

ISSN 1813-5420

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

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№2–2021

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

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія

Науковий журнал

№ 2 (64) - 2021

Виходить 4 рази на рік
Заснований у березні 2000 року

Енергетична ефективність та енергозбереження
Енергетичні системи та комплекси
Енергетика сталого розвитку
Економічні аспекти енергетики
Технології та обладнання в енергетиці

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Головний редактор – Ю.І. Якименко

Заступники

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

Відповідальний секретар – О.О. Закладний

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

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ

РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ: Е. Хандшин (*Дортмундський технічний університет, інститут енергетичних систем та економіки енергетики, Німеччина*), Ричард 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 АН Молдови*), О.В. Кузнецов (*Університет прикладних наук, Німеччина*), Карлос Ф. Пфайфер (*Університетський коледж Південно-Східної Норвегії*), А. Башкіс (*Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва*), Опітс Йоахім (*Інститут енергетики м. Хамм, Німеччина*), В.М. Постолатій (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*), Рошан Шарма (*Університет Південно-Східної Норвегії*).

Технічний секретар Н.О. Кравчук.

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

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

Журнал внесено до Переліку фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук відповідно до наказу МОН України № 1188 від 24 вересня 2020 р. (категорія «Б»). Журнал включено до баз даних «Наукова періодика України» НБУВ, Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, Джерело, URAN, Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, 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 № 8 від 4 жовтня 2021 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Комп'ютерна верстка М.О. Коломійчук
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

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

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

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

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

POWER ENGINEERING

economics, technique, ecology

ENERHETYKA:
ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya

The Scientific Journal

№ 2 (64) – 2021

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Energy efficiency and energy saving
Energy systems and complexes
Energy of sustainable development
Economic aspects of energy
Energy technologies and equipment

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2021

Editor-in-chief Yu.I. Yakymenko

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

Deputy O.O. Zakladnyi

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

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

Technical secretary N.O. Kravchuk

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

Journal was registered Certificate of State Registration Printed Media series KB №22857-12775PIP 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, Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, 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 № 8 on October 4, 2021).

Proofreading V.G. Smoliar. Desktop publishing M.Kolomiichuk
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

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

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

© Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2021

ЗМІСТ

ДО 120-РІЧЧЯ КАФЕДРИ ТЕОРЕТИЧНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО

Л.Ю. Спінул, В.І. Чибеліс, В.Ю. Лободзинський, В.А. Святненко. Кафедра Теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського: роки, люди, долі 7

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

С.П. Денисюк, І.Ю. Бойко. Підвищення енергоефективності Microgrid з дизель-генераторами 19

В.І. Дешко, М.М. Шовкалюк, Н.С. Гончаров, Н.В. Політикін. Індивідуальний розподіл споживання теплової енергії у багатоквартирному будинку: практичний досвід. 33

Б.Н. Плєскач, В.Д. Самойлов, В.В.Прокопенко, О.О. Закладний. Прецедентно-аналітична модель тренажерної системи для енергоменеджерів..... 42

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

П.В. Шиманюк, В.О. Мірошник, І.В. Блінов, П.О. Черненко. Аспекти врахування температури повітря для підвищення точності короткострокового прогнозування вузлових навантажень. 50

ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

О.О. Вовк, І.О. Рабош, Р.Ф. Харченко, Е.В. Кукуяшний. Перспективи та виклики справедливої трансформації вугільних регіонів України..... 59

ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ЕНЕРГЕТИКИ

Г.Г.Панченко. Енергоекономічний аналіз секторів економіки 73

Д.Г. Деревянко, А.О. Колодяжна, Ю.Г. Ницун. Особливості визначення економічних показників доцільності впровадження заходів з підвищення енергетичної ефективності. 87

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

Б.І. Басок, М.П. Новіцька, О.М. Недбайло, М.В. Ткаченко, І.К. Божко. Прогнозування теплового стану повітряно-грунтового теплообмінника із застосуванням штучної нейронної мережі..... 95

М.О. Реуцький, М.А. Коваленко, О. Л. Тимошук. Вибір та розрахунок крокових двигунів для ЧПУ102

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ108

CONTENTS

TO THE 120TH ANNIVERSARY TO DEPARTMENT OF THEORETICAL ELECTRICAL ENGINEERING IGOR SIKORSKY KYIV POLITECHNIC INSTITUTE

L. Spinul, V. Chibelis, V. Lobodzinsky, V. Svyatnenko. Department of Theoretical Electrical Engineering KPI. Igor Sikorsky years, people, destiny.....7

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

S. Denysiuk, I. Boiko. Increasing microgrid energy efficiency with diesel generators.....19

V. Deshko, M. Shovkaliuk, N. Honcharov, N. Politykina. Individual distribution of thermal energy consumption in an apartment building: practical experience..... 33

B. Pleskach, V. Samoilo, V. Prokopenko, O. Zakladnyi. Precedent-analytical model of exercise system for energy managers.....42

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

P. Shymaniuk, V. Miroshnyk, I. Blinov, P. Chernenko. Aspects of temperature taking into account to increase the accuracy of short – term forecasting of node loads.....50

ENERGY OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

O. Vovk, I. Rabosh, R. Kharchenko, E. Kukuyashnyy. Prospects and challenges of fair transformation of coal regions of Ukraine.....59

ECONOMIC ASPECTS OF ENERGY

G. Panchenko. Energy – economic analysis sectors of the economy of Ukraine.....73

D.Derevianko, A.Kolodiazna, Y. Nitsun. Peculiarities of determining the economic indicators of executibility of implementation of measures to increase energy efficiency.....87

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

B. Basok, M. Novitska, O. Nedbailo, M. Tkachenko, I. Bozhko. Thermal state of the air – ground heat exchanger prediction based on artificial neural network.....95

M. Reytskiy, M. Kovalenko, O. Tymoshchuk. Selection and calculation of stepper motors for CNC.....102

REQUIREMENTS FOR THE ARTICLES.....108

Л.Ю. Спінул, канд. техн. наук., доцент, ORCID 0000-0002-4234-6072

В.І. Чибеліс, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2235-9826

В.Ю. Лободзинський, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-1167-824X

В.А. Святненко, ст. викладач, ORCID 0000-0002-0518-1045

кафедра Теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського

КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО: РОКИ, ЛЮДИ, ДОЛІ

Пропонована читачеві стаття присвячена становленню і етапам розвитку однієї із старіших кафедр Київської політехніки – кафедрі теоретичної електротехніки. Наведено витяг із особового складу КПІ, який підтверджує дату заснування.

Історію кафедри представлено через її завідувачів та їх діяльність – від дня утворення до сьогодення. Наведено основні наукові напрямки діяльності кафедри, її досягнення. Для керівників і науково-педагогічного персоналу ВНЗ України, широкого кола читачів, хто небайдужий до історії освіти і науки в Україні.

Ключові слова – Київська політехніка, кафедра теоретичної електротехніки, історія розвитку електротехніки

Цього року святкує 120 років із дня створення одна з найстаріших кафедр Київської політехніки – кафедра Теоретичної електротехніки. Її історія і становлення нерозривно пов'язані з історією і становленням КПІ.

Згідно з «Положення про Київський політехнічний інституту імператора Олександра II» [1] для забезпечення викладання дисциплін було створено 35 кафедр, серед яких у 1901 році з'явилася кафедра електротехніки.

Для роботи в інституті було запрошено багатьох відомих вчених Києва, Москви, Петербурга, Казані, Харкова. За рекомендацією відомо російського вченого Миколи Єгоровича Жуковського до КПІ також було запрошено і Миколу Андрійовича Артем'єва, який у 1901 році став завідувачем кафедри електротехніки, а у 1902 році - створив та очолив електротехнічну лабораторію.



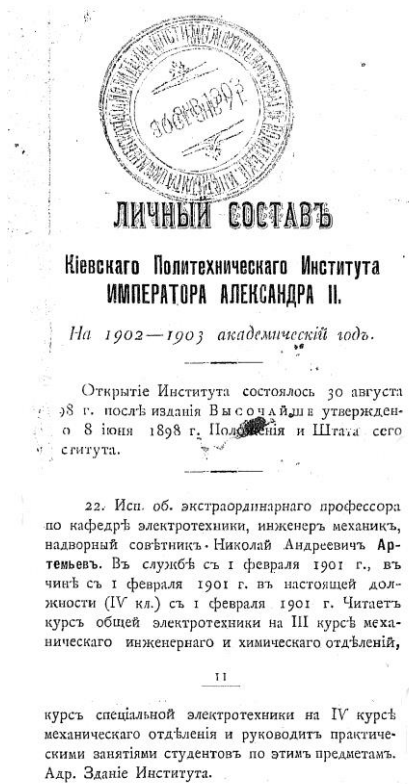
Рис. 1 Артем'єв
Микола Андрійович

1899 г. ноября 1. Письмо Н. Е. Жуковского директору КПИ с рекомендацией Н.А. Артемьева на должность преподавателя электротехники в КПИ [2]: «В лице Николая Андреевича Артемьева Политехнический институт императора Александра II сделает очень хорошее приобретение. Я помню Артемьева даровитым и отличающимся самостоятельным мыслем учеником Императорского технического училища. Мне пришлось, проезжая через Берлин, оказать ему содействие для поступления в Technische Hochschule (Высшая техническая школа), рекомендуя его профессору Лампе, который тогда был деканом. Артемьев пожелал учиться электротехнике на собственные малые средства, очень мало знал немецкий язык и со всеми этими затруднениями он справился блистательно. Через два года я видел его, сделавшимся вполне немцем. Профессор Слаби поручал ему делать ответственные вычисления и проекты на различные электротехнические сооружения, что доставляло Артемьеву хороший гонорар

Своим предметом он овладел вполне и по своему живому уму с большим увлечением рассказывал мне о своих занятиях и изобретениях в области электротехники. Хорошее место, которое он потом

получил в С.-Петербурге в электротехническом предприятии Сименс и Гальске, служит рекомендацією его практической деловитости.

Но вместе с этою деловитостью я считаю его хорошо образованным и вполне основательным электротехником. Скажу откровенно, что из наших молодых электротехников я ставлю Николая Андреевича Артемьева всех выше.»



Микола Андрійович Артем'єв народився у Москві 10 грудня 1870 г. Освіту здобував у Санкт-Петербурзькому імператорському технічному училищі. У 1895 г. з відзнакою закінчив Московське вище технічне училище (МВТУ) із званням інженера-механіка, а пізніше навчався у Шарлоттенбургському політехнікумі (м.Берлін).

Після повернення із-за кордону Артем'єв М.А. працював технічним директором Російського філіалу електротехнічного підприємства фірми «Сименс і Гальске». За його розрахунками було виготовлено нову серію трифазних асинхронних двигунів потужністю 1,5 і 3,5 кіньських сил. Ці двигуни були на 35% лігше від попередніх.

У 1900 році Артем'єва М.А. було обрано професором Київського політехнічного інституту, де протягом наступних 11 років тривала його наукова і педагогічна діяльність.

У 1902 році у КПІ було організовано електротехнічну лабораторію високої напруги 100 кВ [7]. На установці високої напруги з трансформатором новітньої на той час конструкції потужністю 20 кВт і напругою на вторинній обмотці 200 кВ Артем'євим М.А. було проведено випробування розробленого ім захисного костюму для роботи під високою напругою. Головна ідея винаходу полягала у застосуванні провідників для захисту від електричного струму, що створюють замкнену провідну поверхню, якою є такий костюм, і не дозволяють силовим лініям електричного поля проникати крізь неї. За допомогою такої конструкції висока напруга машин або пристосувань, з якими працювала людина, заземлювалась і з'являлась можливість працювати з устаткуванням без його відключення. Принцип, що було покладено в основу, застосовується до цього часу.

Вперше демонстрація захисного костюму відбулася на засіданні німецького електротехнічного товариства у Берліні. Цей костюм являв собою сітку виконану з латунної проволочки.

За проектами Артем'єва М.А. у Києві було споруджено центральну електростанцію і прокладено міську електромережу [4,5].

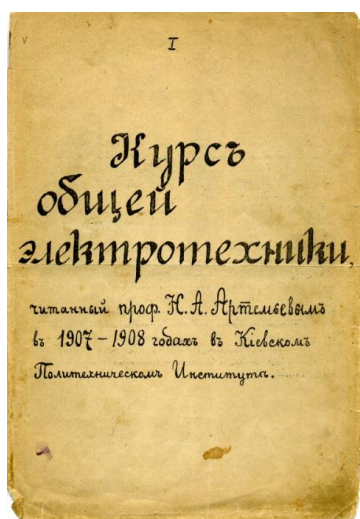


Рис. 2 Титульна сторінка підручника з електротехніки Артем'єва М.А.

Під час роботи у КПІ Артем'єв М.А. захистив докторську дисертацію на тему: «Визначення розмірів динамомашин і вплив напруги на розміри машини». Після захисту його було затверджено ординарним професором з електротехніки. Артем'єв М.А. читав загальний курс електротехніки для студентів 3-го курсу трьох відділень Київського політехнічного інституту, спеціальний курс для студентів 4-го курсу механічного відділення, а також лекції по центральним електричним станціям і мережам [6]. У 1909 році було опубліковано підручник з електротехніки, написаний на основі прочитаних ним лекцій.

Артем'єв М.А. був ініціатором створення повітроплавного відділення у КПІ. В 1907–1908 роках професор Артем'єв проводив досліди з моделлю «маховопропелера», що був не чим іншим, як сталевим маховиком на вертикальній осі зі встановленими на ньому лопастями, які обертаються. Взимку 1908–1909 років професор Артем'єв з відомим авіатором Борисом Делоне випробовували великі моделі планерів. Згодом Микола Артем'єв спільно з професором КПІ Олександром Кудашевим брали участь у побудові перших у Києві планера та літака.

У 1907 році Артем'євим М.А. було засновано Південно-російську спільноту електротехніків. У 1911 р. він пішов у відставку на знак протесту проти звільнення деканів трьох відділень Київської політехніки з політичних мотивів.

З 1911 р. протягом 4 років Микола Андрійович працював головним інженером Харківського міського управління, де під його керівництвом було спроектовано і побудовано нову електричну станцію і розширено міську електричну мережу. В той саме час Микола Андрійович був експертом з електробудівництва в інших великих містах Росії (Баку, Казань, Астрахань, Полтава, Тифліс, Славянск).

З кінця 1916 р. на роботі у Петроградському міському управлінні Микола Андрійович керував об'єднанням декількох електростанцій, що працювали на той час у місті, в одну загальну систему.

У 1920 р. Артем'єва М.А. було обрано професором кафедри електротехніки Московської сільськогосподарської академії ім. Тимірязєва. На цій посаді він працював до 1948 р.

Брав активну участь у розробці плану електрифікації «ГОЭЛРО», як практично єдиний на той час високопрофесійний електротехнік у сільськогосподарській галузі [7].

Помер Микола Андрійович 5 грудня 1948 р. у Москві.

До оригінальних винаходів і технічних досягнень Артем'єва М.А. слід віднести: захисний костюм для роботи під високою напругою, електростатичний телефон, синхронізатор коротких імпульсів, безперервний контакт, що котиться, для компенсаційного апарату; електричний спосіб загартування пил та ін. [8].

Після М.А. Артем'єва екстраординарним професором кафедри електротехніки став Анатолій Володимирович Круковський, майбутній перший декан електротехнічного факультету. Після закінчення Київської політехніки у 1903 році був залишений для підготовки до професорського звання. У 1906–1911р.р очолював кафедру електротехніки та електротехнічну лабораторію Катеринославського вищого гірничого училища (відтепер Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро). Від 1911р. – екстраординарний професор та завідувач кафедри електротехніки, від вересня 1918р. – перший декан електротехнічного факультету Київського політехнічного інституту. У 1913 році захистив дисертацію на тему «Цепочка переменого тока при периодическом изменении коэффициента самоиндукции» і став ад'юнктом електротехніки. Був головою експертної комісії відділу електротехніки на Всеросійській виставці (Київ, 1913).

З 1914 року на кафедрі почав працювати штатним викладачем Олександр Олександрович Скоморохов, який згодом став відомим електротехніком, першим завідувачем кафедри електричних машин (1920 р.) та деканом електротехнічного факультету (1922-1925 р.р.)

З 1921 р. студентам КПІ вже викладали курси: "Вступ до електротехніки", "Енциклопедія електротехніки", "Теоретичні основи електротехніки" та "Основи теорії змінних струмів", «Векторний та гармонічний аналіз». Читали лекції проф. О.О.Скоморохов, проф. І.Д.Горбачевський, проф. Л. Й. Кордиш.



Рис. 3 Горбачевський І.Д.

Працювали лабораторії загальної електротехніки та змінних струмів, обома лабораторіями завідував І. Д. Горбачевський. До лабораторій було підведено постійну напругу від факультетської акумуляторної батареї та трифазну напругу від інститутської електростанції (тоді вона називалась електровнею). Лабораторія загальної електротехніки обслуговувала всі п'ять факультетів КПІ, лабораторія змінних струмів — тільки електротехнічний факультет. Лабораторні заняття проводили викладачі Д.Н.Рашєєв, С.І.Іноземцев. У 1926р. Українською мовою видано підручник О.О.Скоморохова "Загальна електротехніка"

У 1920 р. кафедру електротехніки очолив проф. І.Д.Горбачевський. У 1930 році кафедра отримала назву Теоретичних основ електротехніки, в той саме час було створено кафедру загальної електротехніки, яку очолив Д.Н.Рашєєв.

Професор Горбачевський І.Д. керував кафедрою по 1941 р.

Після початку другої світової війни у 1941 р. КПІ разом з Ленінградським політехнічним інститутом були евакуйовані до м.Ташкент, де об'єдналися з Середньоазійським індустріальним інститутом. До складу кафедри загальної електротехніки, яку очолював тоді член-кор АН СРСР відомий ленінградський вчений М.А.Шателен, входили кияни доц. Алісіменко, ст. викладач Є.Г.Лоев, асистент Л.В.Лісневська, ст. лаборант Г.М.Миколук. 1944 року вони повернулись з евакуації до Києва, кафедру загальної електротехніки очолив доц. В.Л.Уласик.

В 1944—1950 рр. викладанням теоретичних основ електротехніки опікувався проф. А.Д.Нестеренко, який очолював кафедру приладобудування. Викладали ТОЕ доц. В. Г. Мацевитий (раніше він викладав вищу математику), доц. П.Г.Городецький, асистенти Г.В.Девідзе та Г.М.Миколук. Читав курс ТОЕ також доц. К.В.Чарторизький, який працював на кафедрі електроустаткування промислових підприємств.



Рис. 4 Чиженко
Іван Миронович

У 1950 році кафедру теоретичних основ електротехніки очолив Іван Миронович Чиженко.

Народився Іван Миронович 27 березня 1916 року у селищі Козин, що під Києвом. У 1922-1931р.р. навчався у школі м.Обухова, у 1931-1933 р.р. у ФЗУ комунальників при Київському трамвайному заводі.

У 1935-1940 р.р. студент Електротехнічного факультету Київського індустріального інституту (тепер КПІ), який закінчив з відзнакою за спеціальністю „Електричні станції, системи та мережі” і був рекомендований до аспірантури, але за розподіленням поїхав на Дніпрогес з дипломом інженера-електрика. У листопаді 1940 року Іван Миронович став аспірантом на кафедрі електричних станцій Київського політехнічного інституту, де він встиг провчитися до липня 1941 року.

Під час Другої світової війни був командиром взводу батальйону 95-гвардійської стрілецької дивізії, а закінчив свій бойовий шлях інженером відділу зв'язку штабу армії у Празі.

У 1946 році Чиженко І.М. повернувся до КПІ і у 1949 році захистив кандидатську дисертацію на тему: "Компенсация реактивной мощности в цепях с ионными преобразовательными установками".

У 1954 р. І.М.Чиженко з учнями розробляє перший компенсаційний перетворювач, який впровадили на тяговій підстанції Пост-Волинської електрифікованої дільниці Південно-Західної залізниці. Після цього почалося широке впровадження винаходу на підприємствах. Компенсаційні випрямлячі були встановлені на Дніпропетровському, Кандалакському, Новокузнецькому, Сумгайтському, Уральському, Новоївському алюмінієвих заводах, Запорізькому титаномагнієвому, Орджонікідзенському міднорудному, Челябінському цинковому, Куйбишевському, Держинському, Іркутському, Уфимському хімічних заводах, а також на тягових підстанціях електрифікованих залізниць і на багатьох інших підприємствах. Всього були розроблені та впроваджені в експлуатацію у промисловості та електрифікованому транспорті 46 потужних компенсаційних перетворювачів загальною потужністю 365 МВА, які забезпечили щорічне заощадження електроенергії більш, ніж на 145 млн. кВт·годин.

