня;  $\Delta x$  – ширина амплітудного інтервалу;  $\varphi(x_k)$  – значення оператора перетворення для  $k$ -го рівня;  $R(x_k)$  – загальне число ординат, що потрапили в  $k$ -й інтервал;  $r(x_k)$  – середня щільність ординат, що потрапили в  $k$ -й інтервал  $[r(x_k)=R(x_k)/\Delta x]$ .



Позначаючи  $r(x_k)\Delta x/T$  через  $h(x_k)$ , приходимо до виразу

$$S \approx \Delta x t \sum_{k=1}^d \varphi(x_k) h(x_k) - \varphi_0. \quad (14)$$

Приймаючи до розгляду  $d$ -мірний вектор  $H$  з координатами  $h(x_1), h(x_2), \dots, h(x_k), \dots, h(x_d)$  і  $d$ -мірний вектор  $\Phi$  з координатами  $\varphi(x_1), \varphi(x_2), \dots, \varphi(x_k), \dots, \varphi(x_d)$  вираз (12) можна записати у вигляді:

$$S \approx \Delta x (\Phi H T) - \varphi_0 \quad (15)$$

де

$\Phi H$  – скалярний добуток векторів  $\Phi$  і  $H$ .

Аналізуючи вираз (13), неважко помітити, що множник  $r(x_k)\Delta t\Delta x/T=R(x_k)\Delta t/T$  визначає час знаходження реалізації випадкового процесу в  $k$ -му амплітудному інтервалі, який відноситься до тривалості реалізації. Називаємо цю величину відносним часом перебування реалізації випадкового процесу в інтервалі  $\Delta x_k$  і позначаємо  $\Delta t(x_k)$ . Тоді величина

$$h(x_k) = \frac{r(x_k)\Delta t}{T} = \frac{R(x_k)\Delta t}{T\Delta x} = \frac{\Delta t(x_k)}{\Delta x} \quad (16)$$

є відносним часом перебування реалізації в амплітудному інтервалі, ширина якого дорівнює одиниці.

Набором таких величин координатами  $h(x_1), h(x_2), \dots, h(x_k), \dots, h(x_d)$  можна характеризувати пред'явлену реалізацію, використовуючи ці величини як ознаки реалізації; отже, вектор  $H$  у виразі (15) еквівалентний вектору ознак  $X$  в

$$G(X) = WX + \omega_0 = \sum_{k=1}^d \omega_k x_k + \omega_0, \quad (17)$$

де  $X$  - вектор ознак з координатами  $x_1, x_2, \dots, x_d$ ;  $W$  - ваговий вектор з координатами  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_d$ ;  $\omega_0$  - скаляр (зазвичай розглядається як  $(d+1)$ -а компонента вагового вектора);  $WX$  - скалярний добуток векторів  $W$  і  $X$ . Зі свого боку, вектор  $\Phi$  може розглядатися як ваговий вектор, оскільки його компоненти визначають ваги, з якими ознаки реалізації входять у вираз (14).

Оскільки вираз (15) аналогічний рівнянню лінійної дискримінантній функції (17), то й пристрій розпізнавання, що використовує принцип нелінійного перетворення початкової інформації відповідно до (3.12), є лінійним распізнавачем. Іншими словами, нелінійне перетворення в просторі ординат реалізації при вибраному векторі ознак  $H$  еквівалентне лінійному перетворенню в просторі ознак.

Набір ознак координатами  $h(x_k)$  ( $k=1, 2, \dots, d$ ) має дві явні властивості:

$$1) h(x_k) \geq 0, \quad (18)$$

що виходить з  $h(x_k)=r(x_k) \Delta t/T$ , де всі величини, що входять в праву частину, позитивні;

$$2) \sum_{k=1}^d h(x_k) \Delta x = 1. \quad (19)$$

Ця властивість виходить зі співвідношення

$$\sum_{k=1}^d h(x_k) \Delta x = \sum_{k=1}^d \frac{r(x_k)\Delta t}{T} \Delta x = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^d r(x_k) \Delta x \Delta t.$$

Виразом під знаком суми є час перебування реалізації випадкового процесу в  $k$ -му амплітудному інтервалі, тому сума цих значень по усіх рівнях дорівнює часу аналізу реалізації; отже

$$\sum_{k=1}^d h(x_k) \Delta x = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^d r(x_k) \Delta x \Delta t = \frac{1}{T} T = 1.$$

Досі при розгляді вектора  $H$  у виразі (3.15) його компонентам ставилися у відповідність значення відносного часу перебування струму КЗ в певних амплітудних інтервалах. Такий підхід, обумовлений виробленим квантуванням реалізації по рівню, дозволяє розглядати вектор ознак в кінцевому  $d$ -мірному просторі, де  $d+1$  дорівнює числу рівнів квантування, що, у свою чергу, дозволяє застосувати при аналізі даного пристрою достатньо повно розроблений на теперішній час математичний апарат теорії розпізнавання образів для скінченномірних просторів ознак.

Проте в певних випадках зручно перейти до граничних значень  $h(x_k)$  при  $\Delta x \rightarrow 0$  (і, отже, при  $d \rightarrow \infty$ ). При цьому  $h(x_k)$  стає безперервною функцією аргументу  $x$ , яку позначатимемо  $h(x)$  та інтерпретуватимемо як щільність тимчасового розподілу реалізації  $x(t)$  по амплітудних рівнях.

Враховуючи, що при  $\Delta x \rightarrow 0$  та  $\varphi(x_k) \rightarrow \varphi(x)$ , вираз (14) переписеться у вигляді:

$$S = T \int_{-A}^{+A} \varphi(x) h(x) dx - \varphi_0,$$

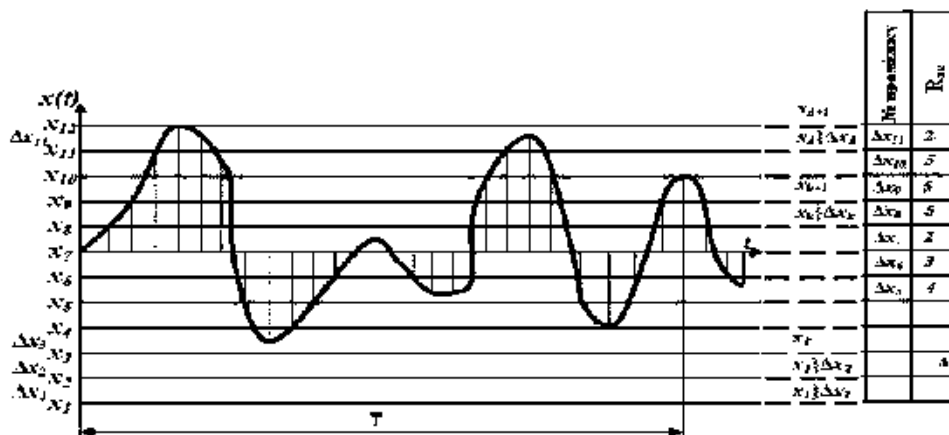


Рисунок 4. Графічний метод визначення ознак реалізації

де  $+A$  і  $-A$  - відповідно максимальне і мінімальне значення реалізації  $x(t)$  на аналізованому проміжку часу.

Щоб не накладати додаткові обмеження на максимальні і мінімальні значення реалізації випадкових процесів, і враховуючи очевидну рівність

$$\int_{-\infty}^{-A} \varphi(x)h(x)dx = 0 \quad \text{та} \quad \int_{+A}^{\infty} \varphi(x)h(x)dx = 0,$$

надалі розглядатимемо попередній інтеграл в нескінченних межах, тобто

$$S = T \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x)h(x)dx - \varphi_0. \quad (20)$$

За аналогією з (18) і (19), для функції  $h(x)$  справедливі співвідношення:

$$h(x) \geq 0; \quad 2) \quad \int_{-\infty}^{\infty} h(x)dx = 1, \quad (21)$$

і, крім того, відносний час перебування реалізації в інтервалі  $[x_k, x_{k+1}]$

$$h(x_k) = \int_{x_k}^{x_{k+1}} h(x)dx. \quad (22)$$

Вирази (14) і (20) аналогічні за своєю структурою, тому надалі використовуватиметься і перший, і другий, залежно від зручності викладу. Відповідно до цих виразів при фіксованому операторі перетворення  $\varphi(x)$  пристрій розпізнавання реагує на  $h(x_k)$  або  $h(x)$ , які будемо називати дискретною і безперервною ознакою-функцією відповідно. Практична реалізація підходу, що розвивається, припускає визначення оператора нелінійного перетворення, при якому виконуються умови

$$h(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta t(x)}{\Delta x}, \quad (23)$$

для пред'явленої сукупності даних з вибірки яка навчається. Пошук необхідного оператора здійснюється за певним критерієм, що враховує характеристики отриманих даних, пред'явлених для розпізнавання. Як впливає з (20), при фіксованому операторі перетворення такою характеристикою є ознака-функція  $h(x)$ , тому необхідно вміти обчислювати її для даних заданого процесу  $x(t)$ . З цієї точкою зору вираз (23) що є формою граничного переходу, викликає певні утруднення при аналітичному розрахунку оператора перетворення. Нижче наведено інше представлення ознаки-функції, яке може виявитися зручнішим для практичного застосування. Таке представлення може бути отримане формальним перетворенням виразу (12) з використанням властивості дельта-функції [12-14], з урахуванням функції фільтрування, яке полягає в тому, що для будь-якої обмеженої і безперервної в точці  $z_0$  функції  $\varphi(z)$  має сенс наступне:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(z)\delta(z - z_0)dz = \varphi(z_0). \quad (24)$$

Звідси

$$S = \int_0^T \varphi[x(t)]dt - \varphi_0 = \int_0^T \left\{ \varphi(x)\delta[x - y(t)]dx \right\} dt - \varphi_0 = T \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \delta[x - y(t)]dt \right\} dx - \varphi_0.$$

Порівнюючи останній вираз з (3.20), помічаємо, що

$$h(x) = \frac{1}{T} \int_0^T \delta[x - y(t)] dt. \quad (25)$$

Проте при такому формальному висновку виразу (25) залишається прихованим фізичний сенс функції  $h(x)$ , тому отримуємо це співвідношення, при цьому використовується визначення ознаки-функції як відносний час перебування  $x(t)$  на амплітудному рівні  $x$ .

Для цього розіб'ємо час аналізу на кількість  $N$  однакових малих часових проміжків  $dt_j$ , кожен з яких розташований поблизу моменту часу  $t_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ). Виконуємо також квантування даних  $x(t)$  на  $M$  амплітудних інтервалів  $\Delta x_k$ , кожен з яких розташований поблизу рівня  $x_k$  ( $k=1, 2, \dots, M$ ).

Введемо до розгляду величину  $\Delta_{kj}$ , яка дорівнює або відповідному тимчасовому проміжку  $dt_j$ , або нулю, залежно від того, потрапляє ордината  $x(t_j)$  на цьому тимчасовому проміжку в амплітудний інтервал  $\Delta x_k$  або ні. Використовуючи відоме співвідношення для  $\delta$ -функції

$$\int_a^b \delta[z - z_0] dz = \begin{cases} 1, & a < z_0 < b; \\ 1/2, & z_0 = a \quad \text{або} \quad z_0 = b; \\ 0, & z_0 < a \quad \text{або} \quad z_0 > b, \end{cases} \quad (26)$$

можна записати:

$$\Delta_{kj} = dt_j \int_{x_k}^{x_k + \Delta x_k} \delta[x - y(t_j)] dx.$$

Зрозуміло, що сумарний відносний час перебування даних в амплітудному інтервалі  $\Delta x_k$  дорівнює

$$\Delta t(x_k) = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^N \Delta_{kj} = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^N dt_j \int_{x_k}^{x_k + \Delta x_k} \delta[x - y(t_j)] dx.$$

При необмеженому зменшенні  $dt_j$  та  $\Delta x_k$ , а також враховуючи (23), отримаємо

$$h(x) = \frac{1}{T} \int_0^T \delta[x - y(t)] dt,$$

що повністю співпадає з (25).

Відзначимо, що отриманий вираз для  $h(x)$  відповідає умові нормування (21), згідно з якою

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(x) dx = 1.$$

Дійсно, враховуючи (26), маємо

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \delta[x - y(t)] dt \right\} dx = \frac{1}{T} \int_0^T dt \int_{-\infty}^{\infty} \delta[x - y(t)] dx = 1.$$

Розглянемо більш детально вираз (25). Виконуючи заміну змінною  $y(t)=z$ ;  $t=\psi(z)$ , приведемо його до вигляду

$$h(x) = \frac{1}{T} \int_z \psi'(z) \delta(x - z) dz.$$

Оскільки правило заміни змінною справедливе тільки при взаємній однозначності функцій  $z$  і  $t$ , то функцію  $x(t)$  заздалегідь необхідно розбити на ділянки з монотонною зміною. Тоді, використовуючи (24), маємо

$$h(x) = \sum_i \Delta h_i(x) = \sum_i \frac{1}{T} \int_{x(t_i)}^{x(t_{i+1})} \psi'_i(z) \delta(x - z) dz = \frac{1}{T} \sum_i \psi'_i(x) = \frac{1}{T} \sum_i \frac{1}{x'(t)}$$

(27)

де  $x'(t)$  та  $\psi'_i(x)$  – похідні відповідно до прямої і зворотної функцій на  $i$ -ій ділянці монотонності.

У своєму фізичному сенсі  $h(x) \geq 0$ , тому в (27) необхідно підставити абсолютні значення похідних. Оскільки властивість (24) має місце тільки для обмеженої функції  $\psi'_i(z)$ , то співвідношення (27) визначено для таких  $x$ , при яких  $\psi'_i(z) \neq \infty$  (відповідно  $x'(t) \neq 0$ ). Визначимо  $\Delta h_i(x)$  для  $x'(t) = 0$ , виходячи з

наступних міркувань. Нехай  $x(t)=c=\text{const}$ , тоді  $x'(t)=0$  для усього часу аналізу ( $0 \leq t \leq T$ ). При цьому відносний час перебування даних на рівні  $x=c$  дорівнює одиниці, а отже

$$h(x) = \begin{cases} 1/T, & x = c; \\ 0, & x \neq c, \end{cases}$$

що виходить з умови нормування (21).

Виділимо часовий інтервал  $\Delta t_i (0 < t_i < T)$  і знайдемо для нього значення  $\Delta h_i(x)$ , яке, відповідно, пропорційно тривалості цього інтервалу:

$$\Delta h(x) = \frac{h(x)}{T} \Delta t_i = \frac{h(x)}{T} \int_{t_i}^{t_i+\Delta t_i} dt = \frac{1}{T^2} \int_{t_i}^{t_i+\Delta t_i} dt. \quad (28)$$

При необмеженому зменшенні  $\Delta t_i$  інтеграл дорівнює одиниці, а отже, в точках максимуму, мінімуму і перегину функції  $x(t)$  має місце рівність

$$\Delta h_i(x) = 1/T^2.$$

Таким чином, об'єднуючи (3.27) і (3.28), остаточно отримаємо  $h(x) = \sum_i \Delta h_i(x)$ ,

де

$$\Delta h_i(x) = \begin{cases} \frac{1}{T} \frac{1}{|x'(t)|}, & x'(t) \neq 0; \\ \frac{1}{T^2} \int_{t_i}^{t_i+\Delta t_i} dt, & x'(t) = 0 \text{ на інтервалі } \Delta t. \end{cases}$$

Статистичні характеристики ознаки-функції розпізнавання образів системи «реактор – керований шунт».

Як було визначено, кожна реалізація, пред'явлена даному пристрою, що розпізнається, може бути характеризована відповідною їй ознакою-функцією. Оскільки кожній реалізації випадкового процесу відповідає своя ознака-функція, то для кожного класу процесів остання є випадковою функцією. Покажемо, яким чином статистичні характеристики ознаки-функції пов'язані з характеристиками самого випадкового процесу. Для цієї мети зручно використовувати математичний апарат теорії викиду випадкових функцій. Відомо [12-14], що середній час перебування випадкового процесу вищий за рівень  $\alpha$ , відповідно до часу аналізу  $T$ , і

$$M[t(\alpha)] = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{\alpha}^{\infty} f(x,t) dx dt,$$

де  $f(x, t)$  – одновимірна щільність вірогідності випадкової функції;  $M[t(a)]$  – середній відносний час перебування випадкової функції вищий за рівень  $a$ .

Отже, середній відносний час перебування процесу в інтервалі  $[x, x+\Delta x]$  дорівнює

$$M[\Delta t(x)] = M[t(x)] - M[t(x + \Delta x)] = \frac{1}{T} \int_0^T \int_x^{x+\Delta x} f(x,t) dx dt.$$

Враховуючи (16) і переходячи до обмеження при  $\Delta x \rightarrow 0$ , маємо

$$M[h(x)] = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{M[\Delta t(x)]}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{T \Delta x} \int_0^T \int_x^{x+\Delta x} f(x,t) dx dt.$$

Користуючись теоремою про середнє, внутрішній інтеграл можна розрахувати відразу:

$$\int_x^{x+\Delta x} f(x,t) dx = f(\xi, t) \Delta x, \quad x \leq \xi \leq x + \Delta x.$$

При  $\Delta x \rightarrow 0$  маємо  $f(\xi, t) \rightarrow f(x, t)$ , тому остаточно отримаємо

$$M[h(x)] = \frac{1}{T} \int_0^T f(x,t) dt. \quad (29)$$

Таким чином, математичне очікування признак-функції випадкового процесу дорівнює функції щільності вірогідності цього процесу, усередненій за час аналізу. Для стаціонарних випадкових процесів, чий статистичні характеристики не залежать від часу, справедливо  $f(x, t)=f(x)$ , тому

$$M[h(x)] = \frac{1}{T} \int_0^T f(x) dt = f(x), \quad (30)$$

тобто математичне очікування ознаки-функції стаціонарного випадкового процесу співпадає з функцією щільності вірогідності цього процесу. Також можна помітити, що співвідношення (3.21) справедливий і для  $M[h(x)]$ , дійсно

$$\int_{-\infty}^{\infty} M[h(x)] dx = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T f(x, t) dt \right\} dt = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t) dx dt = \frac{1}{T} \int_0^T dt = 1.$$

На підставі формул (29) і (30) можна зробити висновок, що математичне очікування ознаки-функції визначається одновимірною щільністю вірогідності випадкового процесу який класифікується.