За розробку, дослідження і впровадження компенсаційних перетворювачів колектив вчених на чолі з Іваном Мироновичем у 1962 році був удостоєний Ленінської премії СРСР в галузі електротехніки.

1963 р. Лауреат Ленінської премії І. М. Чиженко захищає докторську дисертацію, у 1965 р. стає професором, а у 1972 р. – членом-кореспондентом Академії наук України.

Десять років І.М.Чиженко був проректором з наукової роботи КПІ. Як проректор КПІ брав участь у плануванні його майбутньої розбудови.

З кінця 80-х років І. М. Чиженко з учнями починає розробляти тиристорні пристрої, здатні регулювати зсув фаз між напругою і струмом на їх полюсах у найширшому діапазоні.



Рис. 5 І.М. Чиженко(по центру) у колі колег та учнів

У 1979 році І. М. Чиженко й І. А. Курило удостоєні першої премії НТТ енергетики і електротехнічної промисловості за розробку компенсаційних інверторів.

В 1988 році Чиженка І.М. було обрано Академіком Національної академії наук України.

– І. М. Чиженко зробив 33 винаходи, які відзначені медалями та дипломами ВДНГ і впроваджені в промисловості. Були патенти в Німеччині, Японії, Франції, Італії.

– Йому належить більше 300 наукових праць, 14 з яких – учбові посібники та монографії.

– Протягом багатьох років був членом Президії науково-методичної ради Мінвузу СРСР з ТОЕ та Інженерної електрофізики, очолював Південно-західне регіональне відділення цієї ради.

– Очолював науково-методичну комісію Мінвузу України з ТОЕ та секцію електротехніки і енергетики науково-технічної ради Мінвузу України.

–Майже 40 років завідував кафедрою теоретичних основ електротехніки Київського політехнічного інституту.

На честь Чиженка І.М. названо одну з лабораторій кафедри теоретичної електротехніки, встановлено меморіальні дошки на будинках у м. Києві і у с.Козин, у яких він мешкав.



Рис. 6 Колеги та учні І.М.Чиженка на відкритті меморіальної дошки у м.Києві

До 100-річчя від дня народження у селищі Козин було відкрито музей І.М.Чиженка.



Рис. 7 Перший проректор КПІ ім. Ігоря Сікорського Ю.І.Якименко

В 1950 р. кафедра теоретичних основ електротехніки складалась з чотирьох викладачів: зав. кафедрою І.М.Чиженка, доц. В.Г.Мацевитого, асистентів Г.В.Девідзе та Г.М.Миколоука. В подальші роки в зв'язку зі значним збільшенням кількості студентів збільшувався і кількісний склад кафедри ТОЕ. У 1962 р. доцентів Д. Я. Глухова і В. С. Руденка було обрано завідувачами кафедр відповідно Загальної електротехніки та Промислової електроніки.

До викладацького складу кафедри загальної електротехніки на той час належали: зав.кафедрою Д.Я.Глухов, доценти: Б.Л.Владимирський, Г.П.Левін, Ю.Г.Лоев, В.Л.Уласик; ст.викладачі: В.Ю.Марушак, О.М.Саратов; асистенти: С.П.Антощук, С.М.Матвієнко, Г.І.Мельниченко, Л.Г.Толпиго.

У 1962–84 рр. кафедру Загальної електротехніки очолював проф. Дмитро Якович Глухов. На кафедрі досліджували електроенергетичні процеси у вентиляльних перетворювачах, зокрема для електродугового обладнання. Роботи впроваджено на Саратовському хімікомбінаті.



Рис. 8 Сільвестров
Антон Миколайович

З 1984 по 1999 р.р кафедру Загальної електротехніки очолював проф. , д.т.н. Антон Миколайович Сільвестров. Сфера наукових інтересів-теоретичні і прикладні аспекти теорії ідентифікації об'єктів різної природи; адаптивні системи автоматичного керування динамічними об'єктами в умовах не стаціонарності і апіорної невизначеності їх характеристик; удосконалення теорії і практичних аспектів електротехніки з позицій системного підходу; дослідження і пояснення складних електродинамічних процесів в пристроях Губера, Мільроя та ін. Під керівництвом Сільвестрова А.М. було створено науково-дослідні лабораторії, в яких виконувались госпдоговірні науково-дослідні роботи. Отримані кошти дозволили створити чотири учбові лабораторії та оснастити їх сучасним електротехнічним обладнанням: лабораторними стендами УІЛС-1, універсальним лабораторним стендом ЕВ-4 та вимірювальними приладами.

У 1987 р. до колективу кафедри ТОЕ влилася група викладачів кафедри промислової електроніки на чолі з д.т.н., проф. В. І. Сеньком: доценти М.П.Макаренко, К. К. Победаш, В. С. Смірнов, С. О. Лебеденко, А.П.Сапегін, А. П. Калініченко, Б. М. Шелковніков, ст. викладачі В.І.Кучерук, В. А. Святненко, К. В. Трубіцин. Було створено учбово-наукову лабораторію електронних пристроїв.

Кафедра ТОЕ починає забезпечувати учбові курси: «Теоретичні основи електротехніки», «Електричні та магнітні кола», «Електротехніка та електроніка», «Промислова електроніка», «Електронні, мікропроцесорні та перетворювальні пристрої», «Основи перетворювальної техніки», «Електроніка та

мікросхемотехніка», «Мікропроцесорна техніка», «Електроніка», «Спеціальні питання передачі електроенергії».

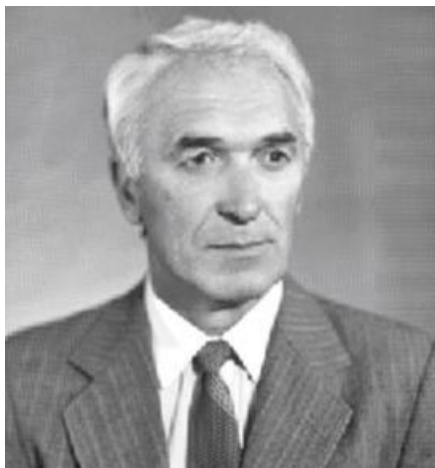


Рис. 9 Сенько
Віталій Іванович

У 1989 р. завідувачем кафедри теоретичних основ електротехніки стає д.т.н., проф. Віталій Іванович Сенько.

Сфера наукових інтересів — енергетична електроніка, напівпровідникові перетворювачі частоти, силові електронні пристрої, електроживлення радіоелектронної апаратури. Лауреат Дежавної премії України (1982 р.), премій КПІ (1974 та 1981 рр.) та премії НАНУ ім. Г.Ф. Проскури (1998р.) за видатні досягнення в галузі енергетики. Академік Міжнародної академії електротехнічних наук, член Інституту інженерів електриків та електронщиків (Нью-Йорк).

Понад 30 років кафедра ТОЕ була базовою для Науково-методичної комісії з теоретичної електротехніки Мінвузу (пізніше Міністерство освіти) України. До 1990 р. комісію очолював І. М. Чиженко, потім — В.І.Сенько. Багато років заступником голови комісії був Л. Р. Слободян, секретарем — І. Є. Рахній. Активну участь у роботі комісії брали О.Б.Толпиго, В. С. Бойко, В. А. Федоренко, А. О. Баран та ін.

З 1977 р. по 1991р. при кафедрі працювало відділення факультету підвищення кваліфікації викладачів ТОЕ. Щорічно приїздили навчатися 10—15 або й більше викладачів не тільки з України, а й з усіх кінців СРСР.

Регулярно проводяться олімпіади з теоретичних основ електротехніки, в яких беруть участь студенти КПІ та інших вузів Києва та всієї України.

Кафедра багато уваги приділяє начально-методичній роботі. Окрім традиційних для кафедри курсів: “Теоретичні основи електротехніки”, “Електротехніка”, “Теорія електричних та магнітних кіл” розроблені і методично забезпечені курси: “Математичні задачі енергетики” та “Передача енергії постійним струмом високої гапруги”.

У 1982 р. за підручник «Основи перетворювальної техніки» І. М. Чиженку, В. І. Сеньку, В. С. Руденку було присуджено Державну премію України в галузі науки та техніки.



Рис. 10 Академік НАН України І.М.Чиженко (у центрі) із своїми учнями:
проф. Сенько В.І. та проф. Руденко В.С. (праворуч)

Кінець XX – початок XXI століття відзначені визнанням педагогічної майстерності провідних викладачів кафедри. Четверо з них затверджені у вченому званні професора — В.І.Шеховцов (1992 р.), І.А.Курило (1993 р.), В.С.Бойко (1995 р.), Л.Р.Слободян (2002р.). В 1992 р. І.А.Курило за досягнення в навчально-методичній роботі удостоєний диплома Міністерства освіти України.

У 1999 р. кафедри Теоретичних основ електротехніки і Загальної електротехніки було об'єднано у кафедру Теоретичної електротехніки (ТЕ), яку в 1999-2002 роках очолював професор В.І.Сенько.

У 2003 р. завідувачем кафедри теоретичної електротехніки було обрано Щербу Анатолія Андрійовича, члена-кореспондента Національної Академії наук України, доктора технічних наук, професора, Лауреата Державної премії України з науки і техніки.



Рис. 11 Щерба
Анатолій Андрійович

Наукові дослідження Щерби А.А. спрямовані на розвиток теорії нестационарних електрофізичних процесів і розробку електротехнічного обладнання для реалізації нових електротехнологій в енергетиці та промисловості. Він обґрунтував нові закономірності збурення низькочастотних електричних полів у наномодифікованій твердій полімерній ізоляції та виникнення в ній порогових електрофізичних процесів, на основі яких розвинув кінетично-активаційну теорію порогових механізмів її деградації. А.А. Щерба розробив основи теорії формування багатоканальних електророзрядних струмів у шарі металевих гранул між електродами зі швидкою міграцією короточасних електроіскрив – мікроплазмових утворень. Виявлені залежності між електричними параметрами розрядних імпульсів і характеристиками іскроерозійних порошків він поклав в основу принципів побудови напівпровідникових систем виробництва мікро- та нанопорошків з унікальними властивостями.

Під головуванням Щерби А.А. кафедра отримала новий імпульс у розвитку наукової роботи, покращилась методична та видавнича діяльність, значно збільшилась участь молодих спеціалістів у навчальному та дослідницькому процесах, з'явилися молоді кандидати наук.

За ініціативи А.А.Щерби створена і працює наукова рада для захисту кандидатських дисертацій за спеціальністю 05.09.05 «Теоретична електротехніка». Успішно проводилися наукові дослідження для високотехнологічних підприємств за темами:

«Підвищення надійності, пропускнув електричної потужності та екологічності силових кабелів на напруги до 110 кВ і освоєння нової технології їх промислового виготовлення та діагностики», «Оптимізація нової технології промислового виготовлення кабелів з твердою полімерною ізоляцією для удосконалення енергетичних мереж надвисоких напруг», «Розробка науково-технічних засобів неруйнівної діагностики вітчизняних над високовольтних кабелів світового рівня для підвищення їх експлуатаційної надійності та ресурсу».



Рис. 12 Члени авторського колективу – професори В.С.Бойко і І.А.Курило.

З 2012 р. по 2017 р.р. на кафедрі проводилися Всеукраїнські олімпіади з теоретичної електротехніки.

Щерба А.А. нагороджений Почесними грамотами Міністерства освіти і науки України (2008 р.) та Верховної Ради України (2009 р.), лауреат премії НАН України ім. В.М. Хрущова (2010 р.).

У 2004 році вийшов з друку 1-й том підручника «Теоретичні основи електротехніки». Другий та третій томи видані, відповідно, у 2008 та 2013 роках. 30 червня 2016 року на засіданні Вченої ради НТУУ «КПІ» за результатами конкурсу на кращий підручник, посібник, монографію авторський колектив підручника «Теоретичні основи електротехніки» у 3-х томах – В.С.Бойко, В.В.Бойко, Ю.Ф. Видолоб, І.А.Курило, В.І.Шеховцов, В.А.Шидловська став лауреатом премії НТУУ «КПІ».

Щерба А.А. має понад 420 наукових публікацій, з яких 9 монографій, 27 публікацій у виданнях МБД SCOPUS, 32 патенти на винаходи, 5 науково-методичних видань, 7 навчальних посібників для вузів з грифом МОН України, 18 навчальних видань з грифом НТУУ "КПІ", 13 електронних навчальних видань з грифом НТУУ "КПІ".

У січні 2015 р. кафедрі теоретичної електротехніки очолив професор, доктор технічних наук Островерхов Микола Якович.



Рис. 13 Островерхов
Микола Якович

Островерхов М.Я. у 1985 р. закінчив електротехнічний факультет Київського політехнічного інституту за спеціальністю «Електропривод та автоматизація промислових установок».

Кандидатську дисертацію захистив 17 червня 1991 р. в Київському політехнічному інституті за спеціальністю 05.13.07-«Автоматизація технологічних процесів і виробництв» на тему «Система автоматичного керування телескопічністю рулонів при змотуванні прокату». Докторську дисертацію захистив 17 січня 2013 р. в НТУ «Харківський політехнічний інститут» за спеціальністю 05.09.03-«Електротехнічні комплекси та системи» за темою «Електромеханічні системи на основі безконтактних виконавчих пристроїв для автоматичного керування параметрами штаби в ході неперервної прокатки».

З квітня 1985 р. працював на кафедрі електропривода та автоматизації промислових установок (перейменована на кафедру автоматизації електромеханічних систем та електроприводу у 2003 р.) на посадах стажера-дослідника, молодшого наукового співробітника (1987 р.), наукового співробітника (1991 р.), старшого викладача (1993 р.), доцента (2001 р.), професора (2013 р.).

Викладав дисципліни «Теорія електропривода», «Автоматизовані системи управління технологічними процесами», «Обчислювальна техніка та програмування».

З 1992-2002 рр. був відповідальним за наукову, а з 2003-2014 рр. – за навчально-методичну роботу кафедри. З 2007-2015 рр. виконував обов'язки ученого секретаря науково-методичної підкомісії з електромеханіки МОН України. Був головою робочої групи МОН України з розробки стандартів вищої школи за напрямом підготовки 6.050702-«Електромеханіка».

Член спеціалізованої вченої ради із захисту докторських дисертацій. Основні напрями наукових досліджень: електромеханічні системи автоматичного керування з безконтактними виконавчими пристроями; методи керування взаємозв'язаними електромеханічними системами в умовах невизначеності математичної моделі об'єкту.



Рис. 14 Бржезицький
Володимир Олександрович

Влітку 2018 р. до колективу кафедри ТЕ влилася група викладачів кафедри техніки та електрофізики високих напруг на чолі з д.т.н., проф. В. О. Бржезицьким. У 1954–2018 р.р. на кафедрі техніки та електрофізики високих напруг досліджували електричні та магнітні поля об'єктів енергетики та їх вплив на довкілля; ізоляцію повітряних та кабельних ліній електропередач; ізоляцію обладнання станцій і підстанцій та питання захисту об'єктів енергетики від перенапруг і блискавки.

З 1993 по 2018 р.р. кафедру техніки та електрофізики високих напруг очолював проф., д.т.н. Бржезицький Володимир Олександрович. Сфера наукових інтересів – метрологічне забезпечення вимірювань високих напруг та великих струмів; методики вибору обмежувачів перенапруг нелінійних для електричних мереж напругою 110-750 кВ. Під його керівництвом виконано і впроваджено комплекс вимірювальних установок вищої точності класу напруги 500 кВ.

На даний час на кафедрі працює наукова школа «Розвиток теорії перетворення енергії електромагнітного поля та її практичне застосування в електротехніці», засновником якої є академік НАН України (1988 р.), лауреат Державної премії (1982 р.), проректор з наукової роботи КПІ (1959-1969 рр.), завідувач кафедри теоретичних основ електротехніки (1950-1989 рр.) Чиженко Іван Миронович.

Науковий керівник школи - д.т.н., професор Островерхов Микола Якович, завідувач кафедри теоретичної електротехніки.

У даний час дослідження у школі здійснюються за наступними науковими напрямками, які очолюють послідовники Чиженка І.М.:

– "Теорія нестационарних електрофізичних процесів в енергетиці", керівник: член-кореспондент НАН України, професор кафедри теоретичної електротехніки Щерба Анатолій Андрійович;

– "Дослідження напівпровідникових перетворювачів модуляційного типу", керівник: доктор технічних наук, професор кафедри теоретичної електротехніки Сенько Віталій Іванович;

– "Електротехнічні системи керування в умовах невизначеності математичної моделі об'єкту", керівник: доктор технічних наук, завідувач кафедри теоретичної електротехніки Островерхов Микола Якович;

– "Перетворювачі електричної енергії компенсаційного типу", керівник: доктор технічних наук, професор кафедри теоретичної електротехніки Бойко Валерій Степанович;

– "Системи і методи цілеспрямованої ідентифікації електротехнічних об'єктів", керівник: доктор технічних наук, професор кафедри теоретичної електротехніки Сільвестров Антон Миколайович.

– "Техніка та електрофізика високих напруг", керівник: доктор технічних наук, професор кафедри теоретичної електротехніки Бржезицький Володимир Олександрович.

В рамках школи захищено 72 кандидатських та 19 докторських дисертацій; видано 125 монографій, підручників та навчальних посібників; опубліковано близько 800 наукових робіт у фахових виданнях; отримано більше 100 охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності; 53 наукові статті входять до наукометричної бази даних Scopus. Роботи вчених школи цитовані 239 разів у Scopus, зокрема Щерба А.А. має індекс Гірша 14, а Щерба М.А. – 6.

Високі наукові досягнення вчених школи відзначено престижними державними нагородами, зокрема: Чиженко І.М., Сенько В.І., Руденко В.С., Щерба А.А., Щерба М.А. – лауреати Державної премії України; Перетятко Ю.В., Щерба М.А. – лауреати премії Президента України для молодих вчених; Бойко В.С., Сенько В.І. та Щерба А.А. – лауреати премії ім. Г.Ф. Проскури та ім. В.М. Хрущова НАН України. Викладачі кафедри Щерба М.А. і Білецький О.О. ставали переможцями конкурсу «Молодий викладач-дослідник КПІ».

На базі кафедри теоретичної електротехніки факультету електроенергетехніки та автоматики КПІ ім. Ігоря Сікорського створені і ведуть науково-дослідницьку роботу студентські гуртки «Напівпровідникові пристрої в електротехнічних системах» (керівник доц. Грудська В.П.), «Теоретична та загальна електротехніка» (керівник доц. Спінул Л.Ю.), «Теорія і практика теоретичних основ електротехніки» (керівник доц. Михайленко В.В.).

Наукові студентські гуртки створені з метою об'єднання талановитих та творчих особистостей і направлені на роботу у першу чергу із студентами молодших курсів. Це перший етап до оволодіння майбутніми фахівцями навичками наукового дослідження. Робота у науковому гуртку має творчий характер і виховує у студента якості дослідника, збагачує і закріплює знання й уміння студентів, готує їх до розв'язання завдань, які мають практичне значення для держави.

Учасниками гуртків зроблено чисельні доповіді на Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики», видано наукові праці у фахових виданнях України. Члени гуртків неодноразово ставали переможцями і призерами Всеукраїнської та Університетської олімпіад з Теоретичних основ електротехніки та з Електротехніки.

У 2018 р. кафедра ТЕ стає випусковою, відкриває нову спеціалізацію "Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси" і в цьому ж році здійснює перший набір студентів на навчання!

Кафедра **Теоретичної електротехніки** – це один з найбільших та **найстаріших** підрозділів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», який здійснює базову та професійно-орієнтовану електротехнічну підготовку фахівців. На кафедрі щорічно навчається близько 5000 студентів з 53 випускових кафедр 17 факультетів університету. Це зобов'язує колектив кафедри відповідально відноситись до організації навчального процесу, формувати професійні навички та виховувати сумлінне ставлення до навчання студентської молоді.

Перелік посилань

1.В.В. Янковий, *Киевская политехника: истоки. Исторические исследования*. Київ: ООО “ИД “Эдельвейс” 2013.

2.Э.М.Бондаровская, М.И.Горбунова, Е.М.Куш *Из истории Киевского политехнического института: сборник документов и материалов*. К.: Изд-во Киевского ун-та, 1961. — Т.1: 1898—1917 гг. — 1961.

3.Д.В. Зеркалов, *НТУУ «КПІ». Минуле і сьогодення*. [Електронний ресурс]. Київ: Основа, 2012.

4.В.О. Каменева, *Микола Андрійович Артем'єв*. Київ, 1960.

5.В.О.Каменева, *Русский электротехник*. Москва, 1972.

6.К.И. Шенфер, «К 75-летию проф. Н. А. Артемьева», *Электричество*, №4, 1946.

7.А.Б. Оришев, *Тайны российской аграрной науки: тимирязевский прорыв*, Москва: Издательское решение, 2016.

8.Л.Ю. Спінул, В.В. Галушко, О.С. Гришко, «До 100-річчя факультету електроенергетехніки та автоматики: Артем'єв М.А. – засновник електротехнічної школи у київській політехніці», *Міжнародний науково-технічний журнал «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики*, С. 630–634, 2018.

9.Спінул Л.Ю. – к.т.н., доцент, кафедра теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент, orcid.org/0000-0002-4234-6072

10.Чибеліс В.І. – к.т.н., доцент, кафедра теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент, orcid.org/0000-0003-2235-9826

11.Лободзинський В.Ю. – к.т.н., кафедра теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент, orcid.org/0000-0003-1167-824X

12.Святненко В.А. – кафедра теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, ст. викладач, orcid.org/0000-0002-0518-1045

L. Spinul, Cand. Sc., Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4234-6072

V. Chibelis, Cand. Sc., Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2235-9826

V. Lobodzinsky, Cand. Sc., ORCID 0000-0003-1167-824X

V. Svyatnenko, Senior Teacher, ORCID 0000-0002-0518-1045

Department of theoretical electrical engineering

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

DEPARTMENT OF THEORETICAL ELECTRICAL ENGINEERING OF KPI: YEARS, PEOPLE, DESTINIES

The article offered to the reader is devoted to the formation and stages of development of one of the oldest departments of Kyiv Polytechnic Institute - Department of theoretical electrical engineering. An excerpt from the KPI personnel is given, which confirms the date of foundation. The history of the department is presented through its heads and their activities - from the day of formation to the present time. Main scientific directions of the department's activity and its achievements are given. The article will be useful for the heads and scientific and

pedagogical staff of Ukrainian universities, a wide range of readers who are not indifferent to the history of education and science in Ukraine.

Keywords - Kyiv Polytechnical Institute, Department of theoretical electrical engineering, history of electrical engineering

Reference

- 1.V.V. Yankovij, *Kiev Polytechnic: origins. Historical research*. Kiev: OOO "ID "Edel'vejs", 2013.
- 2.E.M. Bondarovskaya, M.I. Gorbunova, E.M. Kushch From the history of the Kiev Polytechnic Institute: a digest of documents and materials. К.: Izd-vo Kievskogo un-ta, 1961. - Т.1: 1898—1917 yy. - 1961.
- 3.D.V. Zerkalov, *NTUU «KPI». Past and present*. [Online] Kiev: Osnova, 2012.
- 4.V.O. Kamenieva, *Mykola Andriiovych Artemiev*. Kiev, 1960.
- 5.V.O.Kamenieva, *Russian electrical engineer*. Moscow, 1972.
- 6.K.I. Shenfer, «To the 75th anniversary of prof. N. A. Artemieva». *Elektrichestvo*, №4, 1946.
- 7.A.B. Orishev, *Secrets of Russian agricultural science: timiryazev's breakthrough*. Moscow: Izdatel'skoe reshenie, 2016.
- 8.L.Yu. Spinul, V.V. Halushko, O.S. Hryshko, «o the 100th anniversary of the Faculty of Electrical Engineering and Automation: Artemyev MA - Founder of the Electrical Engineering School at Kyiv Polytechnic», *International scientific and technical journal "Modern problems of electrical engineering and automation*, P. 630–634, 2018.
- 9.Spinul L.Yu. – Cand. Sc., Assoc. Prof, Department of theoretical electrical engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute", Assoc. Prof., orcid.org/0000-0002-4234-6072
- 10.Chibelis V.I. – Cand. Sc., Assoc. Prof, Department of theoretical electrical engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute", Assoc. Prof., orcid.org/0000-0002-4234-6072
- 11.Lobodzinsky V.Yu. – Cand. Sc., Department of theoretical electrical engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute", Assoc. Prof., orcid.org/0000-0002-4234-6072
- 12.Svyatnenko V.A. – Department of theoretical electrical engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute", Senior Teacher., orcid.org/0000-0002-4234-6072

Надійшла 30.09.2021
Received 30.09.2021

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 621.316

DOI 10.20535/1813-5420.2.2021.247354

С.П. Денисюк, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6299-3680

І.Ю. Бойко, ORCID 0000-0002-8044-137X

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ MICROGRID З ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРАМИ

Показано, що підвищення енергоефективності Microgrid з дизель-генераторами вимагає вирішення проблеми оптимізації режимів роботи Microgrid з використанням в якості оптимізаційного критерія зниження витрат первинного палива дизель-генераторів. Для дослідження енергоефективності роботи таких типів Microgrid в якості критерію, що має безпосередній вплив на обсяг генерованої електроенергії, обрано адекватний облік витрат первинного палива при генерації заданого обсягу електроенергії в системі.

В статті визначено, що одним з важливих показників дизель-генераторних установок є їх економічність, яка визначається відношенням енергії, що виробляється, до витрати палива за годину роботи при номінальному навантаженні. Показано, що зниження витрати палива дозволяє підвищити ефективність роботи дизель-генераторних установок, а різні типи усталених та перехідних режимів роботи дизель-генераторів суттєво впливають на ефективність роботи Microgrid з точки зору технічної та фінансової ефективності.

Для підвищення техніко-економічних показників в Microgrid з дизель-генераторами в статті запропоновано використати електровартісну модель енергогенеруючої системи, що дозволяє розраховувати як динамічну зміну генерованої потужності, так і динамічну зміну її вартості та вартості первинного палива. Дана модель дає можливість гнучкого нелінійного відстеження витрат палива, що з урахуванням вартості дизельного палива може слугувати у якості економічного критерія для визначення енергоефективності роботи генеруючої системи.

У статті наведено алгоритм оцінки фінансових та технічних показників ефективності роботи Microgrid в динамічних режимах протягом певного технологічного періоду, який дозволяє не тільки оцінити економічну та енергетичну ефективність Microgrid з дизель-генераторами, але й може бути застосований при модифікації Smart-лічильників, що дозволяє суттєво розширити їх функціональні можливості.

Ключові слова: *підвищення енергоефективності, фінансові та технічні показники, Microgrid, дизель-генератор, гібридна система електроживлення, динамічна електровартісна модель, Smart-лічильники.*

Вступ

Відповідно до положень «енергетичного переходу» останніми роками в Україні спостерігається підвищення кількості введених в експлуатацію об'єктів альтернативної енергетики, у першу чергу сонячних (СЕС) та вітрових (ВЕС) електростанцій. Так, у нашій державі у 2019 році виробництво електроенергії з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в загальній структурі виробництва електричної енергії досягнув 3,6 % або 5,5 млрд. кВт·год. У 2020 році виробництво електроенергії на СЕС вже склало 6,8 млрд. кВт·год або ж 4,6 %, ВЕС – 3,3 млрд. кВт·год або ж 2,2 %. У 2020 році встановлена потужність генерації ВДЕ в Україні зросла в 1,4 раза, а виробництво – вдвічі, а частка ВЕС та СЕС у структурі виробництва електроенергії зросла вдвічі – із 3,3% до 6,8%. Найбільше зросла встановлена потужність СЕС, що обумовлює нагальну потребу в гнучких інструментах для їхнього балансування. У наступні три роки (2021–2023 рр.) тенденція до зростання зберігатиметься, хоча прогнозується, що темпи зростання будуть значно меншими (зниження темпів від 16% у 2022 році до 2,4 % у 2031 р.). Зокрема, обсяг відпуску у 2021 році очікується на рівні близько 13120 млн. кВт·год, що становитиме 9,5 % від сумарного відпуску

електричної енергії усіма об'єктами електроенергетики в ОЕС України.

На сьогодні балансування ВДЕ, переважно СЕС, у денні години НЕК «Укренерго» визначає як основну проблему інтеграції ВДЕ в енергосистему України [1]. Згідно «Звіту з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву», затвердженого постановою НКРЕКП № 605 від 13.03.2020 р., розвиток ВДЕ має бути узгоджений з можливостями забезпечення їх балансування [1]. Головні рекомендації цього Звіту полягають у подальшому розвитку атомної генерації, модернізації вугільних блоків ТЕС та обмеження виробництва електроенергії із ВДЕ. За висновками НЕК «Укренерго», саме через відсутність балансуємих потужностей балансування ВДЕ наявними в енергосистемі потужностями є досить дорогим, неефективним та гальмує розвиток економіки України. Звіт визначає розвиток ВДЕ основною причиною подальшого зростання ціни електричної енергії на ринку.

За результатами багатьох наукових досліджень важливою проблемою забезпечення розвитку ВДЕ є оптимізація функціонування сучасних локальних систем енергозабезпечення, до складу яких входять ВДЕ, так і інші типи розосереджених джерел енергії (РДЕ), у першу чергу дизель-генератори (ДГ) [2, 3]. Такі системи під загальною назвою Microgrid отримали широке розповсюдження [3 – 5].

Актуальність оцінки технічних та вартісних показників роботи Microgrid з різними типами РДЕ зростає. Нагальною є проблема аналізу процесів підвищення енергоефективності в таких системах, які можемо розглядати як гібридні системи, робота системи з резервним джерелом у піковий період навантаження в усталених та перехідних режимах. При цьому зростає роль формування відповідних тарифних планів на генерацію електроенергії, зокрема, необхідно враховувати, що в короткотермінових (переривчастих) та постійних режимах роботи буде різна вартість генерації електроенергії ДГ.

Метою дослідження є оптимізація режимів роботи локальних системи енергозабезпечення (Microgrid), до складу якої входить ДГ з використанням в якості оптимізаційного критерія зниження витрат первинного палива ДГ.

Для дослідження енергоефективності роботи таких типів Microgrid необхідно обрати окремі критерії, що мають безпосередній вплив на обсяг генерованої електроенергії. Для випадку системи із ДГ у якості такого критерію обрано адекватний облік витрат первинного палива при генерації заданого обсягу електроенергії.

1. Перспективи розвитку гібридних енергетичних систем Microgrid

Загальновідомо, що комбінація двох або більше різних типів джерел електроенергії більш ефективна, ніж система з одним джерелом з точки зору ціни, ефективності й надійності [2, 3, 5, 6]. Будь-яка комбінація технологій генерації енергії РДЕ, у тому числі ВДЕ, може утворювати гібридну енергетичну систему Microgrid. Наприклад, гібридна система може мати будь-яку комбінацію систем: вітроенергетичної, сонячної (на базі фотоелектричних панелей), мікрогідроелектростанцій, мікротурбін, дизель-генераторів, систем накопичення електроенергії, сховищ водню, виробленого, зокрема, на основі електролізу [2, 4, 6].

Виходи різних джерел генерації такої Microgrid повинні координуватися й узгоджено керуватися для одержання, наприклад, максимального обсягу генерованої електроенергії. Оскільки джерела РДЕ мають різні робочі характеристики, то важливо мати чітко визначену й стандартизовану структуру (процедуру) для їхнього з'єднання з метою створення гібридної Microgrid, де локальний кластер РДЕ, накопичувачів енергії й навантажень інтегруються разом і здатні автономно працювати [6]. Такі локальні системи енергозабезпечення також повинні мати можливість реалізації технології Plug & Play, відповідно до якої, пристрою (РДЕ, система зберігання енергії або кероване навантаження), можуть бути додані до існуючої системи Microgrid, не вимагаючи її реконфігурації при виконанні своєї визначеної функції. Можна виділити наступні особливості гібридних систем Microgrid, які роблять їх високоефективними і конкурентоспроможними [2, 5, 6]:

- гнучкість вибору палива, надійність, економічність, екологічність;
- можливість включення до їх складу високоефективного обладнання (паливних елементів, системи охолодження тощо);
- можливість одночасного забезпечення підвищення якості та доступності електроенергії, якості енергозабезпечення;
- можливість задіяти максимальну кількість ВДЕ з мінімальною вартістю генерації електроенергії при забезпеченні заданого графіка роботи споживачів;
- досягнення бажаних характеристик генерації та споживання електроенергії при найнижчій прийнятній вартості, що є ключовим елементом локальних систем енергозабезпечення, оптимізації їх функціонування на локальних ринках електроенергії.

Останнім часом все більш широке застосування знаходять комбіновані дизель-вітрові або дизель-фотоелектричні Microgrid, використання в яких ВДЕ дозволяє економити органічне паливо [5 – 8]. У таких гібридних системах в одній локальній мережі об'єднані дизель-генераторні установки (ДГУ), що працюють на органічному паливі, ВЕС та СЕС. Структурна схема типової гібридної Microgrid на основі використання енергії біопалива, сонячної енергії та ДГ наведено на рис. 1 [6 – 8].

У цій Microgrid використовується гібридний контролер, який підтримує баланс енергії під час зміна навантаження та визначає пріоритетність функціонування відповідних джерел енергії. Гібридний контролер забезпечує реалізацію наступних функцій:

- підключення живлення до споживача від джерела енергії, спроможного забезпечити вимоги навантаження;
- синхронізація сигналів напруги з різних джерел, наприклад, коли миттєва величина напруги від джерела фотовольтаїки відрізняється від величини напруги з іншого джерела, скажемо, біопалива, що викликає локальний потік циркулюючої потужності.

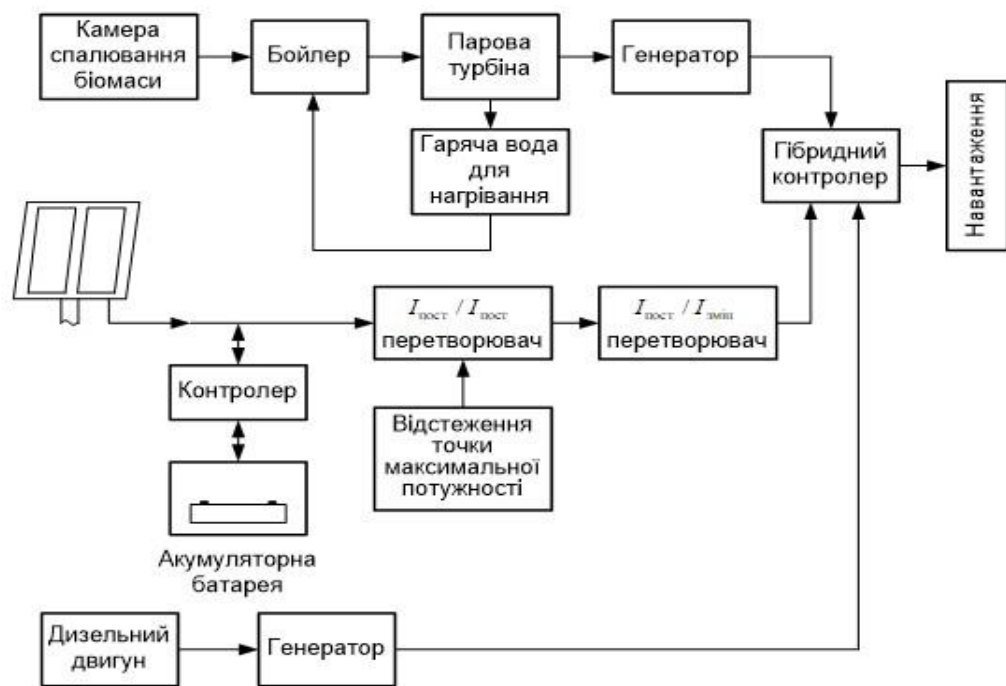


Рисунок 1 – Структурна схема типової гібридної енергетичної системи на основі використання енергії біопалива, сонячної енергії та ДГ

Необхідність у паралельній роботі виникає з таких причин: потрібно забезпечити підвищену надійність живлення, забезпечити безперебійність живлення на період проведення технічного обслуговування основного джерела електроживлення, компенсувати зростання споживаної потужності підключеним навантаженням. Власне алгоритм паралельної роботи РЕ, зокрема ДГ, полягає в тому, що вони працюють з мережею на загальні шини навантаження. Для їх ефективної паралельної роботи потрібно забезпечити синхронізацію цих джерел. Також важливим аспектом роботи гібридної системи Microgrid є паралельна робота елементів та розподіл навантажень. Загальне навантаження, яке складається з активної та реактивної складових, має розподілятися системами керування пропорційно їхнім звичайним номінальним значенням без значного дисбалансу [2, 4, 6, 7].

Як вже зазначалося, до основних переваг ДЕУ можна віднести універсальність застосування, низьку вартість обладнання, швидку окупність, достатню надійність і довговічність. Дизельне паливо не характеризується летючістю, як пари бензину або газ, тому навіть його значний витік не створює небезпеки навколишньому середовищу [7 – 9]. В автономних системах енергозабезпечення, що працюють незалежно від мережі централізованого електропостачання, досить часто використовуються два і більше дизель-генератора. Крім підвищення надійності системи електропостачання, багатоагрегатного ДГУ дозволяє включати в роботу необхідну кількість ДГ відповідно до поточного графіком навантаження. Це дозволяє оптимізувати завантаження агрегатів і покращувати техніко-економічні характеристики ДГУ в цілому.

Оскільки режими роботи споживачів постійно змінюються, може виникнути ситуація, при якій ДГУ працює на межі або в межах обраної умови, при цьому ДГ будуть працювати в важких умовах пуск-зупинка, що скорочує термін їх служби і збільшує витрату палива. Знизити витрати палива, а також оптимізувати режими роботи ДГ є можливим, забезпечивши ДЕС блоком прогнозування навантаження і датчиком температури. У даному випадку мікроконтролер буде керувати процесом включення і виключення дизель-генераторів на підставі інформації, яка надходить від блоку прогнозування навантаження, температури навколишнього середовища, яку вимірює датчик температури.

Використовується інтегрального параметру, за яким можна керувати процесом пуску і зупинки ДГ на підставі залежності, дозволяє оптимізувати режими роботи системи. Оскільки температура повітря з плином часу змінюється плавно, з процесу роботи дизель-електростанції (ДЕС) виключаються режими, при яких відбуваються часті пуски і зупинки ДГ, і вони працюють в режимах, близьких до номінальних. Для визначення залежності, що зв'язує потужність навантаження конкретної ДЕС з температурою навколишнього середовища, використовуються добові відомості електричних навантажень ДЕС, річний графік середньоденний температури району, в якому розташована ДЕС, а також добові графіки навантажень в характерні сезони року. Це дозволяє отримати залежності температури навколишнього середовища, обсяги вироблення електричної енергії і потужності електричного навантаження ДЕС від днів року у вигляді лінійних трендів.

Наведені режими ДГ та ДЕС суттєво впливають на ефективність роботи Microgrid з точки зору як технічної, так і фінансової ефективності.

2. Особливості динамічного ціноутворення в Microgrid, формування електровартісної моделі

Ще у 1970-х роках з'явилися дослідження (Фред Кан) щодо застосування різної у часі цінової політики ціноутворення на регульовані послуги, зокрема й електроенергію [10]. Якщо фіксовані тарифи призводять до дорогого нарощування потужності, то на додаток до зменшення пікового попиту, динамічні ціни також надають кожному споживачеві можливість зменшити рахунки за електроенергію навіть на постійному рівні споживання, просто змінюючи алгоритм споживання, зміщуючи навантаження протягом дня. Динамічне ціноутворення (ціноутворення в режимі реального часу) – це тактика зміни ціни в часі [11]. США та Європа – два першопрохідці, які активно проводять дослідження у галузі динамічного ціноутворення, хоча існують відмінності у реалізації. Так, в США більше зосереджуються на дерегуляції, що забезпечує розвиток на ринковій основі, тоді як в Європі роблять більший акцент на встановленні Smart- лічильників для полегшення контролю споживання електроенергії. Динамічне ціноутворення на електроенергію може вплинути на зміну поведінки клієнтів споживання електроенергії [12]. Означена споживча поведінка, що змінює попит на електроенергію, як правило, відбувається одночасно, тим самим зміщуючи пікове навантаження на інший період часу, коли потреба в електроенергії зазвичай низька [13].

Ціноутворення в режимі реального часу – це структура тарифу на комунальні послуги, при якій заряд за 1 кВт·год змінюється щогодини залежно від виробничих витрат у реальному часі. Оскільки експлуатація пікових електростанцій дорожча, ніж установок базового навантаження, роздрібні тарифи на електроенергію вищі в пікові періоди, ніж у періоди, що не відповідають пікам. Схема ціноутворення в реальному часі (Real-Time Pricing, RTP) є ідеальним методом для регулювання балансу потужності між попитом та пропозицією в інтелектуальних електричних мережах Smart Grid, має істотний вплив на поведінку споживачів, роботу системи та загальне керування системою [14].