Можна показати, що автокореляційна функція  $K_h(x_1, x_2)$  ознаки-функції виражається через двовимірну щільність вірогідності випадкового процесу. Для цього скористаємося відомим рівнянням

$$K_h(x_1, x_2) = M[h(x_1)h(x_2)] = M[h(x_1)]M[h(x_2)]. \quad (31)$$

Визначимо спочатку момент функції другого порядку  $B_h(x_1, x_2) = M[h(x_1)h(x_2)]$ . Для цього розіб'ємо час аналізу  $T$  випадкового процесу  $X(t)$  на  $n$  рівних малих проміжків  $dt_i$ , кожен з яких розташований поблизу моменту часу  $t_j$  ( $j = 1, 2, \dots, l, \dots, n$ ). Розіб'ємо також цей процес  $X(t)$  на  $d$  амплітудних інтервалів  $\Delta x_k$ , кожен з яких розташований поблизу рівня  $x_k$  ( $k=1, 2, \dots, d$ ).

Введемо до розгляду систему випадкових величин  $\Delta_{kj}$ , кожна з яких дорівнює відповідному часовому інтервалу  $dt_j$  або нулю залежно від того, чи потрапляє випадковий процес на цьому тимчасовому проміжку в амплітудний інтервал  $\Delta x_k$  чи ні. Очевидно, що сумарний відносний час перебування процесу в амплітудному інтервалі  $\Delta x_k$  пропорційний сумі значень  $\Delta_{kj}$ , тобто

$$\Delta t(x_k) = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^n \Delta_{kj}. \quad (32)$$

Аналогічно, розглянемо систему випадкових величин  $\Delta_{k+p,l}$ , кожна з яких дорівнює або  $dt_l$ , або нулю залежно від потрапляння або не потрапляння ординати випадкового процесу на проміжку часу  $dt_l$  в амплітудний інтервал  $\Delta x_{k+p}$ . Загальний відносний час перебування випадкового процесу в амплітудному інтервалі  $\Delta x_{k+p}$  пропорційний сумі значень  $\Delta_{k+p,l}$ , тобто

$$\Delta t(x_{k+p}) = \frac{1}{T} \sum_{l=1}^n \Delta_{k+p,l}. \quad (33)$$

Перемножимо вирази (32) і (33) і знайдемо математичні очікування обох частин отриманої рівності

$$M[\Delta t(x_k)\Delta t(x_{k+p})] = \frac{1}{T} \sum_{j,l=1}^n M[\Delta_{kj}\Delta_{k+p,l}]. \quad (34)$$

Оскільки добуток допоміжних випадкових величин  $\Delta_{k+p,l}$  може набувати тільки два значення - або  $dt_j dt_l$ , якщо ордината випадкового процесу на тимчасовому проміжку  $dt_j$  потрапляє в амплітудний інтервал  $\Delta x_k$  і при цьому на проміжку  $dt_l$  потрапляє в інтервал  $\Delta x_{k+p}$ , або дорівнює нулю в усіх інших випадках, то математичне очікування добутку допоміжних випадкових величин дорівнює добутку  $dt_j dt_l$ , помноженому на спільну ймовірність подій, вказаних в першому випадку:

$$M[\Delta_{kj}\Delta_{k+p,l}] = dt_j dt_l P[x_k \leq X(t_j) < x_{k+1}, x_{k+p} \leq X(t_l) \leq x_{k+p+1}] = dt_j dt_l \int_{x_k}^{x_k+\Delta x} \int_{x_{k+p}}^{x_{k+p}+\Delta x} f(x_1, x_2, t_j, t_l) dx_1 dx_2, \quad (35)$$

де

$f(x_1, x_2, t_j, t_l)$  – двовимірна щільність ймовірності випадкового процесу для моментів часу  $t_j$  та  $t_l$ .

Якщо амплітудні інтервали  $\Delta x$  досить малі, то за теоремою про середнє

$$\int_{x_k}^{x_k+\Delta x} \int_{x_{k+p}}^{x_{k+p}+\Delta x} f(x_1, x_2, t_j, t_l) dx_1 dx_2 = f(x_k, x_{k+p}, t_j, t_l) (\Delta x)^2,$$

де  $f(x_k, x_{k+p}, t_j, t_l)$  – двовимірна щільність ймовірності випадкового процесу при значеннях аргументів  $x_k$  и  $x_{k+p}$ .

Підставляючи цей вираз в (35) і потім результат в (34), отримаємо

$$M[\Delta t(x_k)\Delta t(x_{k+p})] = \frac{1}{T^2} \sum_{j,l=1}^n dt_j dt_l f(x_k, x_{k+p}, t_j, t_l) (\Delta x)^2.$$

Переходячи до моментної функції  $B_h(x_1, x_2)$ , маємо з урахуванням (16),

$$M[h(x_k)h(x_{k+p})] = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{M[\Delta t(x_k)\Delta t(x_{k+p})]}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{T^2} \sum_{j,l=1}^n dt_j dt_l f(x_k, x_{k+p}, t_j, t_l).$$

Переходячи до обмежень при  $n \rightarrow \infty$ , отримаємо

$$M[h(x_k)h(x_{k+p})] = \frac{1}{T^2} \int_0^T \int_0^T f(x_1, x_2, t_1, t_2) dt_1 dt_2.$$

Підставляючи отриманий вираз в (31) і враховуючи (29), остаточно отримуємо

$$\begin{aligned} K_h(x_1, x_2) &= \frac{1}{T^2} \int_0^T \int_0^T f(x_1, x_2, t_1, t_2) dt_1 dt_2 - \frac{1}{T^2} \int_0^T f(x_1, t_1) dt_1 \int_0^T f(x_2, t_2) dt_2 = \\ &= \frac{1}{T^2} \int_0^T \int_0^T [f(x_1, x_2, t_1, t_2) - f(x_1, t_1) f(x_2, t_2)] dt_1 dt_2. \end{aligned} \quad (36)$$

Для стаціонарних випадкових процесів попередня формула спрощується:

$$K_h(x_1, x_2) = \frac{2}{T^2} \int_0^T (T - \tau) f(x_1, x_2, \tau) d\tau - f(x_1) f(x_2). \quad (37)$$

де  $\tau = t_2 - t_1$ .

Враховавши у формулах (36) і (37)  $x_1=x_2=x$ , легко знайти дисперсію ознаку-функції для нестационарних і стаціонарних процесів відповідно:

$$\sigma_h^2(x) = \frac{1}{T^2} \int_0^T \int_0^T [f(x, x, t_1, t_2) - f(x, t_1) f(x, t_2)] dt_1 dt_2; \quad (38)$$

$$\sigma_h^2(x) = \frac{2}{T^2} \int_0^T (T - \tau) f(x, x, \tau) d\tau - f^2(x). \quad (39)$$

Отримані вирази (29), (30), (38), (39) дозволяють визначити перший і другий статистичні моменти ознаки-функції за відомими одновимірною і двовимірною функціям щільності розподілу ймовірності початкового випадкового процесу. Очевидно, що, використовуючи аналогічні міркування, можна знайти залежність вищих моментів ознаки-функції від статистичних характеристик випадкового процесу який класифікується.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У діючих умовах договірних відносин між оператором розподілу електричної енергії та споживачем електричної енергії в Україні у промислових мережах 6-10 кВ потрібно оперативне керування обмеження струмами КЗ, що стосуються зміни поточного режиму при проведенні планових заходів та при аварійних відключеннях тощо. Це неможливо без оперативного прогнозування режимів в умовах нормальної експлуатації і аварійних ситуаціях, яке має бути здійснено лише при відповідному програмному та апаратному оснащенні.

У роботі вперше запропоновано пристрій керування обмеженням струмів короткого замикання, де включення і відключення індуктивного опору (струмообмежуючого реактора) виконується автоматично (індуктивно-динамічним швидкодіючим пристроєм) в залежності від наявності або відсутності струму КЗ. Даний спосіб керування засобами обмеження струмів короткого замикання є перспективним та потребує подальшого розвитку та вдосконалення. Отримані теоретичні і практично-дослідні результати, які надають підстави для подальшого розвитку нових методів і засобів обмеження струмів короткого замикання в виробничих системах електропостачання з урахуванням усіх особливостей договірних відносин між оператором розподілу електричної енергії та споживачем в Україні.

Зниження витрат у споживача електричної енергії у разі використання засобів обмеження струмів КЗ можливе тільки при використанні системи обмеження струмів КЗ «реактор - керований шунт», побудованої на базі математичного апарату теорії розпізнавання образів, яка дозволяє розпізнати струм КЗ за заданий

період часу. У основі роботи цієї системи використовується метод детермінованих сигналів. Результативний аналіз оптимальних ознак реалізації системи обмеження струмів КЗ «реактор - керований шунт», що характеризують пред'явлені випадкові процеси, при якому фізичну реалізацію способу класифікації можна розглядати у якості лінійного класифікатора, який дозволяє реалізувати лінійну дискримінантну функцію у просторі ознак.

Підвищуючи ефективність роботи засобів обмеження струмів КЗ, необхідно враховувати, що кожній реалізації випадкового процесу відповідає своя ознака-функція і для кожного класу процесів остання є випадковою функцією, тому був проведений аналіз статистичних характеристик ознаки-функції, а також доведений зв'язок статистичних характеристик ознаки-функції і характеристик самого випадкового процесу. Для цього використовувався математичний апарат теорії викиду випадкових функцій.

Реалізація алгоритму функціонування пристрою обмеження струмів КЗ системи «реактор - керований шунт» дозволить понизити витрати електричної енергії в СЕС України.

#### **Список використаної літератури**

- 1.Півняк Г.Г. Перехідні процеси в системах електропостачання. –Дніпро, 2016. 600 с.
- 2.Шидловский А.К., Пивняк Г.Г., Выпанасенко С.И., Слесарев В.В. Эффективные режимы работы электротехнологических комплексов. – Днепропетровск: НГА Украины, 2000. – 184 с.
- 3.Electromagnetic compatibility in electric power systems: textbook for institutions of higher education from Ukrainian by S.I. Kostritska and I.O. Tokar / I.V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovskiy, G.G. Pivnyak, Yu. L. Saenko, editorship of the English version and terminology by Professor O.B. Ivanov. – 2 nd edition. – D.: National Mining University. – 2013. – 239 p.
- 4.Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for institutions of higher education: under the editorship of G.G.Pivnyak / G.G.Pivnyak, I.V.Zhezhelenko, Y.A.Papaika; Ministry of Education and Science of Ukrainian, National Mining University – 5-th edition, revised and expanded: Translation from Ukrainian. – Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2016. – 382 p.
- 5.Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. - М.: БНВ 2013г. 237 с.
- 6.Неклепаев Б.Н. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. – М.: Энас 2018г. 144с.
- 7.Kaoru Ishikawa. How to operate QC Circle Activities, Amer Society for Quality, 1985. ISBN 978-9999943109.
- 8.Kaoru Ishikawa. Guide to Quality Control, Asian Productivity Organization, 1986. ISBN 978-9283310358.
- 9.Розен В.П., Побігайло В.А. Засіб струмообмеження як один з способів ефективного енерговикористання // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2001. – № 421. – С. 181 – 188.
10. Розен В.П., Тарадай В.И., Несен Л.И., Побігайло В.А. Аналіз підходів до вирішення проблеми обмеження струмів короткого замикання у виробничих і енергетичних системах / ІЕЕ НТУУ «КПІ». – Киев.: 1999. – 18 с. – Рус. – Деп. в ГНТБ України 26.07.99, № 225 Ук99 // Анот. в ж. ВИНТИ РАН № 10 (333), 1999.
- 11.Розен В.П., Соловей О.І., Момот Д.С., Побігайло В.А. Математична модель роботи струмообмежувальних пристроїв за схемою «реактор – запобіжник» // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія гірництво. – 2000 р. – № 4. – С. 82 – 90.
12. El-Kady M.A. Probabilistic short-circuit analysis by Monte Carlo simulations // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1998. № 5. P. 1308-1316.
13. Патент України № 2002021620 від 15.11.2002 р. Спосіб обмеження струмів КЗ і пристрій для його реалізації. В.П. Розен, В.П. Калинчик, Д.Е. Момот, В.А. Побігайло.

**V. Pobigaylo**, PhD, Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-2673-7329

**V. Kalinchyk**, PhD, Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-4028-0185

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

## **BUILDING A PICTURE RECOGNITION SYSTEM IN SHORT CIRCUIT CURRENT DEVICES**

*Now increase of levels and amount of currents of short circuit, there are the problems, related to the increase of efficiency of methods and facilities of limitation of currents of short circuit, which are actual in the context of development power to the sector of Ukraine. A key aspect here is intensification of rates of diminishing of charges to electric power in the productive systems of power supply (BCEП) which can be attained by introduction of new or with the increased efficiency of existent methods and facilities of limitation of currents of short circuit. Scientific and practical actuality of perfection of functioning of facilities of limitation of currents of short circuit (KЗ), set forth aim and task of scientific research, is present. As a decision the method of management of limitation of currents*

of short circuit is first offered and investigational in BCEП with the use of струмообмежуючого reactor with the guided shunt. The algorithm of action of the system «reactor \_ the guided shunt» is worked out. The analysis of statistical descriptions of sign-function, and also well-proven connection of statistical descriptions of sign-function and descriptions of casual process, is in-process conducted. The mathematical vehicle of theory of extrass of casual functions was used for this purpose. The effective analysis of optimal signs of realization of the system of limitation of currents of K3 is conducted «reactor \_ the guided shunt», that characterize the produced casual processes, at which physical realization of method of classification can be examined in quality of linear classifier which allows to realize a linear дискримінантну function in space of signs. It follows marks also, that limitation of currents of K3 in BCEП on a chart a «reactor \_ the guided shunt» has substantial advantages are certain before other existing for today facilities of limitation of currents of K3.

**Keywords:** current of short circuit, reactor, guided shunt, decision-making, енергоефективність, cost of елек of тричної energy cutting.

#### REFERENCES

- 1.Pivnyak, H.H. *Perekhidni protsesy v systemakh elektropostachannya* [Transients in Electric Power Supply Systems]– Dnipro [in Ukrainian].
- 2.Shylovskiy, A.K., Pivnyak, H.H., Vypanasenko, S.I., Slesarev, V.V. *Effektivnye rezhimy raboty elektrotekhnologicheskikh kompleksov*[Effective modes of operation of electrotechnological complexes]. – Dnepropetrovsk: NGA Ukrainy [in Russian]
- 3.Electromagnetic compatibility in electric power systems: textbook for higher education institutions from Ukrainian by S.I. Kostritska and I.O. Tokar / I.V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovskiy, G.G. Pivnyak, Yu. L. Saenko, editorship of the English version and terminology by Professor O.B. Ivanov. - 2nd edition. - D.: National Mining University. - 2013. - 239 p.
- 4.Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for higher education institutions: under the editorship of G.G.Pivnyak / G.G.Pivnyak, I.V.Zhezhelenko, Y.A.Papaika; Ministry of Education and Science of Ukrainian, National Mining University - 5th edition, revised and expanded: Translation from Ukrainian. - Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2016. - 382 p.
- 5.Neklepayev, B.N. *Elektricheskaya chast' elektrostantsiy i podstantsiy* [The electrical part of power plants and substations]. M.: BHV 2013. -237 p. [in Russian]
- 6.Neklepayev, B.N. *Rukovodyashchiye ukazaniya po raschetu tokov korotkogo zamykaniya i vyboru elektrooborudovaniya* [Guidelines for the calculation of short circuit currents and the selection of electrical equipment]. – M.: Enas 2018. -144 p. [in Russian]
- 7.Kaoru Ishikawa. How to operate QC Circle Activities, Amer Society for Quality, 1985. ISBN 978-9999943109.
- 8.Kaoru Ishikawa. Guide to Quality Control, Asian Productivity Organization, 1986. ISBN 978-9283310358.
- 9.Rozen V.P., Pobihaylo, V.A. Current limiter as one of the ways of efficient energy use // *Bulletin of the National university "Lviv Polytechnic". Electric power and electromechanical systems*[in Ukrainian]
10. Rozen, V.P., Taraday, V.I., Nesen, L.I., Pobihaylo V.A. Analysis of approaches to solving the problem of limiting short-circuit currents in production and power systems / *Abstract in the bulletin of VINITI RAN - All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences*[in Ukrainian]
11. Rozen, V.P., Solovey, O.I., Momot, D.E., Pobihaylo, V.A. Mathematical model of current limiting devices according to the scheme "reactor - fuse" // *Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Mining series*[in Ukrainian]
12. El-Kady, M.A. Probabilistic short-circuit analysis by Monte Carlo simulations // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1998. No. 5. p. 1308-1316.
13. Patent Ukrainy № 2002021620 vid 15.11.2002 r. Sposib obmezheniya strumiv KZ i prystriy dlya yoho realizatsiyi [Patent of Ukraine No. 2002021620 of 15.11.2002 Method for limiting short circuit currents and the device for the method implementation] V.P. Rozen, V.P. Kalynchyk, D.E. Momot, V.A. Pobihaylo [in Ukrainian]

Надійшла 21.08.2020  
Received 21.08.2020



В.С. Колісник, магістр, ORCID 0000-0002-2418-7450  
В.В. Кучанський, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-8648-7942  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ПРОБЛЕМИ НАДІЙНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ (АСОЕ)