Загалом усі існуючі пристрої вимірювання сигналів в електроенергетиці традиційно виділяють технічний та економічний контур обліку. Економічний контур являє собою розрахунок вартості спожитої та згенерованої електроенергії. Розрахунок проводиться за двома контурами, які мають прив'язку до часових зон. Ці контури мають зв'язки в конкретні точки часу. Якщо інтервал, що розглядається зменшити, тобто зміни тарифу відбуваються на проміжку від 30 хв. до 15 хв. та 5 хв., то кількість таких зв'язків зростає і настає фактичне поєднання цих виділених контурів в один енергоекономічний контур.

Для аналізу особливостей формування електровартісної моделі Microgrid для розглянемо на прикладі системи з ДГ [15, 16].

Існуюча наразі система усталеної лінійної тарифікації не можуть враховувати нелінійності у середній витраті палива при виробництві потужності ДГ, яка має безпосередній економічний вплив на ефективність роботи будь-якої гібридної системи, яка має у складі такий ДГ. Для оптимізації роботи таких Microgrid необхідне створення гнучкої динамічної моделі тарифікації [15, 16]. Як наслідок, можемо говорити про створення динамічної електровартісної моделі ізольованої енергогенеруючої системи із ДГ. Систему «виробник – споживач електроенергії» схематично представимо як замкнену макроекономічну систему, де споживач отримує електроенергію потужністю P , а взаємін сплачує її вартість $C_p \cdot P$; C_p – ціна одиниці потужності. Система витрачає певну кількість отриманих коштів $C_B \cdot B$ на закупівлю пального B , де C_B – ціна одиниці пального, та на власні потреби [15, 16]. Економічну складову наведеної системи

доцільно розглядати як замкнену макроекономічну систему, баланс якої описується рівнянням Фішера [17, 18]:

$$M \cdot V = C \cdot Q, \quad (1)$$

де M – грошова маса, що робить один оберт за час T_v , [грн]; $V = T/T_v$ – кількість обертів грошової маси M за досліджуваний період часу T . Швидкість обороту залежить від обсягів економічної активності при заданій грошовій масі [17, 18]. Для розробки математичної моделі динамічної тарифікації доцільно розглядати інтервал часу в 1 с; C – ціна одиниці продукції, [грн./шт.]; Q – кількість виготовленої продукції [шт.] за час T . Приймаючи, що продукцією є електроенергія (кВт·сек), рівняння Фішера матиме вигляд:

$$M \cdot V = C_B \cdot B + C_P \cdot P. \quad (2)$$

Оскільки споживач в залежності від потреб може нарощувати або зменшувати обсяг споживаної електроенергії, що характеризується рівнем потужності, то за деякий проміжок часу Δt відбувається зміна рівня виробленої потужності споживання навантаження, при цьому рівнянні балансу прийме вигляд:

$$M \cdot V = C_B \cdot B + (C_P + \Delta C_P) \cdot (P + \Delta P), \quad (3)$$

де $\Delta C_P = (M \cdot V - C_B \cdot B - C_P \cdot P - C_P \cdot \Delta P - \Delta C_P \cdot \Delta P) / P$ – відповідна зміна тарифної ціни при зміні рівня потужності. Значення $\Delta C_P \cdot \Delta P$ не враховується, як мала величина другого порядку.

Приймаючи зміну тарифної ціни як $\Delta C_P = \frac{M \cdot V - C_B \cdot B}{P} - C_P \cdot \left(1 + \frac{\Delta P}{P}\right)$ та враховуючи, що $\Delta C_P = \frac{dC_P}{dt} \cdot \Delta t$, отримаємо рівняння:

$$\frac{dC_P}{dt} = \frac{M \cdot V - C_B \cdot B}{P \cdot \Delta t} - \frac{C_P \cdot \left(1 + \frac{\Delta P}{P}\right)}{\Delta t}, \quad (4)$$

яке описує динамічну зміну C_P в залежності від потужності, що забезпечує посекундну тарифікацію при $\Delta t = 1$ сек [15, 16].

Рівняння приросту потужності для ДГ можна отримати аналогічним чином із виразу для перетворення енергії згораючого первинного палива у вироблену потужність за 1 с. Із виразу для ККД ДГ отримаємо:

$$\frac{P}{\tau} = \frac{\eta_B}{\tau} \cdot P_T,$$

де η_B – ККД генератора; τ – стала часу генератора; P_T – потужність згораючого первинного палива. Приймаючи приріст потужності за одну секунду як $\frac{\Delta P}{\Delta t}$ та виразивши обсяг енергії згораючого палива за 1 с через величину B , отримаємо:

$$\frac{P}{\tau} + \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{\eta_B}{\tau} \cdot \gamma \cdot B,$$

де γ – коефіцієнт перетворення первинного палива у вироблену електричну потужність. Замінивши різницевий вираз на похідну отримаємо рівняння приросту потужності для ДГ:

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau} + \frac{\eta_B}{\tau} \cdot \gamma \cdot B. \quad (5)$$

Рівняння (4) та (5) складають динамічну електровартісну модель ізольованої енергогенеруючої системи:

$$\begin{cases} \frac{dC_P}{dt} = \frac{M \cdot V - C_B \cdot B}{P} - C_P \cdot \left(1 + \frac{\Delta P}{P}\right), \\ \frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau} + \frac{\eta_B}{\tau} \cdot \gamma \cdot B. \end{cases} \quad (6)$$

де $C_B \cdot B = \beta \cdot C_P \cdot P$; $\frac{1}{\beta}$ – коефіцієнт прибутку системи.

Для відображення зміни вихідного рівня генерованої потужності у сформованій електровартісній моделі (6) використовується складова ΔB , при тому, що M та V є незмінними. Прийнемо, що $\frac{\Delta B}{P}$ – обсяги

пального ΔB_p необхідні для переходу ДГ на новий, заданий рівень потужності. Можемо записати систему, у якій $\Delta B_p \cdot C_B$ та $\frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}$ – відповідні впливи, що задають величину динамічного приросту тарифної ціни та потужності генератора:

$$\begin{cases} \frac{dC_p}{dt} = \frac{M \cdot V}{P} - C_p \cdot \left(1 + \beta + \frac{\Delta P}{P}\right) - \frac{\Delta B \cdot C_B}{P}, \\ \frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot (\beta \cdot C_p \cdot P)}{\tau \cdot C_B} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}. \end{cases} \quad (7)$$

3. Алгоритм оцінки фінансових та технічних показників ефективності роботи Microgrid в динамічних режимах протягом певного технологічного періоду T_T

Для побудови алгоритму оцінки фінансових та технічних показників ефективності роботи Microgrid в динамічних режимах протягом певного технологічного періоду T_T надалі введемо наступні визначення. Нехай активна потужність $P(t)$ змінюється у часі протягом певного технологічного періоду T_T , який може складати хвилини, години тощо. Фактично $P(t)$ являє собою графік електричного навантаження (ГЕН) Microgrid. Обсяги споживання енергії позначимо як $W(t)$. Витрати первинного палива $B(t)$ зазвичай мають нелінійний характер і можуть бути визначені експериментально або шляхом використання номінальних характеристик. Витрати первинного палива також залежать від рівня споживання активної потужності $W(P)$. Для визначення вартості первинного палива C_B за інтервал T_T , слід врахувати тариф c_B , який може змінюватися довільно у часі або навпаки мати сталий характер (тобто $c_B = \text{const}$).

Для реалізації динамічної тарифікації в Microgrid на практиці, а саме для фіксації зміни кількості отриманої енергії у динамічному режимі, наведемо узагальнений алгоритм роботи обчислювача обсягів витрат палива та споживання електроенергії, який складається з кроків:

1. Установка початкових еталонів.
2. Введення i -го режиму. Контроль значень W та B та приростів ΔW та ΔB .
3. Перехід на новий режим $i=i+1$.
4. Обчислення миттєвої вартості палива $B_i(P)$ та електроенергії $W_i(P)$.
5. Визначення приростів вартості палива $\Delta B_i(P)$ та електроенергії $\Delta W_i(P)$.
6. Перевірка умови: чи знаходиться вартість у i -й зоні сталості тарифу: $\Delta B_i(P) > \varepsilon_{B(P)}$ та електроенергії $\Delta W_i(P) > \varepsilon_{W(P)}$ ($\varepsilon_{B(P)} > 0$ та $\varepsilon_{W(P)} > 0$).
7. Перехід на установку нового тарифу на електроенергію $W_i(T)$.
8. Контроль рівнів генерації та споживання електроенергії в Microgrid за i -м тарифом.
9. Формування поточного звіту електронних таблиць та графіків щодо миттєвих та інтегральних значень тарифів, генерації та споживання електроенергії в Microgrid.
10. Перехід при необхідності на 2 етап; у протилежному випадку перехід на етап 11.
11. Знімання інформації про миттєві та інтегральні характеристики в конкретні моменти часу.
12. Завершення роботи алгоритму.

В основу наведеного алгоритму покладено методологію динамічної тарифікації для системи Microgrid, що працює в ізолюваному режимі, зокрема, вирішення задачі розрахунку нової вартості базової частини енергії, при відхиленні обсягів генерованої енергії від деякого еталонного рівня, встановленого для даного інтервалу часу роботи локальної системи Microgrid.

Наведені динамічна електровартісна модель та узагальнений алгоритм роботи обчислювача можуть бути покладені в основу роботи Smart-лічильника з метою вирішення наступних задач:

1. Забезпечувати відображення миттєвих (миттєві потужності та миттєвий (усереднений за інтервал) тариф) та інтегральних (обсяги споживання електроенергії за зонами доби, за добу, тиждень тощо) характеристик.
2. Забезпечувати відображення графіка (функції) зміни тарифів, співставивши їх за величиною зміни генерації та споживання електроенергії (величиною небалансу), а також відображення величини проплачених / отриманих коштів на виділеному контрольованому інтервалі часу роботи Microgrid.
3. Здійснювати «зонування», тобто виділення мінімальних значень інтервалів часу, перебування в яких здійснюється зміна тарифів. Це також передбачає контроль за часом зміни потужності споживання та витрат палива в Microgrid, коли тарифи мають бути постійними.
4. Забезпечувати гнучкість роботи Smart Grid, до складу якої входить кілька Microgrid, для фіксованої точності вимірювання.
5. Визначення реального балансу витрат первинного палива та споживання електроенергії в Microgrid.
6. Уточнення дольової участі (технічної та економічної) об'єктів щодо обсягів генерації та споживання електроенергії, рівнів витрат електроенергії в системах передачі та розподілу.

7. Визначення дольової участі (технічної та економічної) елементів Microgrid у спотворення якості електроенергії (енергопостачання).

8. Оцінка реальних об'єктивних тарифів на електроенергію (таких, що змінюються в залежності від наявних (існуючих) режимів генерації електроенергії (ДГ, СЕС, ВЕС) та споживання).

9. Балансування рівнів генерації та споживання електроенергії в Microgrid, можливість оцінки рівнів неоптимальності.

10. Оцінка ролі системи накопичення (акумулявання).

11. Уточнення фінансових розрахунків (грошових потоків) між елементами Microgrid, як по горизонтальному, так і вертикальному рівням; зокрема, здійснення «квазіфінансових» розрахунків між елементами віртуальних електростанцій та елементами активних споживачів (з врахуванням механізмів керування попитом).

12. Планування закупівель обсягів первинного палива та можливих обсягів споживання електроенергії.

13. Формування сигналів для керування генерацією (ВДЕ) та електроспоживанням, у тому числі із залученням механізмів керування попитом.

14. Створення еталону ідеального тарифу для формування квазіоптимального тарифного плану, оцінки неоптимальності та прогнозування в залежності від інтервалу часу; можливість поєднання неоптимальності фінансової з неоптимальністю енергопроцесів за реактивною потужністю Фризе Q_{ϕ} .

4. Особливості функціонування ДГ; оцінка технічної і економічної (фінансової) ефективності його роботи

Для аналізу особливостей роботи ДГ в Microgrid спочатку коротко наведемо тенденції розвитку світового та українського ринків ДГУ [19].

Згідно зі звітом компанії Grand View Research, який був опублікований у 2018 році, світовий ринок ДГУ буде зростати зі швидкістю 6,8% на рік і до 2022 р. сягне 21,37 млрд. дол. [19]. У 2014 році найбільшим був сегмент малопотужних ДГУ (за класифікацією компанії, це пристрої до 350 кВА), який займав 49% ринку, однак з 2021 р. його частка може істотно скоротитися, оскільки відбулося динамічне зростання продажі високопродуктивних електростанцій. Малопотужні ДГУ стикаються зі зростаючою конкуренцією з боку установок на природному газі, хоча у високопродуктивному сегменті дизельні станції за вартістю експлуатації обходяться дешевше, ніж газові. Market Research Future (MRFR) прогнозує, що до 2023 року світовий ринок ДГУ буде рости щорічно зі швидкістю 6,5%. Ця компанія вважає, що домінуючим і найбільш швидкозростаючим залишатиметься найнижчий сегмент (в даному дослідженні до 500 кВт), що пов'язано з попитом на портативні та малопотужні генератори серед приватних осіб і малого бізнесу. Стаціонарні електростанції переважають над портативними в силу своєї поширеності в промисловому секторі та серед комерційних підприємств, а також завдяки широкому діапазону їх потужності (від 3 кВт до декількох МВт). У географічному розрізі основні продажі припадають на Азійсько-Тихоокеанський регіон, де знаходяться одні з найбільших економік світу – Японія, Китай і Індія.

Щодо продажів в Україні ДГУ різних торгових марок [19]. Перші позиції в грошовому обчисленні займають Aksa і Dalgakiran (по 8%), за ними розташовуються Fogo, Cummins і FG Wilson (по 6%). Сегмент 32–250 кВА учасники ринку оцінюють в 600–1000 одиниць. Тут перші місця займають торгові марки Dargex Energy, Dalgakiran, Fogo і Green Power. До числа «інших» входять також Aksa і JCB, але їх частки оцінити не вдалося. Обсяг сегмента 250–550 кВА оцінюється в 125–350 ДГУ, обсяги продажів зростання приблизно на 10%. На лідируючу позицію вийшла марка Fogo, за нею – Green Power, Dalgakiran і FG Wilson. Результати в сегменті понад 550 кВА – близько сотні ДГУ. Продажі тут у порівнянні з 2018 роком зросли приблизно на чверть. Звичайно, в цьому сегменті один великий проєкт може змінити всю картину; зокрема, таке впровадження завершила у 2017 році «Далгакіран Компресорс Інтернешнл», яка постачала електростанції Cummins для НАЕК «Енергоатому».

Важливою вимогою, що пред'являються до всіх типів ДГУ в складі Microgrid є економічність [20, 21]. Рівень економічності оцінюють виходячи з обсягу пального, необхідного для генерації одного кіловата електроенергії протягом години. Таку систему оцінки використовують в країнах Європи та більшості країн Азії. Режими роботи ДГУ щодо рівнів генерованої потужності відповідно до стандарту ISO 8528 розділяються наступним чином:

- *COP (Continuous power)* – необмежений час експлуатації при постійному навантаженні. Можливість роботи на 100% заявленої в цьому рейтингу потужності (приклад: безперервне джерело живлення паралельно з мережею);

- *PRP (Prime power)* – необмежений час експлуатації при змінному навантаженні, що не перевищує в середньому 70% заявленої потужності (приклад: основне джерело електроживлення при відсутності живлення мережі);

- *LTP (Limited time running power)* – обмежений час експлуатації (не більше 500 год. / рік на рік) при

постійному навантаженні (приклад: базове джерело для зняття піків в паралельну роботу);

- *ESP (Emergency standby power)* – обмежений час експлуатації (не більше 200 год. / рік на рік) при змінному навантаженні (приклад: резервне джерело живлення).

Номинальна потужність генератора розраховується для задоволення максимальної потреби в електричних навантаженнях, які вимагають, зокрема, резервного живлення. Існує чотири класи регулювання, які визначають якість електроенергії ДГ з точки зору стабільності, напруги і безперебійності. Чим вище клас, тим жорсткіші вимоги:

- *Клас G1* – електрогенератори для навантажень загального призначення (системи загального застосування – освітлення та інші прості традиційні електричні навантаження).

- *Клас G2* – електрогенератори для систем, де нормативи не є критичними і допускаються тимчасові відхилення (системи освітлення; насоси, вентилятори і підйомники);

- *Клас G3* – електрогенератори для систем, де вимоги до характеристик енергопостачання помірно жорсткі (телекомунікаційна апаратура та напівпровідникові системи керування, пристрої силової електроніки не повинні спотворювати синусоїдальність кривої напруги).

- *Клас G4* – електрогенератори для систем, де вимоги до характеристик енергопостачання жорсткі (системи обробки даних або обчислювальні системи).

Підвищення енергетичної ефективності ДГ є однією з найбільш актуальних завдань побудови Microgrid [22]. Одним з перспективних шляхів вирішення даного питання є розробка «інверторних» дизельних установок, які передбачають переведення дизельного двигуна на змінну частоту обертання, відповідно до його поточного завантаження. Вихідна напруга такої установки приводиться до стандартних параметрів за допомогою перетворювача частоти. Умови роботи ДГ в складі такого енергетичного комплексу характеризуються можливістю зниження частоти обертання до 40% відносно номінальної залежно від ступеня завантаження станції.

Залежно завантаження магнітоелектричного генератора від частоти обертання приводного дизельного двигуна дозволили встановити зв'язок між вхідним струмом напівпровідникового перетворювача і частотою за умови мінімальної питомої витрати палива дизельного двигуна (рис. 2). Дані залежності можуть бути корисні при формуванні алгоритму керування перетворювачем.

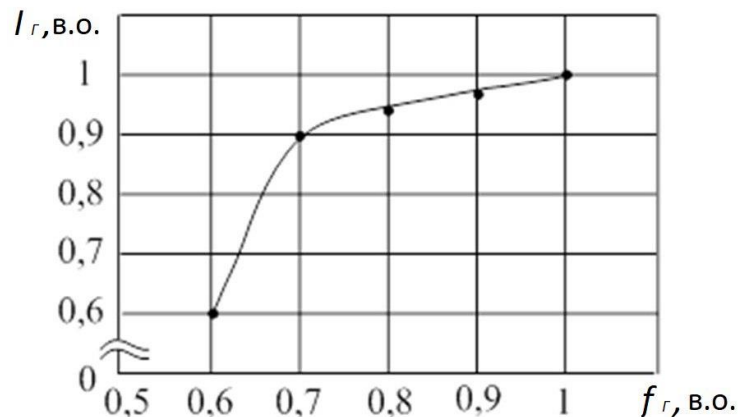


Рисунок 2 – Залежності струму навантаження I_g від частоти f_g синхронного генератора

Отже, взаємопов'язані зміни генерованої потужності та частоти обертання синхронного генератора, що працює в складі інверторної ДЕС, за критерієм мінімальної витрати палива, скорочує діапазон зміни вихідного напруги генератора і змінює його коефіцієнт завантаження, що трохи полегшує умови роботи магнітоелектричного генератора і вентиляного перетворювача.

Для наближеного розрахунку питомої ефективної витрати палива ДГУ використовують формулу множення потужності на коефіцієнт 0,184–0,220 кг / кВт·год. Формула виведена практичним шляхом – встановлено, що на виробництво 1 кВт·год витрачається приблизно 184 – 200 г дизпалива.

Витрата дизельного палива – важливий параметр при виборі ДГУ [23 – 26]. У порівнянні з бензиновими аналогами ДГУ вдвічі економніше. Єдиної норми по витраті пального для ДЕС не існує. На рівень споживання впливає низка факторів: від розмірів і ваги пристрою до умов навколишнього середовища. Наведемо фактори, які впливають на витрату палива ДГ [24]: існує залежність витрати палива від навантаження на генератора; погода; якість палива (від якості палива залежить не тільки витрата, але й термін служби двигуна); кількість відпрацьованих мотогодин і періодичність техобслуговування дизельного генератора; обсяг паливного бака; потужність; марка двигуна. Споживання ДГ також залежить

не тільки від моделі, але й від дотримання низки інших умов: відповідності номінальної потужності і навантаження; стани повітряних, масляних і паливних фільтрів, поршнів, ступеня зносу двигуна; справність електронної системи керування; використання сезонних видів палива, що відповідають ДСТУ [25, 26]. Так, занадто низька температура, яка призводить до загустіння палива, через що істотно знижується ефективність роботи дизельної установки. При неправильній подачі повітряно-паливного складу в агрегат споживання палива зростає приблизно на 25%. Пристрій розміщено в погано вентильованому приміщенні, що збільшує споживання палива. При використанні неякісного палива з домішками і сторонніми об'єктами витрата пального може значно збільшуватися.

У табл. 1 наведено приклад витрати палива для дизельного генератора потужністю 10 – 100 кВт [26].

Коротко наведемо аналітичні залежності витрат палива в ДГ, які доцільно застосовувати при уточненні запропонованих динамічної електровартісної моделі та узагальненого алгоритму роботи обчислювача, відповідної модифікації Smart-лічильника.

Таблиця 1 – Витрати палива для дизельного генератора потужністю 10 – 100 кВт

Тип двигуна	Mitsubishi	Perkins	Iveco	Iveco
Потужність ДГУ, кВт	10	30	50	100
Навантаження, %	75	75	75	75
Витрати, л/год.	2,5	6,1	10,3	20,2

Як вже зазначалося, на 1 кВт·год. електроенергії дизель генератора потрібно в середньому 200 г пального [27]. Його питома витрата можна обчислити за формулою: $Q = q \cdot N$, де q – маса споживаного палива; N – значення номінальної потужності пристрою. Наприклад, генератору потужністю 100 кВт на годину безперервної роботи буде потрібно близько 20 л пального, агрегату 15 кВт буде досить 3 – 4 л. Ці обчислення є приблизними. Наприклад, витрата дизельного генератора YEG230DTLS-5R номінальною потужністю 13,6 кВт при 70% навантаженні становить 2,94 л/год., а моделі YH550DTLS-5R на 33 кВт – 7,58 л/год. Для нормальної роботи електростанції рекомендується, щоб її номінальна потужність на 25% перевищувала потужність обладнання навантаження, тобто при номінальній потужності обладнання в 24 кВт рекомендована межа повинен становити 30 кВт.

Наведемо особливості методики розрахунку витрати палива в ДГ [28]. Зазвичай в документах на ДГ вказується витрата при 75% навантаженні на агрегат, який не відображає реальну картину при роботі в інших режимах. Середньорічний питомий розрахунок витрати палива для ДГУ з визначенням потужності дизельної установки обчислюється за формулою:

$$b = (g_e \cdot H \cdot C \cdot 1,36) / \eta_{\Gamma} + B_x / E, \quad (8)$$

де g_e – питома витрата палива при номінальній потужності в 75%, (береться за паспортом); H – коефіцієнт, що враховує навантаження; C – коефіцієнт зношеності двигуна; η_{Γ} – ККД дизель-генератора в залежності від режиму роботи; E – заплановане виробництво електроенергії в кВт·год; B_x – витрата палива установки на холостому ходу, що розраховується за формулою:

$$B_x = 0,15 \cdot N_e \cdot g_e \cdot K_x \cdot C \cdot n, \quad (9)$$

де K_x – коефіцієнт витрати на холостому ходу, що дорівнює 0,21 для установок потужністю менше 1000 к.с. та 0,17 для більш потужних генераторів; N_e – номінальна потужність генератора в к.с.; n – плановане число запусків двигуна. Параметр B_x / E зазвичай занадто малий, і його можна не враховувати в розрахунках. Величину ККД при зміні навантаження рекомендується обчислювати пропорційно, від номінального значення.

Майже аналогічна співвідношенням (8) та (9) інша методика розрахунку пропонує формулу:

$$b = (1,05 \cdot g_e \cdot K) / \eta_{\Gamma} + (1,05 \cdot K_x \cdot g_e \cdot N_e \cdot 0,15) / E, \quad (10)$$

Використовуються ті ж показники, тільки з різницею у застосуванні коефіцієнтів. Якщо в першому

варіанті для врахування зміни навантаження і зносу генератора використовується величина $H \cdot C / \eta_{\Gamma}$, то в другому варіанті цей показник дорівнює $1,05 \cdot K$. Він характеризує зростання витрат через коливання навантаження та розраховується за формулою:

$$K = 0,87 + 0,13 \cdot (N_e / N_{cp}). \quad (11)$$

Окремі значення коефіцієнтів, що враховують навантаження на ДГ і ступінь його зносу (співвідношення (10) та (11)), представлені в табл. 2.

Методика розрахунку нормативів питомих витрат палива по дизельним електростанціям [29]. Розрахунки норм питомих витрат (НПВ) по ДЕС виконуються на основі паспортних даних дизель-генераторів, навантажувальних характеристик дизелів, регульовальних характеристик ДГ, прийнятих за довідковою літературою або за даними заводів-виробників обладнання.

У паспортних та довідкових даних вказуються технічні параметри, відповідні режиму номінальної потужності ДГ: питома витрати палива, ККД генератора, потужності дизеля і дизель-генератора тощо. НПВ визначаються шляхом введення коригувальних коефіцієнтів до паспортних питомих витратами палива на прогнозовану навантаження, знос двигуна, пуски і зупинки, відпуску тепла від утилізаційних газо-водогрійних котлів, споживання електроенергії на власні потреби, теплотворну здатність палива. Розрахунки НПВ виконуються по кожному ДГ, встановленому на електростанції, і в цілому по ДЕС. При цьому, витрати електроенергії на власні потреби ДЕС, за винятком циркуляційних насосів системи тепlopостачання, відносяться на електроенергію, витрати тепла на власні потреби ДЕС відносяться до виробничих потреб.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів H та C в залежності від навантаження ДГ відносно номінальної потужності

Навантаження відносно номінальної потужності, %	Коеф. H	Коеф. C
100	1,00	1,015 – 1,020
95	1,025 – 1,035	1,020 – 1,030
90	1,030 – 1,040	1,030 – 1,035
85	1,040 – 1,055	1,030 – 1,040
80	1,050 – 1,055	1,035 – 1,045
75	1,050 – 1,065	1,035 – 1,050
70	1,055 – 1,060	1,040 – 1,050
65	1,060 – 1,075	1,040 – 1,050
60	1,070 – 1,080	1,050 – 1,060
50	1,085 – 1,090	1,050 – 1,070
40	1,115 – 1,125	1,060 – 1,080

5. Витрата палива ДГ в системі

На основі даних, наданих додатком «Калькулятор витрати палива дизельного генератора» ресурсу [30], була виконана побудова залежності середньої витрати палива \bar{V} (л/год.) від потужності ДГ P (кВт) для трьох значень середнього навантаження на генератор у відсотках. Було розглянуто наступні значення середнього навантаження на генератор – 50%, 75%, 100%. При цьому враховується, що час роботи генератора становить 1 год.

Графіки на рис. 3 відображають пряму залежність $\bar{V} = f(P)$, а графіки на рис. 4 – зворотну залежність $P = f(\bar{V})$. Діапазони зміни потужності ДГ обрані наступними: 200 – 300 кВт, 500 – 600 кВт, 700 – 800 кВт, 900 – 1000 кВт з кроком 20 кВт.

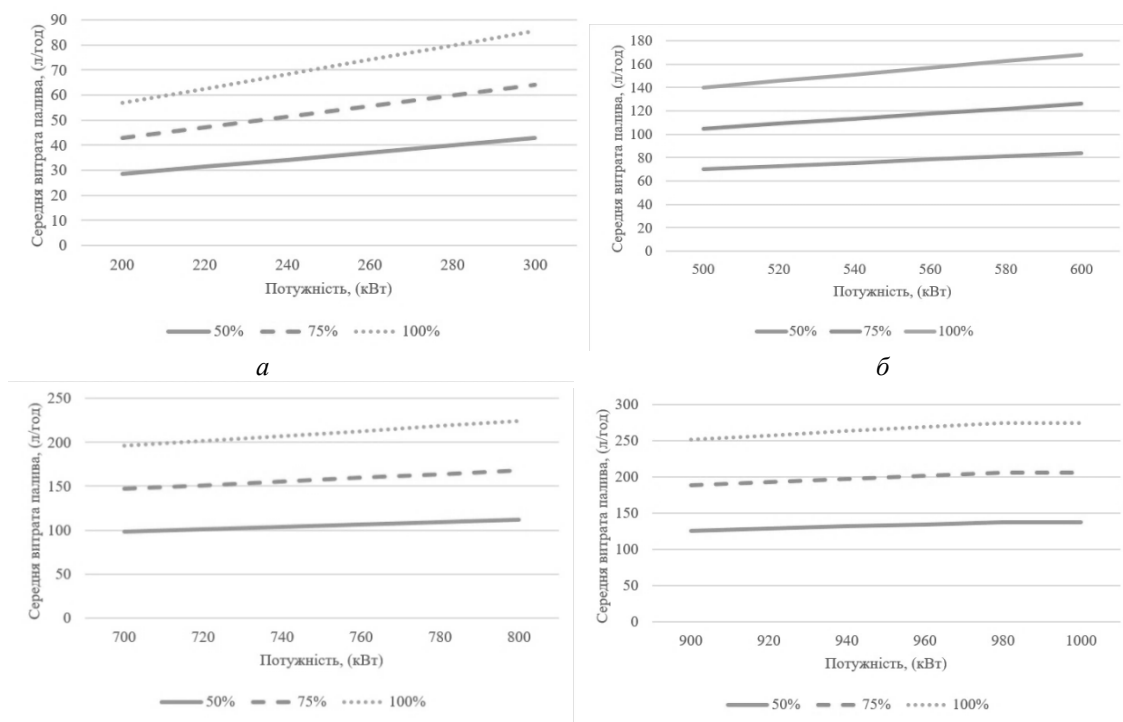


Рисунок 3 – Розрахунок прямої залежності $\bar{V} = f(P)$

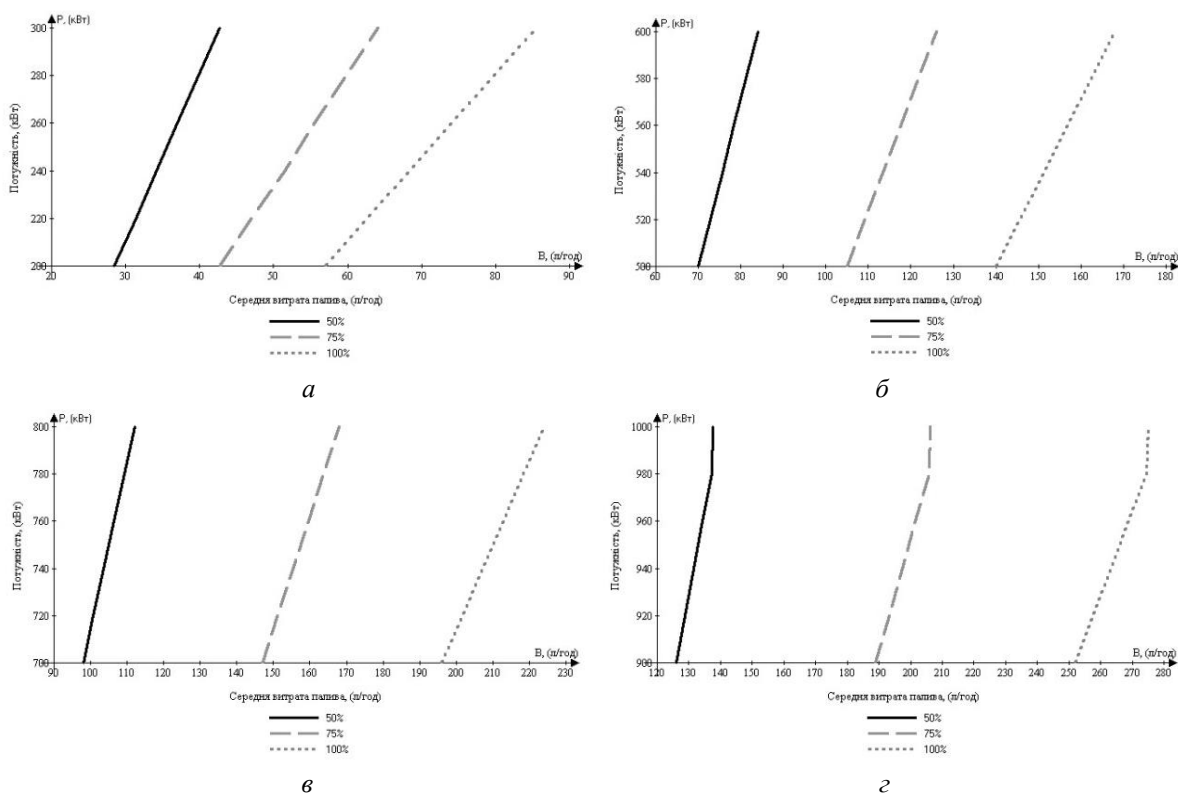


Рисунок 4 – Розрахунок зворотної залежності $\bar{V} = f(P)$

Необхідно зазначити, що при розрахунку наведених на рис. 3 та 4 залежностей зменшення кроку приросту потужності при побудові наведених функціональних залежностей стає помітною нелінійністю функціональних залежностей як функція від витрати палива.

Звичайно, фактичні результати будуть відрізнятися від наведених вище, оскільки вони, як вже зазначалося, залежать від ККД і технічного стану ДГ, температури палива і навколишнього середовища.

Висновки

1. Проведений аналіз показав, що підвищення енергоефективності Microgrid з ДГ вимагає вирішення проблеми оптимізації режимів роботи локальних системи енергозабезпечення (Microgrid) з використанням в якості оптимізаційного критерія зниження витрат первинного палива ДГ. Для дослідження енергоефективності роботи таких типів Microgrid в якості критерію, що має безпосередній вплив на обсяг генерованої електроенергії, обрано адекватний облік витрат первинного палива при генерації заданого обсягу електроенергії в системі.

2. Визначено, що одним з важливих показників ДГУ є її економічність, яка визначається відношенням енергії, що виробляється, до витрати палива за годину роботи при номінальному навантаженні. Зниження витрати палива дозволяє підвищити ефективність роботи ДЕС. Різні типи усталених та перехідних режимів роботи ДГУ суттєво впливають на ефективність роботи Microgrid з точки зору як технічної, так і фінансової ефективності.

3. Для підвищення техніко-економічних показників в Microgrid з ДГ було запропоновано використати електроваріаційну модель енергогенеруючої системи, що дозволяє розраховувати як динамічну зміну генерованої потужності, так і динамічну зміну її вартості та вартості первинного палива. Дана модель дає можливість гнучкого нелінійного відстеження витрат палива, що з урахуванням вартості дизельного палива може слугувати у якості економічного критерія для визначення енергоефективності роботи генеруючої системи.

4. Запропонований алгоритм оцінки фінансових та технічних показників ефективності роботи Microgrid в динамічних режимах протягом певного технологічного періоду T_T дозволяє не тільки оцінити економічну та енергетичну ефективність Microgrid з ДГ, але й може бути застосований при модифікації Smart-лічильників, що дозволяє суттєво розширити їх функціональні можливості.

Список використаної літератури

1. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву, затверджений постановою НКРЕКП № 605 від 13.03.2020 р.

2. Интеллектуальные электрические сети: элементы та режимы: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.

3. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Анализ режимов загрузки магнитоэлектрического генератора инверторной дизельной электростанции // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2.; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12346>.

4. The Advanced Microgrid Integration and Interoperability Sandia National Laboratories. Март 2016

5. Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources // Shaun Howell, Yacine Rezgui, Jean Laurent Hippolyte, Bejay Jayan, Haijiang Li. – Вересень 2017. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117304392>

6. Синеглазов В.М. Перспективи розвитку гібридних енергетичних систем. URL: <https://enerhodzherela.com.ua/analytyka/>.

7. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2.; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8615>.

8. Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Тарасов И.М. Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 2. – С. 53–56.

9. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций // Научное обозрение. Технические науки. – 2014. – № 1. – С. 237–238.

10. Joskow Paul L., Wolfram Catherine D. Dynamic Pricing of Electricity // American Economic Review. – 2012. – 102 (3). – P. 381–85.

11. Chopra S., Meindl P. Supply Chain Management, Third. – New Jersey: Prentice Hall, 2007.

12. Yalcintas M., Hagen W.T., Kaya A. An analysis of load reduction and load shifting techniques in commercial and industrial buildings under dynamic electricity pricing schedules // Energy Build. – 2015. – Vol. 88. – P. 15–24.

13. Shirazi E., S. Jadid S. Optimal residential appliance scheduling under dynamic pricing scheme via NEMDAS // Energy Build. – 2015. – Vol. 93. – P. 40–49.

14. Hongbo Zhu, Yan Gao, Yong Hou. Real-Time Pricing for Demand Response in Smart Grid Based on Alternating Direction Method of Multipliers // Mathematical Problems in Engineering. – 2018. – 10 p.

15. Boiko I. Relevance of Dynamic Tariffication Application for Microgrid Generation Systems // Energy: Economics, Technology, Ecology // 2019. – № 3 (57). – P. 23–29.
16. Zhuikov V.I., Boiko I.Y., Denysiuk S.P. Model of dynamic tariffing Microgrid's electricity consumption in local energy markets. Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, IX (31), Issue: 250, 2021 Feb. – P. 50–53.
17. Bordo Michael D. Equation of exchange // The New Palgrave: A Dictionary of Economics. – 1987 – V. 2. – P. 175–177.
18. Kramer J. S. The New Palgrave: A Dictionary of Economics. – 1987. – V. 4. – P. 601–602.
19. Український ринок дизель-генераторів в 2018 році. Травень 21, 2019 «Мережа і бізнес»; В. Ткаченко; Дослідження ринку ДГУ «Мережа і бізнес». <https://generator.ua/masters>
20. http://www.know-house.ru/avtor/0028/diesel_generator_fuel.html
21. Дизельні електростанції – основні характеристики. URL: <https://pogliad.ua/news/com-news/profesiyniy-krugozir/dizelni-elektrostanciyi---osnovni-harakteristiki-374868>.
22. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Анализ режимов загрузки магнитоэлектрического генератора инверторной дизельной электростанции // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12346>.
23. http://www.know-house.ru/avtor/0028/diesel_generator_fuel.html
24. <https://fogo.ua/ru/stati/7-faktorov-vlijajushhih-na-rashod-topliva-dizel-generatora/>
25. <https://1kwt.com/dizelnaja-elektrostantsija-na-100-kvt-rashod-topliva>
26. http://www.know-house.ru/avtor/0028/diesel_generator_fuel.html
27. <https://www.yanmarrus.ru/about/statyi-i-obzory/raskhod-topliva-dizelnogo-generatora/>
28. <https://www.jcbgenerators.ru/tehnicheskaya-biblioteka/kak-schitaetsya-raskhod-topliva-dizelnogo-generatora.html>
29. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_56377/ab28c1730667f75a2c4c3be8b4f92ea3e11573d2/
30. Калькулятор расхода топлива дизельного генератора. [Электронный ресурс] // URL: <https://mechatronics.by/service/utilities/diesel-genset-fuel-consumption/>

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

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

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

INCREASING MICROGRID ENERGY EFFICIENCY WITH DIESEL GENERATORS

It is shown that increasing the energy efficiency of Microgrid with diesel generators requires solving the problem of optimizing the modes of operation of Microgrid using as an optimization criterion for reducing the consumption of primary fuel diesel generators. To study the energy efficiency of such types of Microgrid as a criterion that has a direct impact on the amount of electricity generated, selected adequate accounting of primary fuel consumption when generating a given amount of electricity in the system.

The article determines that one of the important indicators of diesel generator sets is their efficiency, which is determined by the ratio of energy produced to fuel consumption per hour of operation at rated load. It is shown that the reduction of fuel consumption allows to increase the efficiency of diesel generators, and different types of steady and transient modes of diesel generators significantly affect the efficiency of Microgrid in terms of technical and financial efficiency.

To improve the technical and economic indicators in Microgrid with diesel generators, the article proposes to use the electric cost model of the power generation system, which allows to calculate both the dynamic change of generated power and the dynamic change of its cost and the cost of primary fuel. This model allows flexible nonlinear tracking of fuel consumption, which, taking into account the cost of diesel fuel, can serve as an economic criterion for determining the energy efficiency of the generating system.

The article presents an algorithm for evaluating the financial and technical performance of Microgrid in dynamic modes over a period of technology, which not only evaluates the economic and energy efficiency of Microgrid with diesel generators, but can also be used to modify Smart meters, which can significantly expand their functionality.