*Матеріали статті представляють собою огляд сучасних технологій автоматичних обліків електричної енергії в об'єднаній енергосистемі України. В статті розглянуто структуру локального рівня обліку електричної енергії НЕК «УКРЕНЕРГО» - найважливішу і найбільш численну компоненту АСОЕ, від роботи якої багато в чому залежить надійність функціонування всієї системи в цілому. На всіх ПС НЕК «Укренаерго» АСОЕ локального рівня побудовані за єдиною типовою схемою. Наведено основні апарати, що застосовуються для реалізації обліку електричної енергії. Наведені короткі відомості про встановлені на серверах операційні системи (ОС) і застосовувані системи управління базами даних (СУБД). Використання в структурі АСОЕ локального рівня сервера обумовлено тим, що на момент виконання робіт по створенню АСОЕ і по теперішній час мережа передачі даних від ПС до АСОЕ регіонального рівня не в повній мірі відповідає вимогам по швидкості передачі даних і надійності. Проаналізовано, що крім обсягів споживання АСОЕ виконує функцію контролю показників якості електричної енергії та вплив якості на втрати потужності. Проаналізовано точність наявних лічильників, та вплив точності вимірів на економічний ефект, що отримується від впровадження технології. Освітлено алгоритм роботи кластерної системи. Проведено огляд основних проблем впровадження каналів зв'язку, вибору апаратів, модернізації вже існуючих систем. Показано переваги та недоліки які дають системи обліку на основі технології "Fault tolerant". Також стаття охоплює різні типи систем збору даних (СЗД), як сучасні, так і застарілі, які застосовуються на сьогоднішній день в об'єднаній енергосистемі України та які планують впроваджувати в майбутньому. Результати дослідження показали, що модернізація та підвищення надійності нових систем автоматичного обліку електричної енергії є важливим для ОЕС України. Також показано ряд дій для покращення надійності та безвідмовної роботи для АСОЕ в цілому.*

**Ключові слова:** автоматизована система обліку електричної енергії, автоматизована система комерційного обліку електричної енергії, надійність, канал зв'язку, інформаційний протокол, обмін даними, модернізація, точність, економічні показники.

### Вступ

Сьогодні в Україні діє потужний високорозвинений електроенергетичний комплекс з повним технологічним циклом, основою якого є Об'єднана енергетична система (ОЕС) України.

Найважливішим ланкою системи виробництва і передачі електричної енергії є державне підприємство Національна енергетична компанія «Укренаерго», яка за допомогою магістральних електричних мереж і підстанцій напругою 220 – 750 кВ об'єднує енергогенеруючі та енергопостачальні компанії, взаємодіє з міждержавними лініями електропередачі з енергосистемами сусідніх країн, забезпечуючи паралельну роботу суміжних енергосистем, а також експорт і імпорт електроенергії. ОЕС України працює паралельно з енергосистемами Росії, Білорусі та Молдови. Енергоблоки «Бурштинського острова» працюють паралельно з Європейською енергосистемою (ENTSO-E) – з Польщею, Словаччиною, Угорщиною та Румунією.

До складу НЕК «Укренаерго» входять вісім електроенергетичних систем (ЕЕС), три окремі структурні одиниці – «Головний інформаційно обчислювальний центр», підприємства «Вінницяелектротехнологія» і «Юженергопром», а також окремий підрозділ «Науково-технічний центр електроенергетики». На балансі НЕК «Укренаерго» знаходяться 22,93 тис. км магістральних і міждержавних ЛЕП напругою 35 - 800 кВ і 133 підстанції (ПС) напругою 220 - 750 кВ. Встановлена потужність автотрансформаторів і силових трансформаторів на ПС НЕК «Укренаерго» складає 78198 МВА.

Масове впровадження АСКОЕ та АСОЕ почалось на основі розроблених і затверджених в різних інстанціях (ОРЕ, НКРЕ, Держспоживстандарт, НЕК «Укренаерго») директивних документів. Основна ціль створеної документації – це реалізація впорядкованої і регламентованої побудови АСКОЕ та АСОЕ [1,2,3]. АСОЕ НЕК «Укренаерго» знаходиться в промисловій експлуатації з серпня 2009 р. Основні роботи з його створення було закінчено в 2008 р. Частина АСОЕ локального рівня була введена в роботу в кінці 2005 р. Роботи з технічного обслуговування виконуються за договорами з розробниками АСОЕ локальних і регіональних рівнів.

© В.С. Колісник, В.В. Кучанський, 2020

У складі системи обліку електричної енергії, за допомогою якої визначається відпуск електроенергії енергопостачальним компаніям, а також ведеться облік міждержавних перетікань електроенергії, сьогодні експлуатуються понад 7400 трансформаторів струму і 3030 трансформаторів напруги 6 – 750 кВ. На 4189 точках обліку (ТО) встановлені 5220 приладів обліку електроенергії класу точності 1.0, 0,5S і 0,2S, в тому числі:

- 1574 точки комерційного обліку, на яких встановлені тисячу дев'яност сорок шість приладів обліку;
- 2615 точок технічного обліку, на яких встановлені 3274 приладу обліку.

Базовим приладом обліку в «НЕК» Укренерго» є лічильник SL7000 виробництва компанії Actaris. Всього встановлено 4509 таких приладів (86% від загальної кількості). Крім цього, використовуються прилади обліку компаній Landis+Gyr (ZMB і ZMD), ABB VEI Metronica (EuroAlpha), «Елвін» і «Телекарт».

Досвід експлуатації приладів обліку компанії «Телекарт» («Енергія-9») в складі АСКОВ НЕК «Укренерго» виявив ряд недоліків в частині протоколу обміну даними. Тому планується в подальшому не використовувати даний тип приладів обліку в точках комерційного обліку як розрахункові.

Сьогодні НЕК «Укренерго» має розрахункові точки обліку електроенергії з 53 суб'єктами Оптового ринку електричної енергії (ОРЕ) України та 7 системними операторами суміжних держав, в тому числі з 40 енергопостачальними компаніями, включаючи облenergo, залізні дороги і інших постачальників електроенергії, а також з 13 енергогенеруючими компаніями, в т.ч. 8 тепловими (14 ТЕС і 4 ТЕС); НАЕК «Енергоатом» (4 АЕС); ПАТ «Укргідроенерго» (5 ГЕС і 1 ГАЕС) і 3 СЕС.

#### **Мета та завдання дослідження**

Виявити, в яких ланках АСОВ існує проблема надійності при експлуатації та показати сучасні, дієві методи для підвищення надійності роботи АСОВ.

#### **Матеріал та результати дослідження**

Досвід експлуатації системи показав, що найбільшу кількість відмов у роботі фіксується в обладнанні АСОВ локального рівня і каналах зв'язку між ЕС та ПС. Це пов'язано з наступними причинами:

- відсутність резервного обладнання (за винятком лічильників електроенергії) в складі АСОВ;
- вплив електромагнітних полів на високовольтних ПС;
- наявність перенапруги в електромережі при виконанні комутацій і коротких замикань на ПЛ;
- підвищений температурний режим роботи обладнання в літній період (на деяких ПС обладнання працює в гранично допустимому температурному режимі);

• значна «віддаленість» ПС від кваліфікованого персоналу, який може виконати ремонт або усунути несправність. Нерідко персонал на ПС не володіє потрібною кваліфікацією і не може самостійно виконувати ремонт, а виклик персоналу, який виконує ТО за договором, і його приїзд на ПС займають досить багато часу;

• практично відсутні резервні канали зв'язку, а при їх наявності, як правило, основний і резервний канали розташовані в одній комунікаційній магистралі. Тобто якщо відмовляє обладнання основного каналу зв'язку, то, як правило, не працює і резервний канал.

На рис. 1 наведені компоненти АСОВ локального рівня по абсолютній кількості відмов. Як видно з рис. 1, найбільшу кількість відмов фіксується по обладнанню мультипортових серверів (NPort). В АСОВ локального рівня застосовуються пристрої NPort двох виробників: фірми «Муха» і НПФ «Крон Лтд». Головною причиною виходу з ладу NPort є несправності в блоці живлення. Швидше за все, це пов'язано з їх конструктивним виконанням (імпульсна схема блоку живлення), а також умовами роботи – електромагнітними полями, перенапруженням в електромережі і важким температурним режимом роботи в літній час. Відмова NPort є досить серйозною проблемою, так як втрачається зв'язок з усіма лічильниками, які до нього підключені. В даний час заміна NPort на ПС вимагає мінімального часу (не більше 30 хв), не рахуючи часу на проїзд до ПС і допуску до роботи персоналу, і не вимагає високої кваліфікації. Всі основні налаштування NPort виконуються дистанційно з АСКОВ регіонального рівня.

Друге місце за ступенем відмов займають сервери АСОВ локального рівня. Ремонт і заміна серверів – досить трудомісткий і дорогий процес, який займає тривалий час і вимагає наявності висококваліфікованого персоналу. Як правило, до заміни або ремонту серверів залучається персонал розробника АСОВ. Дуже рідко спостерігаються відмови в роботі комунікаційного обладнання локальної мережі ПС.