Keywords: *energy efficiency improvement, financial and technical indicators, Microgrid, diesel generator, hybrid power supply system, dynamic electric cost model, Smart meters.*

References

1. Report on the assessment of compliance (sufficiency) of generating capacity to cover the projected demand for electricity and provide the necessary reserve, approved by the resolution of the NKREKP № 605 from 13.03.2020

2. Intelligent electrical networks: elements and modes: According to the general. ed. acad. NAS of Ukraine O.V. Kyrylenko / Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. – Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. – 400 p.
3. Lukutin B.V., Shandarova E.B. Analysis of loading modes of a magnetoelectric generator of an inverter diesel power plant // Modern problems of science and education. – 2014. – № 2.; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12346>.
4. The Advanced Microgrid Integration and Interoperability Sandia National Laboratories. Mapr 2016
5. Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources // Shaun Howell, Yacine Rezgui, Jean Laurent Hippolyte, Bejay Jayan, Haijiang Li. – September 2017. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117304392>
6. Sineglazov V.M. Prospects for the development of hybrid energy systems. URL: <https://enerhodzherela.com.ua/analitika/>.
7. Lukutin B.V., Shandarova E.B. Ways to reduce fuel consumption of diesel power plants // Modern problems of science and education. – 2013. – № 2.; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8615>.
8. Khvatov O.S., Darienkov A.B., Tarasov I.M. Diesel-generator power plant with variable shaft rotation frequency // Bulletin of ISEU. – 2010. – Issue. 2. – P. 53–56.
9. Lukutin B.V., Shandarova E.B. Ways to reduce fuel consumption of diesel power plants // Scientific Review. Technical sciences. – 2014. – № 1. – P. 237–238.
10. Joskow Paul L., Wolfram Catherine D. Dynamic Pricing of Electricity // American Economic Review. – 2012. – 102 (3). – P. 381–85.
11. Chopra S., Meindl P. Supply Chain Management, Third. – New Jersey: Prentice Hall, 2007.
12. Yalcintas M., Hagen W.T., Kaya A. An analysis of load reduction and load shifting techniques in commercial and industrial buildings under dynamic electricity pricing schedules // Energy Build. – 2015. – Vol. 88. – P. 15–24.
13. Shirazi E., Jadid S. Optimal residential appliance scheduling under dynamic pricing scheme via HEMDAS // Energy Build. – 2015. – Vol. 93. – P. 40–49.
14. Hongbo Zhu, Yan Gao, Yong Hou. Real-Time Pricing for Demand Response in Smart Grid Based on Alternating Direction Method of Multipliers // Mathematical Problems in Engineering. – 2018. – 10 p.
15. Boiko I. Relevance of Dynamic Tariffication Application for Microgrid Generation Systems // Energy: Economics, Technology, Ecology // 2019. – № 3 (57). – P. 23–29.
16. Zhuikov V.I., Boiko I.Y., Denysiuk S.P. Model of dynamic tariffing Microgrid's electricity consumption in local energy markets. Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, IX (31), Issue: 250, 2021 Feb. – P. 50–53.
17. Bordo Michael D. Equation of exchange // The New Palgrave: A Dictionary of Economics. – 1987 – V. 2. – P. 175–177.
18. Kramer J. S. The New Palgrave: A Dictionary of Economics. – 1987. – V. 4. – P. 601–602.
19. Ukrainian market of diesel generators in 2018. May 21, 2019 "Network and Business"; V. Tkachenko; Market research of DGU "Network and Business". <https://generator.ua/masters>
20. http://www.know-house.ru/avtor/0028/diesel_generator_fuel.html
21. Diesel power plants – the main characteristics. URL: <https://pogliad.ua/news/com-news/profesiyniy-krugozir/dizelni-elektrostanciyi---osnovni-harakteristiki-374868>.
22. Lukutin B.V., Shandarova E.B. Analysis of loading modes of the magnetoelectric generator of the inverter diesel power plant // Modern problems of science and education. – 2014. – № 2; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12346>.
23. http://www.know-house.ru/avtor/0028/diesel_generator_fuel.html
24. <https://fogo.ua/ru/stati/7-faktorov-vlijajushhih-na-rashod-topliva-dizel-generatora/>
25. <https://1kwt.com/dizelnaja-elektrostantsija-na-100-kvt-rashod-topliva>
26. http://www.know-house.ru/avtor/0028/diesel_generator_fuel.html
27. <https://www.yanmarrus.ru/about/statyi-i-obzory/raskhod-topliva-dizelnogo-generatora/>
28. <https://www.jcbgenerators.ru/tekhnicheskaya-biblioteka/kak-schitaetsya-raskhod-topliva-dizelnogo-generatora.html>
29. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_56377/ab28c1730667f75a2c4c3be8b4f92ea3e11573d2/
30. Diesel generator fuel consumption calculator. [Electronic resource] // URL: <https://mechatronics.by/service/utilities/diesel-genset-fuel-consumption/>

Надійшла 15.07.2021
Received 15.07.2021

В.І. Дешко, д-р. техн. наук, проф. ORCID 0000-0002-8218-3933
М.М. Шовкалюк, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-1898-3493
Н.С. Гончаров, магістр ORCID 0000-0002-4175-8868
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Н.В. Політикiна, експерт-енергоаудитор MistoEnergy, ORCID 0000-0002-7294-3492

ІНДИВІДУАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ СПОЖИВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ У БАГАТОКВАРТИРНОМУ БУДИНКУ: ПРАКТИЧНИЙ ДОСВІД

Вартість виробництва теплової енергії невинно зростає, в середньому тарифи по областях України за останні роки збільшилися втричі. Складова оплати за опалення у комунальних витратах є основною для більшості багатоквартирних будівель, але через особливості централізованих систем тепlopостачання мешканці не мають впливу на рівень споживання теплової енергії, до того ж існує проблема нерівномірного розподілу теплоти: одні приміщення є перегрітими, інші - недогрітими. Модернізація інженерних систем опалення з установкою терморегуляторів та приладів-розподільовачів теплоти – один із найбільш обговорюваних на загальних зборах ОСББ захід з енергозбереження, який цікавить більшість мешканців будівель, що експлуатуються. Як показує досвід, після встановлення таких приладів споживання теплової енергії будівлями знижується, що призводить до скорочення витрат на опалення. Актуальність теми даної статті полягає у вивченні сучасних методів індивідуального розподілу теплової енергії в багатоквартирних будинках, зокрема в будинках із вертикальною системою опалення. Об'єктом дослідження є існуючий багатоквартирний будинок у м.Києві, де починаючи з 2019 року були введені в експлуатацію прилади-розподільовачі теплової енергії. Предметом дослідження є методи розподілу споживання тепла між помешканнями та аналіз практичних результатів впровадження такого проєкту в існуючій серійній будівлі у м.Києві.

Ключові слова: багатоквартирна будівля, теплоспоживання, індивідуальний облік, прилади-розподільовачі

Вступ

Одним з основних споживачів теплової енергії в Україні є населення: кінцеве енергоспоживання домашніми господарствами у 2019 році складало 28,4% від загального [1]. Значну частину будівельного фонду складають багатоповерхові будівлі різної енергоефективності. При централізованому опаленні здійснюється якісне регулювання залежно від погодних умов на джерелі енергії, а також регулювання у теплових пунктах, проте існують резерви економії, пов'язані з перегопами у перехідні періоди і відсутністю можливості місцевого регулювання потоку теплової енергії безпосередньо в окремих приміщеннях. Одним із завдань Енергетичної стратегії України до 2035 р. [2] відповідно до вимог Директив ЄС [3,11] є підвищення ефективності діючих систем централізованого тепlopостачання, а також очікується модернізація та вдосконалення систем обліку. Більшість будинків в Україні вже оснащено загальнобудинковими засобами обліку тепла [4], однак ще чимало будівель (до 20%) отримують платіжки залежно від теплового навантаження будівлі, без урахування реального споживання. З індивідуальним (квартирним) обліком теплоти ситуація більш складна. В більшість новобудов із горизонтальною системою опалення, квартирні лічильники тепла закладаються ще на етапі проектування. Однак, більш старі багатоквартирні будівлі (збудовані до 2000 р.) таких систем або не мають, або мешканці встановлюють їх за власний рахунок. В будинках із вертикальною системою опалення альтернативою до теплових лічильників виступають так звані прилади-розподільовачі теплової енергії. На відміну від лічильників тепла, вони обраховують не кількість спожитої енергії, а її частку від загального споживання для кожного опалювального приладу в будівлі.

Використання приладів-розподільовачів – це загальноєвропейська практика, однак в Україні їх встановлення стало можливим із введенням у дію законів України [5,6] та інших нормативних документів [7,8]. У Законах України [9,10] та підзаконних актах до них встановлення засобів обліку та регулювання споживання енергетичних ресурсів вказано як один із основних заходів для підвищення рівня енергоефективності будівель.

Прилад-розподільовач теплової енергії (розподільник) – це складний електронний прилад, який реєструє умовні одиниці споживання теплової енергії опалювального пристрою, на якому він

встановлений. Технічним стандартом на продукцію є ДСТУ EN 834:2017 [12], який забезпечує вимоги до виробництва, монтажу, експлуатації розподільників тепла. Розподільники з одним датчиком вимірюють тільки температуру самого радіатора, а з двома – радіатора та внутрішнього повітря. Прилади-розподілювачі не вимагають втручання в інженерні системи будинку, вони встановлюються безпосередньо на поверхні опалювального приладу, але положення розподільника на радіаторі має принципове значення.

Енергетична криза 1970-х сприяла поширенню індивідуального обліку, але масштабне їх розповсюдження у країнах ЄС відбулося у 1980-х, коли почали з'являтися перші електронні розподільники. З 2016 року розподіл спожитого тепла або його облік є обов'язковими відповідно до Європейської директиви [11], держави-члени ЄС ввели національні правила розподілу опалення приміщень або споживання гарячої води в багатоквартирних будинках, що живляться від системи центрального теплопостачання. Застосування на практиці прийнятої в Україні методики розрахунків [8] є на сьогоднішній день актуальним і недостатньо вивченим питанням, тому потребує детальної уваги.

Мета та задачі

Метою статті є дослідження питання індивідуального обліку теплоспоживання у існуючих багатоквартирних будівлях з вертикальним розведенням системи опалення та аналіз застосування затвердженої методики розподілу теплової енергії при використанні приладів-розподілювачів. Відповідно до мети роботи були поставлені такі **завдання**:

- збір загальної інформації про прилади-розподілювачі теплової енергії, їх види та принципи роботи;
- аналіз діючої нормативної бази стосовно проблеми індивідуального обліку теплової енергії;
- аналіз прийнятої в Україні методики розподілу теплової енергії з визначенням основних проблем, що виникають під час її застосування;
- аналіз практичних результатів розподілу теплової енергії в багатоквартирній будівлі у м.Києві.

Практична цінність даного дослідження полягає у розвитку підходів до індивідуального обліку теплової енергії в існуючих будівлях, що експлуатуються, в тому числі в будівлях із вертикальною системою опалення.

Огляд останніх досліджень і публікацій

Вимірювання та виставлення рахунків фактичного індивідуального споживання мають сенс, якщо користувач обладнаний термостатичними клапанами для адаптації використання опалення до його потреб. Кількість тепла, що подається до певної квартири і кількість тепла, що споживається в квартирі – не дорівнюють одне одному, зважаючи на теплові потоки між квартирами. Дослідження латвійських вчених [13] показало, що теплові надходження від неізольованих трубопроводів, що знаходяться в квартирах (стояків опалення), коливаються від 22,5% до 4,1%. В роботі [13] проаналізовано також вплив приладів-розподілювачів на поведінку мешканців багатоквартирної будівлі. Через відсутність теплоізоляції, теплота легко перетікає між сусідніми квартирами та кімнатами з різною температурою повітря. Це явище аналізується в ряді наукових праць [14,15]. Гафса і Лефевр [16] називають кількість тепла, яке перетікає від однієї квартири до іншої – «викрадене тепло». Дослідження показали [15], що комфортна температура в квартирі з меншою кількістю зовнішніх стін може бути майже повністю забезпечена теплом із сусідніх квартир. Дані про споживання тепла будівлями з розподільниками, проаналізовані Зігельстеном, показують, що протягом першого року, після встановлення розподільників, можна досягти близько 9% економії енергії, але в найближчі роки вона може досягати до 20% [17]. Вчені також вивчали споживання тепла різними групами споживачів, залежно від соціально-економічних факторів домогосподарства [18]. Основним висновком цього дослідження є те, що домогосподарства, які менш мотивовані економити енергію, мають на 4% більше споживання тепла, порівняно з іншими домогосподарствами. Ключовим фактором, що впливає на споживання тепла, є температура в приміщенні та рівень комфорту споживачів [19]. В статті [20] також аналізується проблема перетоків теплової енергії між приміщеннями в будівлях.

У [21] наведено, що реальні умови експлуатації приладів-розподілювачів часто відрізняються від ідеальних умов, що використовуються для калібрування цих пристроїв, що є джерелом багатьох проблем. Умови, що призводять до зниження точності вимірювань приладами-розподілювачами [21]:

- невідомі технічні характеристики опалювальних пристроїв (наприклад, у історичних будівлях);
- накопичення повітря у приладах системи опалення;
- утворення накипу та накопичення брудного осаду;
- наявність штор перед радіатором або екранів, або розташування радіатора в дуже глибокій ніші з вираженою верхньою полицею створюють дуже теплий мікроклімат навколо радіатора;
- помилки при установці (невідповідність позиціонування на 5-10 мм дає помітні похибки);
- теплові характеристики радіатора змінюються залежно від взаємного розташування вхідних та вихідних патрубків, а прилад-розподілювач, як правило, не враховує цих відмінностей та ін.

Матеріал і результати досліджень

Об'єкт дослідження – 18-ти поверхова житлова будівля із вертикальною двотрубною системою опалення та одним під'їздом. Система опалення виконана за незалежною схемою – через теплообмінник в індивідуальному тепловому пункті з погодним регулюванням. Трубопроводи та обладнання теплопункту обладнані ізоляцією. Автоматичні балансувальні клапани, для забезпечення налаштування збалансованого споживання теплової енергії – відсутні. Всі опалювальні прилади в квартирах обладнані термостатичними клапанами. Прилади опалювання представлені біметалевими та чавунними радіаторами. Починаючи із 2019 року в будівлі введено в експлуатацію прилади-розподільвачі теплової енергії. В опалювальний період 2019-2020 років приладами-розподільвачами було обладнано 76 квартир (95% опалювальних приладів). На теперішній час приладами-розподільвачами обладнані усі квартири, крім однієї, де працює індивідуальна система опалення. Основні показники об'єкту наведені в таблиці 1, а зовнішній вигляд фасаду будівлі зображено на рисунку 1. На одному поверсі будівлі знаходиться 5 квартир: однокімнатні – 1 шт., двокімнатні – 2 шт., трикімнатні – 1 шт., чотирикімнатні – 1 шт. Перший поверх будівлі не має житлових приміщень, а другий виділено під офіси. На опалювальних приладах в квартирах встановлено прилади-розподільвачі тепла фірми APTOR METRA, модель E-ITN 30.4. Дані з приладів-розподільвачів, за допомогою радіомодуля, передаються до концентраторів, що знаходяться на поверхах будівлі. Дані з концентраторів, через мережу інтернет, передаються до компанії, що надає послуги з їх обробки та розраховує обсяги нарахувань за спожиту теплоту мешканцями.

Таблиця 1 – Основні характеристики житлового будинку

Найменування	Одиниці	Значення
Кількість поверхів	пов.	18
Рік вводу в експлуатацію	рік	2000
Загальна опалювальна площа приміщень	м ²	6966,53
Кількість квартир	кв.	80
Кількість мешканців	чол.	240
Загальне теплове навантаження на опалення	Гкал/год	0,377
Загальна кількість опалювальних приладів	шт.	340
Кількість стояків системи опалення	шт.	23

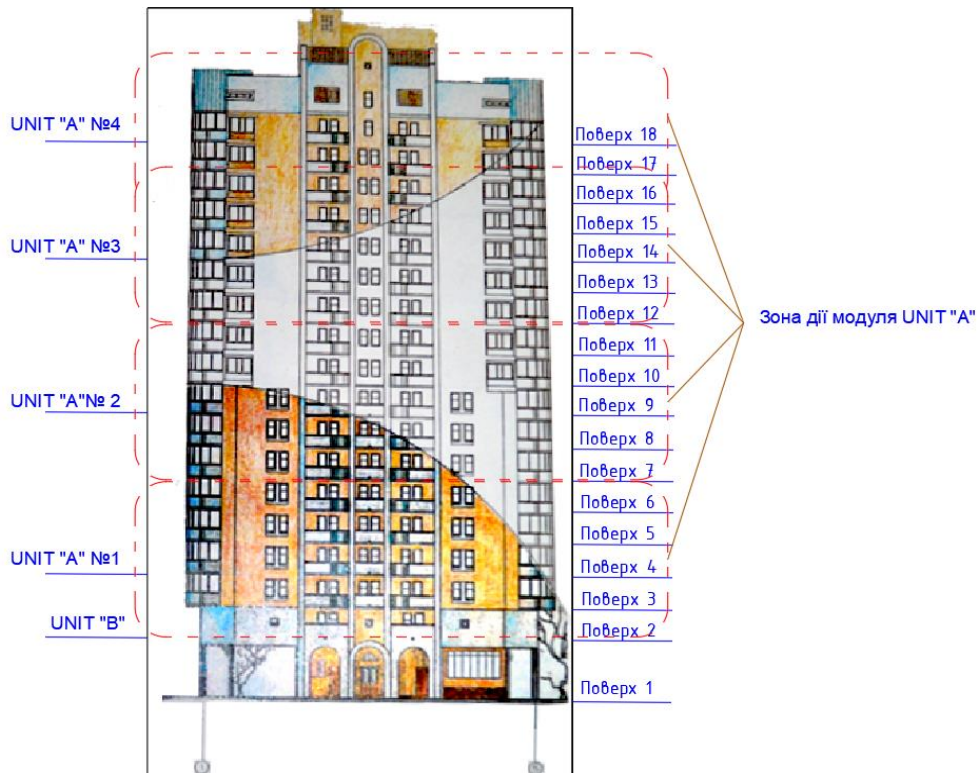


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд фасаду будівлі з зонами дії концентраторів.

Прилади-розподільвачі обладнані радіомодулем для бездротової віддаленої передачі даних, тобто мешканцям не потрібно самостійно збирати та передавати дані до компанії, яка надає послуги з розподілу теплової енергії та проводить нарахування за спожиту теплову енергію окремими квартирами (білінг). Така система вимагає деяких доповнень: необхідно встановити поверхові концентратори, так звані Unit A та Unit B. Задача концентратора Unit A – збір даних з розподільвачів, що встановлені на приладах опалення в межах одного або декількох поверхів та передача їх до Unit B. Unit B, в свою чергу, передає дані до білінгової компанії через мережу інтернет.

Дані передаються в зашифрованому форматі, для їх дешифровки компанія-виробник розподільників надає білінговій компанії спеціальне програмне забезпечення, без якого доступ до даних отримати неможливо. Оскільки прилади-розподільвачі обмінюються даними із концентраторами за допомогою радіохвиль, часом на їх шляху виникають перешкоди, що заважають сигналу. В таких випадках дані можуть бути зчитані безпосередньо з монітору розподільника мешканцями квартири, після чого передані білінговій компанії (або їх можна зчитати за допомогою переносного зчитуючого пристрою RFU 40).

Опис методики розподілу теплоспоживання багатоквартирного будинку між споживачами

Розподіл між споживачами обсягів спожитої теплової енергії при використанні приладів-розподільвачів виконується згідно із вимогами методики [8]. В методиці присутній ряд поправкових коефіцієнтів для різних типів приміщень, залежно від їх конфігурації, та формул, що їх використовують

Прийняття в Україні нової методики системи індивідуального обліку споживання теплової енергії для будинків з горизонтальною та вертикальною розводкою мало на меті:

-унеможливити невідповідність споживання комунальних послуг за лічильниками та загальнодомовими приладами обліку;

-забезпечити справедливий розподіл послуги між споживачами.

Переваги методики:

-чітке визначення термінів: опалювальне та неопалювальне приміщення, місця загального користування, приміщення з індивідуальним опаленням, приміщення з комбінованою системою опалення, внутрішньо будинкова система опалення, розрахунковий період;

-відповіді на конкретні нагальні питання (приклади розрахунку);

-можливість «налаштування» розрахунків під конкретний будинок;

-урахування поправкових коефіцієнтів в приміщеннях з «невигідним» розташуванням за рішенням співвласників (для кутових приміщень, квартир над неопалювальними підвалами, останніх поверхів та ін.)