Окремо слід зупинитися на відмовах приладів обліку. Як правило, самі прилади виходять з ладу вкрай рідко і досить надійні в роботі. В даному випадку мова йде про відмови в роботі комунікаційних портів. Відповідно до типової схеми побудови допускається підключати до одного порту мультипортових сервера не більше чотирьох приладів обліку. При такій побудові відзначені випадки, коли при виході з ладу комунікаційного порту блокувалось опитування всього ланцюга, тобто не виконувалось опитування всіх 4 приладів обліку. Тому сьогодні прийнято рішення про підключення лічильників по одному на порт.

Також відзначим, що в міру збільшення часу роботи обладнання спостерігається незначне підвищення кількості відмов у порівнянні з початковим періодом його роботи.

Для зниження негативного впливу на працездатність АСКОЕ відмов обладнання і ПЗ сьогодні застосовується наступне технічне рішення. Для кожної точки обліку в АСОЕ може бути визначено декілька джерел інформації. Наприклад:

- основний (розрахунковий) прилад обліку;
- дублюючий прилад обліку;
- дані ОВК;
- ручний ввід;
- прилад обліку на протилежному кінці ПЛ;
- дані резервної системи збору даних;
- заповнення даних по характерному профілю навантаження.

Кожному з джерел інформації, який заданий для даної точки обліку, присвоюється свій пріоритет. Таким чином, при виконанні розрахунків автоматично будуть використовуватися дані, що мають найвищий пріоритет (як правило, дані розрахункового приладу обліку). Якщо в АСОЕ з якоїсь причини відсутні дані розрахункового приладу обліку, автоматично беруться дані дублюючого і так далі по всьому ланцюжку відповідно до заданого пріоритетом. При цьому формується мітка достовірності даних, яка вказує оператору, які дані були використані в розрахунках. Такий підхід дозволяє з певним ступенем достовірності відновити дані при збоях в роботі АСОЕ і виконати необхідні розрахунки.

Розглянемо детальніше структуру організації АСОЕ локального рівня - найважливішу і найбільш численну компоненту АСОЕ, від роботи якої багато в чому залежить надійність функціонування всієї системи в цілому. На всіх ПС НЕК «Укренерго» АСОЕ локального рівня побудовані за єдиною типовою схемою. Відмінною особливістю даної схеми є включення приладів обліку в локальну мережу ПС через мультипортні сервери (Nport-сервери), які серійно випускаються рядом фірм. Таке підключення приладів обліку забезпечує доступ до них з будь-якої точки корпоративної мережі передачі даних. Ще однією позитивною особливістю такого схемного рішення є відсутність прив'язки до конкретного розробника АСОЕ тому схема в цілому є «прозорою» для програмного забезпечення (ПЗ). На один порт сервера допускається підключення до 4 приладів обліку за схемами «спільна шина», «петля струму» тощо. Дані опитування приладів обліку надходять на сервер АСОЕ ПС, на якому проводяться розрахунки, розраховуються баланси, формуються звітні форми. На кожній ПС є автоматизовані робочі місця (АРМ) чергового, за допомогою яких здійснюється експлуатація та обслуговування АСОЕ локального рівня. Короткі відомості про встановлені на серверах операційних системах (ОС) і застосовуваних системах управління базами даних (СУБД) наведені в табл. 1. Збір даних з приладів обліку виконується в основному з використанням міжнародних протоколів DLMS / COSEM (SL7000, ZMD).

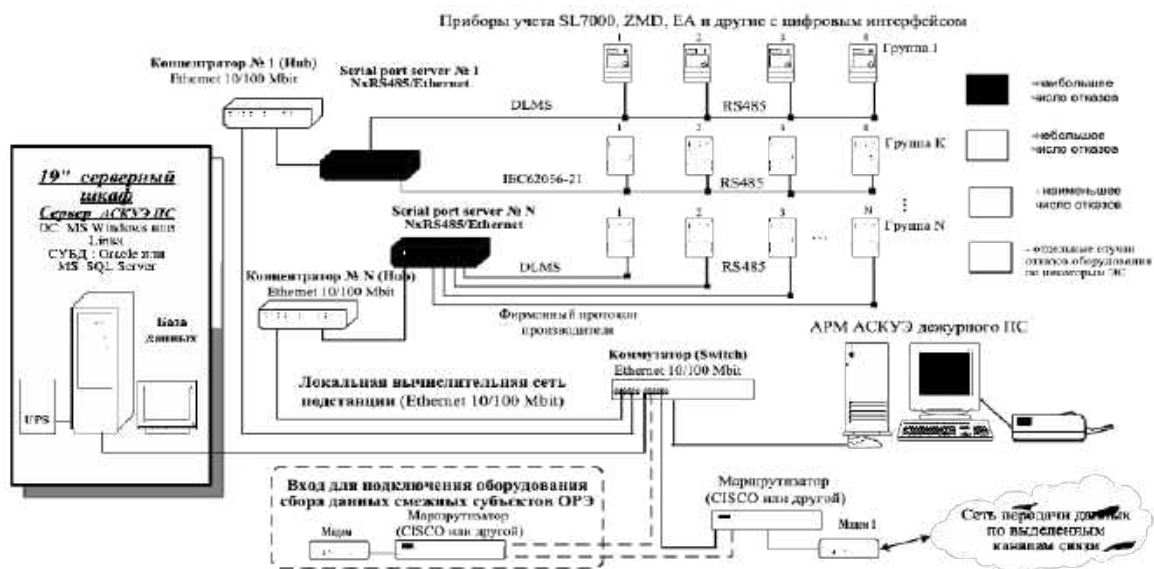


Рисунок 1 – АСОЕ локального рівня побудовані за єдиною типовою схемою

Використання в структурі АСОЕ локального рівня сервера обумовлено тим, що на момент виконання робіт по створенню АСОЕ і по теперішній час мережа передачі даних від ПС до АСКОЕ регіонального рівня не в повній мірі відповідає вимогам по швидкості передачі даних і надійності. Практично більша частина ПС не має резервного каналу зв'язку. Окремі канали зв'язку організовані за допомогою ВЧ-зв'язку по високовольтним ЛЕП. Тому основне завдання сервера - максимально швидко зібрати дані з приладів обліку і забезпечити їх надійну передачу в сервер АСОЕ регіонального рівня.

Основною характеристикою апаратно програмних комплексів центрів управління (ЦУ) АСОЕ є надійність або можливість забезпечення безвідмовної роботи системи в режимі цілодобової безперервної експлуатації. Звичайно, прийнято оцінювати надійність системи за тим, скільки часу в році вона працює. Якщо система працює 90% часу, то її надійність дорівнює одній дев'ятці. Якщо привести ці "дев'ятки" до звичайного часу простою в рік, вийде табл. 2.

Основною складовою апаратно-програмної платформи ЦУ АСОЕ є серверне обладнання. Основне завдання сервера – це безперервний збір даних, зберігання їх на зовнішню відмовостійку систему, проведення обчислень і надання доступу до інформації взаємодії підсистем і користувачам.

Таблиця 1 - Короткі відомості про встановлені на серверах ОС і застосовуваних СУБД

Підрозділ (ЕЕС)	застосовувана ОС	СУБД
Дніпровська	Windows 2003 Server	Файлова система
Донбаська	Linux	Oracle
Західна	Windows 2003 Server	Oracle
Кримська	Windows 2003 Server	Oracle
Південна	Windows 2003 Server	Oracle
Південно-Західна	Windows 2003 Server	Microsoft SQL server
Північна	Windows 2003 Server	Oracle
Центральна	Windows 2003 Server	MS SQL

Таблиця 2 – Час простою в рік

№ п/п	Доступність в 9-ках	Час простою в рік
1	90. 0000%	37 днів
2	99. 0000%	3.7 днів
3	99. 9000%	8.8 годин
4	99. 9900%	53 хвилин
5	99. 9990%	5.3 хвилин
6	99. 9999%	32 секунд

Надійність серверних систем забезпечується кластерної архітектурою або найбільш сучасною технологією "Fault tolerant".

Кластер (cluster) – це об'єднання між собою двох і більше серверів в єдину систему, що функціонують як єдине ціле. Кластери створюються для досягнення високої надійності зберігання даних, забезпечення високої доступності інформаційного сервісу, розподілу навантаження на сервіси. У кластерної системи дві частини - програмна (операційна система, кластерне програмне забезпечення) і апаратна. Комп'ютери та сегменти мережі, які представляють кластер, збираються як із застосуванням спеціальних "кластерних" апаратних компонентів, так і без них. З точки зору користувачів кластер виглядає як один сервер[4].

Кластери застосовуються для вирішення найрізноманітніших завдань. Надійність і високу готовність даних забезпечує High-Availability Cluster system (HA- Cluster). Там, де необхідно забезпечити масштабованість сервісів, наприклад, в разі наявності безлічі обслуговуючих веб-сайт серверів, застосовується Massive Parallel Processing Cluster (MPP-Clusters). Для забезпечення високої продуктивності обчислень використовується High Performance Computing Clusters (HPC-Clusters). Для забезпечення високої доступності інформаційного сервісу та / або для розподілу навантаження на сервіси використовується механізм Load Balancing.