Недоліки:

-помилки та неточності;

-складність для ОСББ та постачальників послуг (вимагає затрат часу та ускладнює можливість автоматизації обрахунків, що ускладнює застосування методики при одночасній роботі з великою кількістю будівель);

-потреба у залученні професіоналів та створення ринку білінгу (супроводження розрахунків).

Методика розрахунків передбачає, що баланс теплової енергії буде складатися таким чином. Покази загальнобудинкового приладу обліку включають наступні складові (рис.2):

- покази квартирних приладів обліку,
- покази квартирних приладів-розподільвачів,
- витрати теплоти місць загального користування,
- витрати на функціонування системи опалення,
- витрати квартир, де прилади індивідуального обліку не встановлено.

У кожному розрахунковому періоді протягом опалювального періоду перевіряється дотримання вимоги щодо мінімального споживання теплової енергії в опалюваних приміщеннях, оснащених вузлами розподільного обліку теплової енергії. При перевірці спожитий опалюваним приміщенням обсяг теплової енергії на опалення, віднесений до опалюваної площі цього приміщення, порівнюється з мінімальною часткою середнього питомого споживання теплової енергії і у разі невідповідності відбувається донарахування. Мінімальна частка середнього питомого споживання теплової енергії дорівнює 40-50% від середнього питомого споживання теплової енергії на опалення, тобто $q_{min}^{on} = (0,4 \div 0,5)q^{on}$.

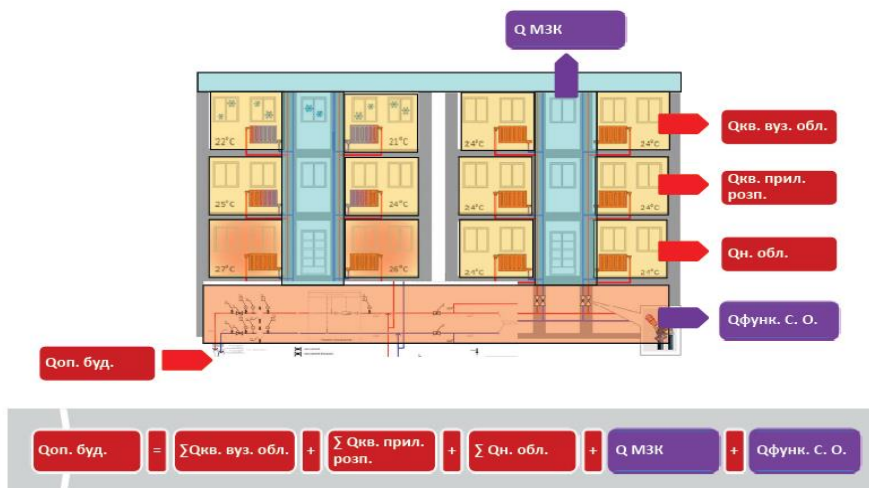


Рисунок 2 – Баланс теплової енергії за методикою [8]

За рішенням мешканців будівлі, було прийнято рішення розраховувати споживання i -го радіатора, оснащеного приладом-розподільвачем теплової енергії ($q_i^{\text{пр-роз}}$), за розрахунковий період за наступною формулою:

$$q_i^{\text{пр-роз}} = N_i \cdot L_i \cdot P_i \cdot K_i, \text{ Гкал} \times \text{у.о.}, \quad (1)$$

де N_i – кількість умовних одиниць на розподільвачі, що встановлено на i -му радіаторі за розрахунковий період, у.о.; L_i – кількість секцій i -го радіатора, шт; P_i – питома потужність i -го радіатора, Гкал, приймається за паспортними даними радіатора; K_i – поправковий коефіцієнт, в залежності від розташування приміщення в будівлі.

Мешканцями будівлі було прийнято рішення відмовитись від використання поправкових коефіцієнтів для розподілу обсягу спожитої теплової енергії на опалення між окремими споживачами.

Кінцеве споживання i -го радіатору визначається за формулою:

$$q_i = \frac{Q^{\text{пр-роз}}}{\sum_i q_i^{\text{пр-роз}}} \cdot q_i^{\text{пр-роз}}, \text{ Гкал}, \quad (2)$$

де $Q^{\text{пр-роз}}$ – кількість теплової енергії, що розподіляється між приладами-розподільвачами теплової енергії, Гкал; $\sum_i q_i^{\text{пр-роз}}$ – сумарне споживання всіх приладів, розрахованих за формулою (1), Гкал \times у.о.

На рисунку 3 зображено графіки сумарного річного поквартирного споживання теплоти за поверхами в результаті обробки даних приладів-розподільвачів.

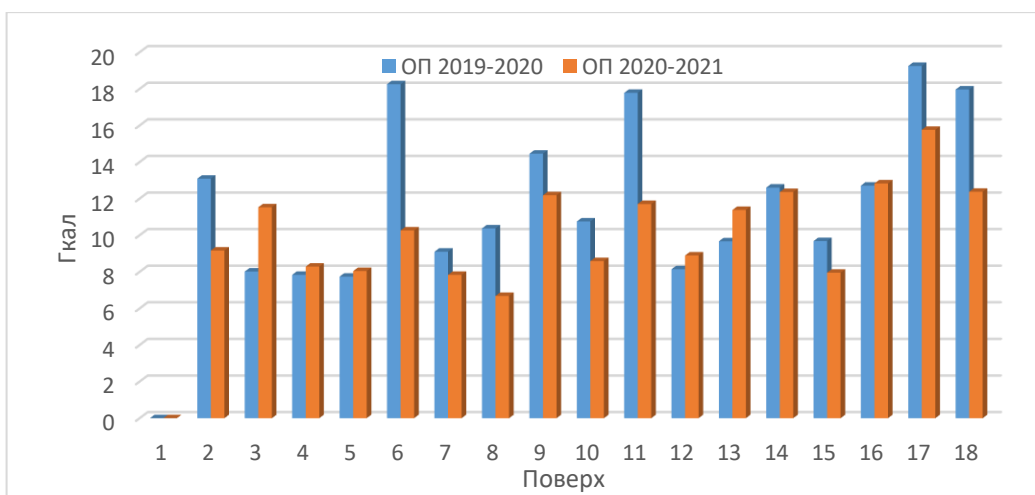


Рисунок 3 – Фактичне споживання енергії за поверхами в результаті розподілу

Збільшене споживання окремих квартир на 6, 11 та 17 поверхах пов'язано із відсутністю приладів-розподілювачів в окремих квартирах поверху у опалювальному періоді 2019-2020 років та особливістю застосування методики нарахування витрат теплової енергії за [8] для таких споживачів.

Для більш детального порівняння даних результати було приведено до стандартних погодних умов (рис.4) за формулою:

$$Q_n = Q_f \cdot \frac{ГД_n}{ГД_f}, \quad (3)$$

де Q_f – фактичне споживання тепла в поточному місяці, Гкал; $ГД_n$ – нормативна кількість градусо-днів, розрахована для кожного місяця, при умові, що $t_{вн}=20^{\circ}\text{C}$; $ГД_f$ – фактична кількість градусо-днів, розрахована для кожного місяця, при умові, що $t_{вн}=20^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 4 – Нормоване річне споживання теплової енергії за останні три роки

За опалювальний сезон 2019-2020 р.р. (перший рік вводу в експлуатацію приладів-розподілювачів), економія теплової енергії складала 17%, а за опалювальний сезон 2020-2021 років - 42% у порівнянні із опалювальним сезоном 2018-2019 років, та 15% у порівнянні із опалювальним сезоном 2019-2020 років.

Проведене порівняння результатів порівняння фактичних даних індивідуального обліку за прийнятою Методикою та за площею за два опалювальних періоди. При порівнянні графіків розподілу теплової енергії за поверхами можна побачити, що в другий рік роботи приладів-розподілювачів споживання тепла стало більш рівномірним (рисунок 5) у порівнянні з попереднім, а піки споживання менш вираженими. Тим не менше, в обидва роки спостерігається збільшене споживання тепла на 9-му, 11-му, 17-му та 18-му поверсі. Причиною цього може бути як регулювання з боку мешканців будівлі, так і помилки в роботі приладів-розподілювачів: наприклад, в деяких приміщеннях присутні загородження перед опалювальними приладами, які призводять до підвищення температури повітря поблизу розподільника. Підвищене споживання енергії на 18-му поверсі може бути частково згладжене введенням поправкових коефіцієнтів. Знижене енергоспоживання в деяких квартирах є результатом відсутності в них мешканців протягом тривалого часу, згідно з інформацією від Голови ОСББ.

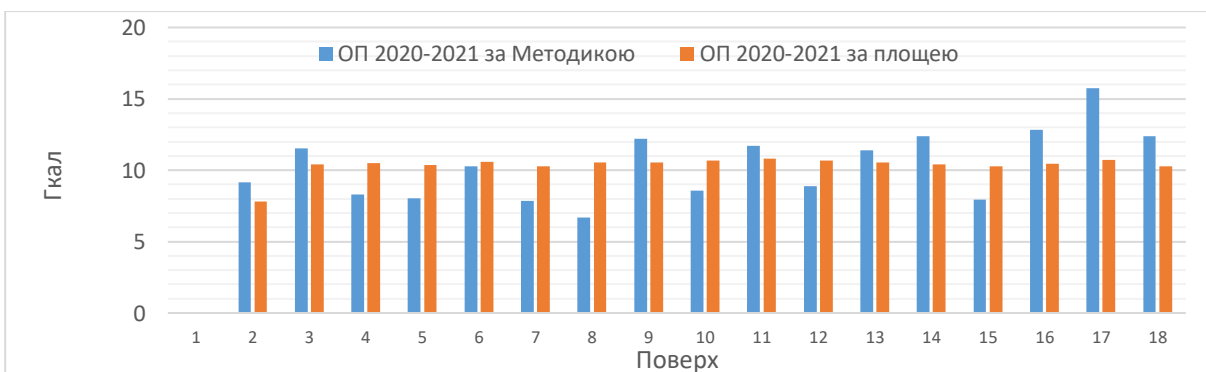


Рисунок 5 – Порівняння фактичних даних розподілу теплової енергії за Методикою та за площею за опалювальний сезон 2020-2021 років

При порівнянні графіків річного споживання бачимо високу нерівномірність споживання енергії між поверхами. Цікаво, що при виникненні піку споживання на одному з поверхів, поверхи вище та нижче нього мають значно нижче споживання. Подібна картина може свідчити про високу долю перетоків тепла між поверхами, що, в свою чергу, призводить до переplat мешканцями тих поверхів, де спостерігаються пікові споживання, адже, окрім себе, вони платять ще й за сусідів. Не дивлячись на значну економію теплової енергії після впровадження індивідуального обліку, дані про розподіл свідчать про те, що в будівлі можливі порушення правил монтажу та експлуатації приладів розподільвачів, що призводить до спотворення їх показів. Тому рекомендується провести додатковий аудит роботи системи обліку та розподілу споживання опалення будинку з аналізом місця установки та стану приладів, а також прискіпливої уваги потребує дослідження проблеми ймовірного використання в окремих квартирах спеціальних приладів чи систем (тепла підлога, опалення балконів тощо). Додаткового вивчення також вимагає питання перетоків теплоти між поверхами. Має сенс провести моделювання енергоспоживання в спеціалізованому програмному забезпеченні, наприклад DesignBuilder та EnergyPlus. Це надасть змогу краще зрозуміти природу таких перетоків та уявлення про те, як компенсувати їх при розрахунках споживання.

Висновки

На основі отриманих даних від приладів-розподільвачів теплової енергії було проведено відповідні розрахунки за затвердженою національною методикою та її аналіз, а також визначено енергоспоживання окремих квартир багатоквартирної будівлі з вертикальною системою опалення. В ході розрахунків було побудовано та проаналізовано графіки споживання теплової енергії, виявлено ряд проблем, що виникають при розподілі теплової енергії. Зокрема можуть бути внесені доповнення до методики [7], наприклад щодо зведення енергетичних балансів при донарахуванні.

Не дивлячись на це, прилади-розподільвачі дозволили суттєво знизити енергоспоживання будівлі, тому їх використання є перспективним напрямом для енергозбереження в Україні та вимагає додаткових досліджень: проведення комп'ютерних моделювань та практичних експериментів для поліпшення результатів розподілу та підвищення їх точності.

Також необхідно відзначити наступне: якщо у мешканців встановити тільки термостатичні регулятори, а оплата від зниження витрат не буде зменшуватися, то у них не буде стимулу дбайливого ставлення до енергоресурсів. У разі, якщо встановити тільки прилади обліку без терморегуляторів, мешканці надалі не зможуть впливати на грошові витрати на потреби опалення. Тому тільки комплексний підхід забезпечить досягнення цілей економії енергоресурсу і грошових коштів.

Список використаної літератури

1. Офіційний сайт Державної служби статистики України. Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua/>
2. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність” Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.09.2017р. №605-р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text>.
3. Directive 2010/31/eu of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) // Official Journal of the European Communities. 2010, L153. – p. 13-35.
4. Офіційний сайт Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України. Режим доступу: <https://saee.gov.ua/>
5. Закон України «Про комерційний облік теплової енергії та водопостачання» № 2119-VIII від 09.06.2018. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2119-19>.
6. Закон України «Про житлово-комунальні послуги» №2189-VIII від 01.05.2021. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2189-19#Text>.
7. Про затвердження Порядку визначення технічної можливості встановлення вузлів розподільного обліку теплової енергії та економічної доцільності встановлення приладів - розподільвачів теплової енергії. Постанова №829 Кабінету Міністрів України від 24.10.2018. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/829-2018-%D0%BF>.
8. Про затвердження Методики розподілу між споживачами обсягів спожитих у будівлі комунальних послуг. Наказ Мінрегіонбуду від 22.11.2018 № 315. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1502-18#Text>.
9. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» №2118-VIII // ВВР, 2017, № 33, р.359.
10. Закон України «Про Фонд енергоефективності» № 2095-VIII // ВВР, 2017, № 32, ст.344.
11. European Parliament Directive 2012/27/EU on energy efficiency. Official Journal of the European Union 2012; 315/1.

12. ДСТУ EN 834:2017. Вимірювачі витрат тепла для визначення тепловіддачі кімнатних опалювальних батарей. Прилади з електроживленням (EN 834:2013)/
13. Jelena Ziemele, Ieva Pakere, Dagnija Blumberga, Gatis Zogla. Economy of heat cost allocation in apartment buildings. Riga Technical University, Institute of Energy Systems and Environment, Azenes iela 12/1, Riga, LV 1048, Latvia.
14. Liu L, Fu L, Jiang Y, Guo S. Major issues and solutions in the heat-metering reform in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15(1):673–680.
15. Pakanen J, Karjalainen S. Estimating static heat flows in buildings for energy allocation systems. *Energy and Buildings* 2006. Vol. 38(9). p. 1044–1052.
16. Gafsi A, Lefebvre G. Stolen heating or cooling energy evaluation in collective buildings using model inversion techniques. *Energy and Buildings* 2003. Vol. 35(3). p. 293–303.
17. Siggelsten S. Reallocation of heating costs due to heat transfer between adjacent apartments. *Energy and Buildings* 2014. Vol. 75. p. 256–263.
18. Vringer K, Blok TAK. Household energy requirement and value patterns. *Energy Policy* 2007. Vol. 35. p. 553–566.
19. Linde'n AL, Carlsson-Kanyama A, Eriksson B. Efficient and inefficient aspects of residential energy behavior: what are the policy instruments for change? *Energy Policy* 2006. Vol. 34. p. 1918–1927.
20. Simon Siggelsten | (2018) Heat cost allocation in energy efficient multiapartment buildings. *Cogent Engineering*, 5:1, 1438728, DOI: 10.1080/23311916.2018.1438728.
21. Ecotermo. Heat Cost Allocator Drawbacks. Електронне видання. URL: <http://www.ecothermo.it/heat-cost-allocator-drawbacks/>

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

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

N. Honcharov, Msc. ORCID 0000-0002-4175-8868

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

N. Politykina, expert energy auditor MistoEnergy, ORCID 0000-0002-7294-3492

INDIVIDUAL DISTRIBUTION OF THERMAL ENERGY CONSUMPTION IN AN APARTMENT BUILDING: PRACTICAL EXPERIENCE

The cost of thermal energy production is constantly growing, on average, tariffs in the regions of Ukraine have tripled in recent years. The component of payment for heating in utility costs is the main one for most apartment buildings, but due to the peculiarities of district heating systems, residents do not have an impact on heat consumption, and there is a problem of uneven heat distribution: some rooms are overheated, others unheated. The normative documents of Ukraine indicate the installation of metering and regulation of energy consumption as one of the main measures to increase the level of energy efficiency of buildings. Modernization of heating engineering systems with the installation of thermostats and heat distributors is one of the most discussed energy saving measures at the general meeting of condominiums, which is of interest to most residents of buildings in operation. Experience shows that after the installation of such devices, the consumption of thermal energy by buildings is reduced, which leads to a reduction in heating costs.

The relevance of the topic of this article is to study modern methods of individual distribution of thermal energy in apartment buildings, in particular in houses with a vertical heating system. The object of the study is an existing apartment building in Kyiv, where, starting in 2019, thermal energy distributors were put into operation. The subject of the study is the methods of heat distribution between apartments and the analysis of the practical results of the implementation of such a project in the existing serial building in Kyiv.

The following research tasks were set: collection of general information about thermal energy distributors, their types and principles of operation; analysis of the current regulatory framework regarding the problem of individual accounting of thermal energy; analysis of the method of heat energy distribution adopted in Ukraine with identification of the main problems that arise during its application; analysis of practical results of thermal energy distribution in an apartment building in Kyiv.

Keywords: *apartment building, heat consumption, individual metering, distribution devices*

References

1. Official site of the State Statistics Service of Ukraine. Access mode: <http://www.ukrstat.gov.ua/>
2. On approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2035 "Security, energy efficiency, competitiveness" Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 18.09.2017. №605-p. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text>.
3. Directive 2010/31/eu of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) // Official Journal of the European Communities. 2010, L153. – p. 13-35.
4. Official website of the State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine Access mode: <https://sae.gov.ua/>
5. Law of Ukraine "On commercial accounting of thermal energy and water supply" № 2119-VIII from 09.06.2018. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2119-19>.
6. Law of Ukraine "On Housing and Communal Services" №2189-VIII of 01.05.2021. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2189-19#Text>.
7. On approval of the Procedure for determining the technical feasibility of installing thermal energy distribution metering units and the economic feasibility of installing thermal energy distributors. Resolution №829 of the Cabinet of Ministers of Ukraine of October 24, 2018. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/829-2018-%D0%BF>.
8. On approval of the Methodology for distribution among consumers of the volumes of utilities consumed in the building. Order of the Ministry of Regional Development dated 22.11.2018 № 315. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1502-18#Text>
9. Law of Ukraine "On Energy Efficiency of Buildings". Draft Law No.2118-VIII // Bulletin of the Verkhovna Rada, 2017, No.33, p.359.
10. Law of Ukraine "On the Energy Efficiency Fund" № 2095-VIII // Bulletin of the Verkhovna Rada, 2017, № 32, p.344.
11. European Parliament Directive 2012/27/EU on energy efficiency. Official Journal of the European Union 2012; 315/1.
12. DSTU EN 834: 2017. Heat flow meters to determine the heat dissipation of indoor heating batteries. Power appliances (EN 834: 2013)
13. Jelena Ziemele, Ieva Pakere, Dagnija Blumberga, Gatis Zogla. Economy of heat cost allocation in apartment buildings. Riga Technical University, Institute of Energy Systems and Environment, Azenes iela 12/1, Riga, LV 1048, Latvia.
14. Liu L, Fu L, Jiang Y, Guo S. Major issues and solutions in the heat-metering reform in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15(1):673–680.
15. Pakanen J, Karjalainen S. Estimating static heat flows in buildings for energy allocation systems. *Energy and Buildings* 2006. Vol. 38(9). p. 1044–1052.
16. Gafsi A, Lefebvre G. Stolen heating or cooling energy evaluation in collective buildings using model inversion techniques. *Energy and Buildings* 2003. Vol. 35(3). p. 293–303.
17. Siggelsten S. Reallocation of heating costs due to heat transfer between adjacent apartments. *Energy and Buildings* 2014. Vol. 75. p. 256–263.
18. Vringer K, Blok TAK. Household energy requirement and value patterns. *Energy Policy* 2007. Vol. 35. p. 553–566.
19. Linde'n AL, Carlsson-Kanyama A, Eriksson B. Efficient and inefficient aspects of residential energy behavior: what are the policy instruments for change? *Energy Policy* 2006. Vol. 34. p. 1918–1927.
20. Simon Siggelsten | (2018) Heat cost allocation in energy efficient multiapartment buildings. *Cogent Engineering*, 5:1, 1438728, DOI: 10.1080/23311916.2018.1438728.
21. Ecotermo. Heat Cost Allocator Drawbacks. Електронне видання. URL: <http://www.ecothermo.it/heat-cost-allocator-drawbacks/>

Надійшла 26.08.2021
Received 26.08.2021

Б.Н. Плескач, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-9842-647X

В.Д. Самойлов, д-р техн. наук

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є Пухова НАН України

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

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

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПРЕЦЕДЕНТНО-АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ТРЕНАЖЕРНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ЕНЕРГОМЕНЕДЖЕРІВ

Розглянуто актуальне питання розвитку теоретичних засад створення та застосування комп'ютеризованих систем для тренування енергоменеджерів промислових підприємств. Об'єктом дослідження є практична діяльність персоналу підприємства, спрямована на підвищення енергетичної ефективності виробничих систем різного призначення. Предмет досліджень – комп'ютерні технології навчання та тренування персоналу промислового підприємства. Мета дослідження – створення інструментарію, спрямованого на підготовку персоналу служб енергетичного менеджменту. В основу досліджень покладено сценарне моделювання дій енергоменеджера і прецедентне моделювання реакцій обладнання на такі дії. Моделювання дій енергоменеджера ґрунтується на циклі Демінга, а моделювання реакцій виробничих систем – на випадках квазістаціонарного енергоспоживання технологічної системи. Програмна платформа запропонованої технології складається з програмних модулів, які відтворюють цикл управління PDCA (Plan-Do-Check-Act) та предметної області тренування у вигляді програмної надбудови. Технологія дозволяє відпрацьовувати дії енергоменеджера, спрямовані на планування енергозберігаючих заходів та обчислення фінансово економічних результатів, досягнутих при їх впровадженні.