З точки зору на надійність АСОЕ цікавлять відмовостійкі failover-кластери. Останні широко застосовуються в комерційних системах, які забезпечують доступність критично важливих бізнес-додатків і даних. Мають підвищений попит з боку банків, великих виробничих, торгових і страхових компаній. До складу типових конфігурацій входять два і більше вузлів, які мають доступ до зовнішнього дискового масиву по інтерфейсу SAS, SCSI, iSCSI, FC. Відмовостійкі кластери працюють під управлінням операційних систем типу Windows, UNIX, Linux.

Типова схема кластерної системи являє собою відмовостійкий пристрій з виділеним зовнішнім дисковим масивом, який відноситься до класу консолідованих рішень для роботи з великими обсягами комерційних даних. Основна область застосування - операційне обслуговування баз даних великих і середніх підприємств. Відмовостійка схема кластера гарантує надійність проведення транзакцій. Використання зовнішнього SCSI-SCSI дискового сховища забезпечує високу доступність даних, мінімізує ризики простою системи і втрату даних.

Алгоритм роботи кластерної системи заснований на тому, що при виході з ладу одного сервера, другий – приймає на себе його функції. Час відновлення працездатності такої системи – хвилини. Для функціонування кластерної системи необхідно купувати ліцензійне кластерне програмне забезпечення на кожен з серверів кластера, а також створювати спеціальне прикладне програмне забезпечення.

Наступна відмовостійка система будується на основі технології "Fault tolerant" (ft-відмовостійкість). Стійкість системи управління, побудованої на таких способах з'єднання, визначається вбудованими можливостями відновлення в разі відмов (нечутливість до апаратних збоїв), помилок (обробка їх без переривання функціонування системи) або зміни режиму функціонування. Відмовостійкість - характеристика, властива даному класу систем, яка забезпечує безперервний доступ до даних, на відміну від систем класу high-availability (з майже безперервним доступом до даних)[5,6].

У виготовленому з поступовим зниженням технології ft-сервері, також дві частини – програмна (операційна система, адаптовані драйвери, спеціалізоване програмне забезпечення) і апаратна.

Відмовостійкість в ft-серверах досягається, в першу чергу, технічними рішеннями: дублюванням основних вузлів системного блоку; введенням гарячого резервування; можливістю заміни блоків під час роботи тощо.

Всі основні компоненти ft-сервера – це індустріальні вироби. У них розміщуються процесори, пам'ять, диски і блоки живлення. Суть ft-технології полягає в тому, щоб продублювати всі апаратні компоненти, зробивши це зовсім непомітно для програмного забезпечення. Дублювання компонент фактично усуває можливості збоїв в будь-якій точці системи і захищає цілісність інформації. Здвоєні процесори і модулі пам'яті працюють паралельно, синхронно виконуючи ті самі інструкції, не знижуючи швидкодії системи.

У разі відмови того чи іншого компонента обробка даних не переривається, втрат або зниження продуктивності не відбувається. Несправний компонент може бути замінений як користувачем, так і представником обслуговуючої компанії, не вимикаючи сервера. У гарячому режимі допускається заміна не тільки модулів пам'яті і процесорів, але і інших дубльованих базових компонентів (таких як окремі плати, жорсткі диски, вентилятори та блоки живлення).

До кластерним або ft-серверів підключається зовнішня відмовостійка система зберігання даних (СЗД). СЗД призначена для централізованого надійного зберігання, управління і надання даних. СЗД є ключовим елементом центру збереження і обробки даних, з яким тісно взаємодіють обчислювальні потужності, зайняті обробкою інформації. Структура СЗД є технологічним фундаментом, навколо якого будуються обчислювальні системи ЦУ.

СЗД заснована на зовнішніх виділених дискових масивах, які відводяться під сховище даних. СЗД мають високу стійкість до відмов за рахунок архітектурної реалізації, яка передбачає гарячу заміну більшості електронних блоків.

Кількість споживачів електричної енергії в Україні на основі комірків з трансформаторами сягає 4 мільйонів, чверть яких може бути переведена на облік за допомогою засобів обліку прямого підключення до мережі з широким динамічним діапазоном за струмом і порогом чутливості на рівні 15 мА [7]. Таким чином, можна стверджувати, що втрати електричної енергії через недосконалість засобів метрологічного забезпечення сягає 11.8 млрд кВт годин.

Щоб уникнути використання трансформаторних комірків обліку, необхідно створити електролічильники з динамічним діапазоном за струмом від 12.5 мА до 200, 300, 400, 500, 600, 750 і 1000 А [8]. В такому разі отримаємо структурну схему, зображену на рис. 2.

В Україні уже зроблено перший крок у цьому напрямку. Встановлюють широкодіапазонний електролічильник типу ET, розрахованого на максимальний струм 200 А. Цей засіб обліку користується чималим попитом багатьох енергопостачальних компаній, які на ділі впроваджують енергозберігаючі технології. З вирішенням конструктивних проблем та розвитком структурних методів, направлених на розширення робочого діапазону за струмом з'являться прилади обліку на інші максимальні струми, зазначені вище.

Крім обсягів споживання велика увага останнім часом приділяється контролю показників якості електричної енергії, вплив яких на економіку держави був доведений академіком Л. А. Мелентевим. За його дослідженнями втрати електричної енергії через її низьку якість сягають 10% від її загального виробництва.

За допомогою інформації вимірювальних приладів відбувається управління режимами роботи електричних мереж, оцінка ефективності установок, які нормують ПЯЕ, управління ними, контроль за рівнем якості ЕЕ та знаходження джерел її погіршення. Тому були створені багатофункціональні засоби

обліку типу ZET з одночасним аналізом якості класу точності 0.2 [9]. На його основі створено багаторівневу автоматизовану систему обліку електроенергії з одночасним контролем ПЯЕ.

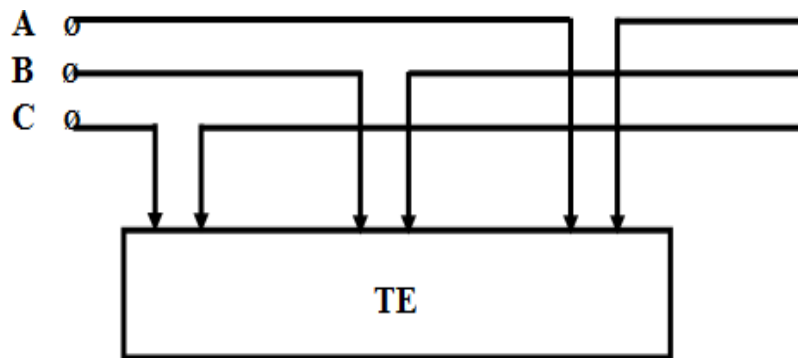


Рисунок 2 – Структурна схема комірки обліку на основі лічильників безпосереднього включення

Система охоплює всі підстанції НЕК „Укренерго”. На 2015 рік ця система дозволила отримати економічний ефект, який перевищує 1 млрд грн. [10].

#### **Висновки**

Підводячи підсумки, можна зробити висновок, що для забезпечення надійної роботи АСКОЕ необхідно:

- регулярне виконання технічного обслуговування обладнання та програмного забезпечення;
- наявність основного і резервного каналів зв'язку, які фізично проходять в різних комунікаційних магістралях;
- наявність резервних основних компонентів АСКОЕ, що знаходяться в гарячому резерві;
- створення оптимального температурного режиму роботи обладнання, а також захист його від магнітних полів і перенапруги в електромережі;
- своєчасна заміна обладнання АСКОЕ, яке відпрацювало свій нормативний термін;
- наявність мінімально необхідного комплексу запасного обладнання і запасних частин до нього.

Рівень розробок засобів вимірювання в електроенергетиці відповідає світовим досягненням, їх метрологічні характеристики безпосередньо впливають на стан енергозбереження і існує перспектива подальшого розвитку. Розробка метрологічного забезпечення засобів комерційного обліку і якості електричної енергії дозволяє визначити метрологічні характеристики як аналізаторів, так і лічильників електричної енергії.

При впровадженні на ОЕС України нових протоколів обміну і системи ідентифікації ринкових точок комерційного обліку виникає необхідність модернізації АСКОЕ.

#### **Список використаної літератури**

1. Концепция построения автоматизированных систем учета электроэнергии в условиях энергорынка Украины №32/28/28/276/75/54 от 17.04.2000 г.
2. Приложение 7(4).III. Стандарт ОРЭ «Автоматизированные системы коммерческого учета электрической энергии субъектов ОРЭ. Общие требования. - Киев, 2006.
3. Инструкция о порядке коммерческого учета электрической энергии. Постановление НКРЭ от 26.06.2003 г. № 612
4. The Scalable Enterprise Server. [www.nec-computers.com](http://www.nec-computers.com).
5. В. А. Федоров. Постреляционная СУБД Cache. InterSystems Corp., [www.intersystems.com](http://www.intersystems.com).
6. Александр Чеснавский. СУБД Cache – взаимодействие с внешним миром. InterSystems Corporation, [alexander@intersystems.ru](mailto:alexander@intersystems.ru).
7. МЭК 1036. Международная электротехническая комиссия. Статические счетчики активной энергии. Метрологические спецификации для классов 1,0 и 2,0.
8. ГОСТ 30207-94. Межгосударственный стандарт. Статические счетчики Ватт-часов активной энергии переменного тока. (Классы точности 1 и 2).
9. Праховник А.В., Тесик Ю.Ф., Жаркін А.Ф., Новський В.О., Гриб О.Г., Калінчик В.П., Карасінський О.Л., Довгалюк О.М., Лазуренко О.П., Ходаківський А.М., Васильченко В.І., Светелік О.Д. Автоматизовані системи обліку та якості електричної енергії. – Харків: ПП «Ранок-НТ», 2012. – 516.
10. Тесик Ю.Ф., Пронзалева С.Ю. Вплив метрологічного забезпечення на ефективність використання електроенергії – Київ «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки» №10, 2015, – 579.

V. Kolisnyk, Msc., ORCID 0000-0002-2418-7450  
V. Kuchansky, Cand. Sc. (Eng.) ORCID 0000-0002-8648-7942  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute »

## RELIABILITY PROBLEMS OF AUTOMATED SYSTEM OF ELECTRICITY METERING (ASEM)

*The materials of the article are an overview of modern technologies of automatic electricity metering in the unified power system of Ukraine. The article considers the structure of the local level of electricity metering of NEC UKRENERGO - the most important and most numerous components of ASEM, the operation of which largely depends on the reliability of the system as a whole. At all Ukrenergo substations, local-level ASEM are built according to a single standard scheme. The main devices used for the implementation of electricity metering are presented. Brief information on operating systems (OS) installed on servers and applied database management systems (DBMS) is given. The use of the local layer of the server in the structure of ASEM is due to the fact that at the time of work on the creation of ASEM and currently the data network from the aircraft to ASEM regional level does not fully meet the requirements for data rate and reliability. It is analyzed that in addition to the consumption of ASEM performs the function of controlling the quality of electricity and the impact of quality on power losses. The accuracy of available meters and the impact of measurement accuracy on the economic effect obtained from the introduction of technology are analyzed. The algorithm of the cluster system operation is highlighted. An overview of the main problems of implementation of communication channels, selection of devices, modernization of existing systems. The advantages and disadvantages of accounting systems based on "Fault tolerant" technology are shown. The article also covers various types of data collection systems (DCS), both modern and outdated, which are currently used in the unified energy system of Ukraine and which are planned to be implemented in the future.*

*The results of the study showed that the modernization and increase of reliability of new systems of automatic electricity metering is important for the UES of Ukraine. It also shows a number of actions to improve reliability and uptime for ASEM as a whole.*

**Keywords:** automated system of electricity metering, automated system of commercial electricity metering, reliability, communication channel, information protocol, data exchange, modernization, accuracy, economic indicators.

### REFERENCES

1. The concept of construction of automated electricity metering systems in the energy market of Ukraine №32 / 28/28/276/75/54 dated 17.04.2000
2. Annex 7 (4) .III. WEM standard "Automated systems of commercial electricity metering of WEM entities. General requirements. - Kiev, 2006.
3. Instruction on the procedure for commercial accounting of electricity. NERC Resolution of June 26, 2003 № 612
4. The Scaleble Enterprise Server. [www.nec-computers.com](http://www.nec-computers.com).
5. V.A. Fedorov. Postrelation DBMS Cache. InterSystems Corp., [www.intersystems.com](http://www.intersystems.com).
6. Alexander Chesnavsky. DBMS Cache - interaction with the outside world. InterSystems Corporation, [alexander@intersystems.ru](mailto:alexander@intersystems.ru).
7. IEC 1036. International Electrotechnical Commission. Static active energy meters. Metrological specifications for classes 1.0 and 2.0.
8. GOST 30207-94. Interstate standard. Static meters of active energy of watt-hours of alternating current. (Accuracy classes 1 and 2).
9. Prakhovnyk A.V., Tesyk Y.F., Zharkin A.F., Novsky V.O., Hryb O.G., Kalinchyk V.P., Karasinsky O.L., Dovgalyuk O.M., Lazurenko O.P., Khodakivsky A.M., Vasilchenko V.I., Svetelik O.D. Automated systems of accounting and quality of electric energy. - Kharkiv: PE "Ranok-NT", 2012. - 516.
10. Tesik Y.F., Pronzeleva S.Y. The impact of metrological support on the efficiency of electricity use - Kyiv "Gyrotechnologies, navigation, traffic control and design of aerospace technology" №10, 2015, - 579.

Надійшла 31.08.2020  
Received 31.08.2020

### ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для подання рукопису до журналу автори повинні дотримуватись всіх встановлених вимог, які вказані нижче.

**У разі невідповідності поданих матеріалів статті пунктам цих вимог, а також якщо вони не відповідають тематиці наукового журналу, редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання!**

#### Обсяг статті

Загальний обсяг статті – від 6 до 10 сторінок формату А4. Сторінки повністю заповнені текстом. Схеми, рисунки, таблиці й формули повинні бути пронумеровані та розміщені в тексті після посилань на них. Матеріал має бути викладений стисло, без повторювань даних таблиць і рисунків у тексті. Неприпустимо використовувати елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонтитули.

**Стаття має бути ретельно перевірена авторами та відповідати всім пунктам вимог до оформлення!!!!**

#### Текстовий редактор

Стаття набирається в текстовому редакторі Microsoft Word (версії 2007 та вище) і зберігається з розширенням \*.doc або \*.docx.

**Обов'язково** надсилається стаття, збережена у форматі \*.pdf !!!

#### **Загальне оформлення:**

**1) Мова.** Статті приймаються до друку трьома мовами: українською, російською, англійською.

#### **2) Параметри сторінки:**

- Поля: зліва, справа, зверху, знизу – **2,5 см.**
- Вирівнювання основного тексту – **за шириною.**
- Перші рядки всіх абзаців – **з відступом 1,0 см!!!**
- Шрифт – **Times New Roman, кегль 10, міжрядковий інтервал 1.**
- Назва статті друкується великими (Caps Lock) напівжирними літерами (Ж) – **кегль 14.**
- Заголовки елементів основного тексту (Вступ, Мета та завдання тощо) виділяються напівжирним шрифтом (Ж).

#### **3) Структура статті:**

- **номер УДК** (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом кегль 10)
- **прізвища авторів** (приклад: **І.І. Петренко** (укр.), **И.И. Петренко** (рос.) **I. Petrenko** (англ)) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання); **індекс ORCID – обов'язково;**
- **(Порядок оформлення наукових ступенів та вчених звань описано нижче в цьому ж документі в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і наукових ступенів»).**
- **повна назва організації** (навчального закладу, установи) – **вирівнювання за правим краєм;**
- **реферат обсягом від 1000 до 1100 знаків** повинен відображати короткий зміст статті, не повторювати назву, не містити загальних фраз та бути структурованим (мета дослідження, методика реалізації, результати дослідження, висновки). В англійській версії статті наводиться 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 виправлятися не буде!



**Таблиці.** При заповненні слід користуватись шрифтом 10 кеглю. Кожна таблиця повинна мати порядковий номер та назву і розташовуватись після посилання на неї у тексті статті. Якщо таблиця не вміщується на сторінці або виходить на іншу, слід використати позначення «Продовження табл.».

**Формули повинні бути набрані** за допомогою редактора формул **Math Type (версія 6.8 і вище)** або внутрішній редактор формул у Microsoft Word з **розмірами: звичайного символу – 11, великого індексу – 10, малого індексу – 9.** Кириличні та грецькі символи мають бути набрані прямим шрифтом, латинські літери – похилим. Виняток становлять символи операторів і стандартних функцій, які набираються прямим шрифтом. Нумерація формул, на які є посилання в тексті, – справа в дужках. Цілі частини від десяткових відокремлюються комою **Одиниці розмірності можна набирати окремо від формул, або у формулах, з обов'язковим використанням проміжку.**

**Висновки:** (навести основні висновки з дослідження та перспективи його подальшого розвитку в цьому напрямку).

**Список використаної літератури** наводиться в порядку посилань у тексті, відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках.

Список використаних **літературних джерел подається двічі:** мовою оригіналу відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр, рос) і англійською, відповідно до вимог IEEE style

**У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!**

Для надання відомостей про авторів англійською, або російською мовами, слід використовувати загальноприйнятую лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

**Англійська анотація за обсягом рекомендується більшою за українську (російську) 1700-2000 знаків,** оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

**У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!**

**В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:**

(Анкети подаються **3 мовами (укр., англ. та рос.)**. Вказується повна назва організації або установки, вказати місце де працює автор. Якщо всі автори статті працюють або навчаються в одній установі, можна не вказувати місце роботи кожного автора окремо.)

<b>Прізвище, ім'я, по-батькові автора</b> (повністю, без скорочень)	
<b>Вчений ступінь, вчене звання, посада</b>	
<b>Місце роботи кожного автора в називному відмінку</b> (повна назва без скорочень)	
<b>Поштова адреса місця роботи, з поштовим індексом</b>	
<b>Контактний телефон</b>	
<b>Електронна адреса</b>	
<b>ORCID</b>	

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)