Ключові слова: енергетичний менеджмент, комп'ютерний тренажер, сценарно-прецедентна технологія.

Вступ

Надійна та ефективна робота будь-якої технологічної системи залежить від підготовки та підтримання на належному рівні кваліфікації персоналу. Не в останню чергу це торкається служб енергетичного менеджменту, які є головною рушійною силою підвищення енергетичної ефективності на підприємстві.

У 2018 р. було опубліковано поновлений стандарт ISO 50001:2018 [1], який встановлює вимоги до системи енергетичного менеджменту (СЕНМ) організації. Основою таких вимог є відома концепція постійного поліпшення якості «Плануй—Виконуй—Перевірй—Дій» (Plan, Do, Check, Act (PDCA) — цикл Демінга). У контексті енергетичного менеджменту підхід на основі циклу PDCA може складатись з циклічного планування діяльності СЕНМ, виконання запланованих дій, перевірки отриманих результатів та корегування невідповідності очікуванням.

Фахівців з енергетичного менеджменту готують у вищих навчальних закладах України, а також на курсах підвищення кваліфікації при різних технічних навчальних закладах. В процесі навчання вони отримують широке коло теоретичних і практичних знань, які в подальшому будуть використовувати на підприємстві. Але навички застосовувати ці знання в циклі PDCA можна отримати або в реальних умовах роботи, або за допомогою спеціальної (тренажерної) підготовки. Оскільки перший варіант може бути пов'язаний із зайвими витратами та ризиками, перевагу слід віддавати тренажерній підготовці фахівців з енергоменеджменту.

Одним із напрямків підготовки і підвищення кваліфікації енергоменеджерів є розробка і впровадження в навчальний процес комп'ютерних тренажерних систем. Так, в роботі [2] зазначено актуальність і важливість створення інтелектуальних тренажерів для фахівців з енергетичного менеджменту. Наведено приклади тренажерів «Ефективність теплової ізоляції», «Енергетичний аудит виробничого цеху», «Ефективність освітлювальних приладів», «Регулювання продуктивності помпи». Однак ці тренажери не відтворюють процес енергетичного менеджменту підприємства комплексно, зосереджуючись на окремих технологічних системах.

Відомий симулятор «Energy Manager» [3], призначений для підготовки енергоменеджерів-електриків, складається з різних автономних тренажерів, за допомогою яких можна досліджувати рівень

якості електричних мереж, гармонік, а також наявність електричного і магнітного поля. Він дозволяє вивчати процеси, які протікають в електричних мережах, але не виробляє навички загального підходу до діяльності енергоменеджера.

В роботі [4] розглянуто методи побудови моделей для тренажерів, способи зображення діяльності персоналу і сценарії тренажерних занять, описано моделі оцінювання в комп'ютерних системах підготовки персоналу служб з добре формалізованою діяльністю. Але вони не торкаються служб, діяльність яких формалізовано в загальних рисах, до яких можна віднести служби енергетичного менеджменту промислових підприємств і об'єктів житлово-комунального господарства.

Відома також модель сценарно-прецедентної інтелектуальної тренажерно-навчальної системи, призначеної для тренування у предметних областях [5], що важко формалізуються, зокрема, у галузі судноводіння.

Наведений огляд свідчить про недостатнє висвітлення в науковій літературі теми комп'ютерних тренажерів, призначених для закріплення навиків та вмій по управлінню енергоспоживанням комплексів технологічного обладнання промислових об'єктів.

Мета комплексного тренування фахівців з енергетичного менеджменту полягає у виробленні навички циклічно повторювати операції з контролю технологічних і енергетичних показників певних технологічних систем, планувати і впроваджувати заходи із зменшення енергетичних втрат і знов контролювати технологічні та енергетичні показники, намагаючись звести енергетичні втрати до мінімальних. Сценарій моделювання процесу управління енергоспоживанням являє собою послідовність дій, спрямованих на досягнення мети – зменшення, або повне усунення прихованих енергетичних втрат в обраних технологічних системах.

Мета та завдання. Метою цієї статті є обґрунтування прецедентного підходу до побудови комп'ютерних тренажерів енергоменеджера та формування прецедентно-аналітичної моделі процесу тренування.

Основний матеріал.

Головним завданням служби управління енергоспоживанням є зниження витрат на енергоресурси при забезпеченні необхідної їх кількості та якості. Головним інструментом енергоменеджера є постійне спостереження та аналіз енергетичної ефективності технологічного процесу, наприклад за методикою «контролю і планування» (КіП) [6] та періодичних енергетичних обстежень обладнання. Результатом таких дій є створення і впровадження планів з підвищення рівня енергоефективності.

Характерною особливістю кожного промислового підприємства є зосередження уваги його керівництва на питаннях виробництва і бажання збільшити його обсяги. Внаслідок цього не завжди приділяється увага такому важливому для функціонування підприємства питанню, як ефективне використання енергоносіїв та їх вартість.

На більшості промислових підприємств України, витрати на енергоресурси у минулому через низьку їх ціну складали незначну частку в собівартості продукції, тому енергозбереження було далеко не найважливішим питанням життєдіяльності підприємства.

За останні декілька років, через зростання вартості енергоресурсів, витрати на енергоносії стали дуже помітною статтею витрат. Витрати на енергоресурси на типовому машинобудівному підприємстві [7] складають близько 25% від вартості продукції, що випускалася.

Сьогодні на українських підприємствах, не дивлячись на правильне розуміння персоналом проблем заощадження енергоресурсів і витрат на них, існує бажання реалізувати крупні проекти для отримання значної економії витрат на енергоресурси. В той же час на підприємствах є велика кількість ефективних малих проектів з енергозбереження з дуже нетривалими термінами окупності.

Загальною помилкою є їх ігнорування, оскільки економія на одиницю продукції може виявитися незначною. Так, установлення конденсатопідвідників може виглядати менш привабливим заходом, ніж такий великий проект, як модернізація роботи котельного устаткування або створення системи обліку витрати енергоносіїв. Але подібного роду малі проекти дуже важливі і, якщо прийняти до уваги загальну кількість встановлюваних конденсатопідвідників, то сумарна економія витрат за цим проектом виявляється значною.

На більшості промислових підприємств України є відділи головного енергетика, в яких працюють фахівці з різних напрямів енергетики. Посадовими обов'язками вказаних фахівців передбачено забезпечення безперебійного постачання виробництва підприємства всіма видами енергоресурсів необхідної кількості і якості, забезпечення економного їх витрачання. Проте, у зв'язку зі скороченням виробничих витрат, найчастіше в першу чергу підлягають скороченню фахівці допоміжних служб, у тому числі і енергослужби. В результаті фахівці, що залишилися, найчастіше займаються не питаннями підвищення ефективності використання енергії на підприємстві, а відповідають за те, щоб підприємство не відчувало нестачі в енергозабезпеченні. В умовах зростання цін на енергоносії і невизначеності в забезпеченні всіма видами палива на перший план виходить діяльність енергоменеджера. Підприємствам

слід дуже серйозно розглянути питання про необхідність введення посади енергоменеджера, а у разі економічної доцільності – організації групи енергоменеджменту.

Працівники такої служби повинні здійснювати регулярний контроль за енерговикористанням всіма технологічними операціями і за динамікою щомісячних обсягів енергоспоживання. Такі відомості про щомісячне енергоспоживання слід потім подавати в графічному вигляді для порівняння з енергоспоживанням в попередні місяці або роки з метою виявлення змін в об'ємах енергоспоживання, визначення причин змін і прийняття рішення про необхідні заходи зі стабілізації енергоспоживання, запобігання нераціональному споживанню енергії. Наприклад, якщо енергоспоживання за місяць зростає без посилення виробничої активності, слід розібратися в причинах цього і вжити заходів для усунення цієї проблеми.

Крім того, персоналу групи енергоменеджменту слід також регулярно перевіряти всі технологічні процеси на предмет дослідження можливостей енергозбереження, сертифікації технічних процесів і устаткування за енергоефективністю. Фахівці цієї групи повинні стежити за тим, щоб упроваджувалися в практику пропозиції з поліпшення енерговикористання на підприємстві, починаючи з реалізації рекомендацій, перерахованих в звіті з енергоаудиту. Крім того, працівники групи енергоменеджменту повинні проводити експертизу всіх запропонованих підприємству змін на енергоефективність. Бажано, щоб до складу групи входив фахівець з теплотехніки (працівник, що розбирається в парових, холодильних системах, а також системах газопостачання і гарячого водозабезпечення) та фахівець з електротехніки.

На багатьох підприємствах групі енергоменеджменту ставлять такі завдання, як наприклад, «зниження сумарного енергоспоживання за рік на 5%». Безумовно, планований процентний рівень може змінюватися, але такий підхід може використовуватися як показник оцінки роботи самої групи. На промислових підприємствах України, де є значні резерви енергозбереження, названий процентний рівень економії витрат на енергоресурси міг би бути ще вищим. На підприємствах слід упроваджувати системи матеріального стимулювання працівників за ефективне використання енергоресурсів.

Зміст діяльності енергоменеджера здебільшого залежить від розмірів і особливостей енергетичного господарства підприємства, але в будь-якому випадку форма повинна відповідати циклу Демінга [8]. При плануванні енергозберігаючих заходів враховують економічні показники усього технологічного обладнання підприємства в комплексі і кожної системи окремо. Враховують такі фінансово- економічні обмеження, як наявність інвестиційних ресурсів, термін окупності заходів, норма прибутку, ставка дисконтування, відсоток кредитування та інше. Методики розрахунку таких обмежень наведено в роботі [9].

Сценарій моделювання процесу управління енергоспоживанням являє собою послідовність дій, спрямованих на досягнення мети, а саме зменшення, або повне усунення прихованих енергетичних втрат в технологічній системі. Послідовність таких дій визначається циклом PDCA і не залежить від особливостей підприємства, або технологічної системи, хоча зміст таких дій повністю залежить від різновиду технологічної системи. Конкретизація сценарію задається сукупністю прецедентів енергоспоживання, які наповнюють його якісними і кількісними параметрами підприємства. Різні конкретизації одного й того ж сценарію визначають різні проблемні стани різних технологічних систем, що створюються різними сукупностями прецедентів.

Базовим поняттям сценарно-прецедентного підходу є стан s моделі технологічної системи (ТС). Множина станів S належить до предметної області $ES \in \{ES_1, \dots, ES_m\}$, де ES — випадки квазістаціонарного енергоспоживання певної ТС. Для кожного випадку існує певна сукупність технологічних параметрів X , поточний рівень енергоспоживання E , наявний фактор енергетичних втрат Z та базовий рівень енергоспоживання E_0 : $CaseE = (X, E, Z, E_0)$.

Стан ТС, в якому присутні фактори енергетичних втрат Z , є проблемним, у протилежному випадку робота ТС вважається енергоефективною. Для усунення таких факторів існують заходи енергозбереження $\{pz, pz_1, \dots, pz_n\}$, кожен з яких усуває один з факторів Z і визначається ціною впровадження C та енергетичною ефективністю ΔE .

Для кожного проблемного стану існує мета — переміщення його у енергоефективний стан з мінімальними енергетичними втратами. Для досягнення цієї мети особа що тренується (ОТ) взаємодіє з комп'ютерною системою тренування (КСТ), створюючи в циклі Демінга послідовність керуючих впливів $[u_1, u_2, \dots, u_m]$ на модель ТС в умовах економічних обмежень β і перетворюючи ситуацію s_i у вихідну ситуацію s_0 . Послідовність керуючих впливів $[u_1, u_2, \dots, u_m]$, сформованих в циклі Демінга, являє собою сценарій керуючих впливів від ОТ на модель ТС.

Вважаємо, що підприємство певної галузі складається з k технологічних систем $A \in \{A_1, \dots, A_k\}$. В процесі роботи кожна технологічна система A може перебувати в певному енергетичному стані, зразком якого є прецедент енергоспоживання у квазістаціонарному режимі $CaseA$. В початковий момент часу t_1 , згідно з запланованою метою тренування, ОТ у зручній для сприйняття формі пропонується прецедент $CaseA_{t_1} = (X_{t_1}, E_{t_1}, Z_{t_1}, E_{0A})$ проблемного стану технологічної системи A . Перед ОТ постає

завдання з задалегідь відомих заходів $\rho_{z1}, \dots, \rho_{zn}$ скласти план дій для підвищення енергетичної ефективності обраної ТС з урахуванням заданих економічних і технічних обмежень.

В результаті впровадження цих заходів вважається, що технологічна система А повинна перейти в інший енергетичний стан, який характеризується прецедентом $CaseA_{i2} = \{X_{i2}, E_{i2}, Z_{i2}, E_{\delta A}\}$. Для моделювання такого переходу створено алгоритм трансформації прецедентів, за яким визначаємо фактори Z_{i2} , які залишилися неусуненими, вираховуємо новий рівень поточного споживання енергії $E_{i2} = E_{i1} - \Sigma \Delta E$ і нові фінансові обмеження $\beta_{i2} = \beta_{i1} - (\Sigma \Pi + \Sigma \Delta ER)$, де R — тарифна вартість енергоносія, $\Sigma \Delta E$ і $\Sigma \Pi$ — відповідно сумарні ефективність і вартість впроваджених заходів енергозбереження.

Критерієм правильності вирішення задачі з керування енергетичною ефективністю в ситуації $CaseA_{i1}$ є зменшення фінансових обмежень та енергетичних втрат в ситуації $CaseA_{i2}$. Надалі цей цикл повторюється для усіх моделей технологічних систем А доти, поки не будуть усунуті усі фактори появи енергетичних втрат.

Таким чином, прецеденти квазістаціонарного енергоспоживання ТС обраної предметної області, конкретизовані в циклі PDCA, є базовими елементами при придбанні практичних навичок ОТ, що є розвитком ідеї використання сценарно-прецедентного підходу до побудови інтелектуальних тренувальних систем.

Конкретизація сценарію задається сукупністю прецедентів енергоспоживання, які наповнюють його якісними і кількісними параметрами підприємства. Різні конкретизації одного й того ж сценарію визначають різні проблемні стани різних технологічних систем, що створюються різними сукупностями прецедентів.

На рис. 1 представлена структурна схема прецедентного методу конструювання моделі комплексного тренажеру:

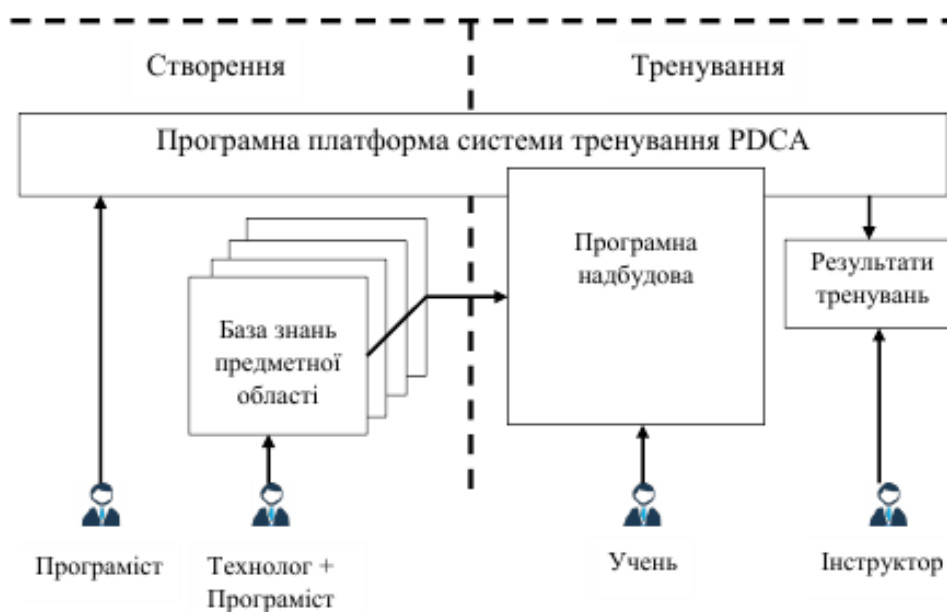


Рис. 1. Структурна схема прецедентного методу конструювання

В основі прецедентно-сценарного методу конструювання тренажерної системи лежить програмна платформа системи тренування за сценарієм PDCA. Ця платформа забезпечує виконання циклічного алгоритму міркувань на основі прецедентів квазістаціонарного енергоспоживання обраних технологічних систем. Конкретне наповнення тренажерної системи виконується за рахунок бази знань предметних областей обраних технологічних систем, які утворюють програмну надбудову над системою тренування. До складу кожної з предметних областей бази знань, які створюються за участі технолога, входять наступні елементи:

- база прецедентів еталонного енергоспоживання $CaseE = \langle X, E_{\delta} \rangle$ технологічної системи;
- база прецедентів проблемного енергоспоживання $CaseE = \langle X, E, Z, E_{\delta} \rangle$;
- структура технологічної системи і точки контролю технологічних параметрів $X = [X_1, \dots, X_n]$;
- бібліотека факторів появи енергетичних втрат $Z = [Z_1, \dots, Z_m]$;
- бібліотека заходів з підвищення енергетичної ефективності $\rho_{z1}, \dots, \rho_{zn}$;

Конструювання комп'ютерного тренажеру починається з визначення узагальнених структурних схем обраних технологічних систем і контрольних точок заміру впливових технологічних параметрів. Після цього, з використанням існуючої системи моніторингу енергоспоживання, створюється база прецедентів еталонного енергоспоживання технологічної системи в квазістаціонарних режимах роботи. За участі експерта-технолога створюється бібліотека факторів появи енергетичних втрат із зазначенням усереднених енергетичних втрат, а також бібліотека заходів з усунення енергетичних втрат із зазначенням їх ефективності і вартості впровадження. Таким чином, за участі експертів-технологів, формуються бази знань по усім технологічним системам виробництва з яких утворюється програмна надбудова тренажерної системи енергоменеджерів.

Програмна платформа системи тренування PDCA складається з трьох основних модулів (Рис. 2):

- модуля створення проблемних ситуацій;
- модуля трансформації прецедентів;
- модуля оцінювання.



Рис 2. Структурна схема програмного забезпечення комп'ютерного тренажеру енергоменеджера.

Модуль створення проблемних ситуацій призначений для створення візуального образу проблемного енергетичного стану технологічної системи і обрання заходів, спрямованих на підвищення енергетичної ефективності. В залежності від плану і завдання тренування для створення проблемної ситуації використовуються різні прецеденти проблемного енергоспоживання, які накопичені в бібліотеці знань предметної області.

Модуль трансформації прецедентів призначений для перерахунку параметрів поточної проблемної ситуації з урахуванням обраних учнем заходів енергозбереження і економічних обмежень. Отримані після перерахунку параметри порівнюються з еталонними параметрами ефективного енергоспоживання і по результатам порівняння оцінюються дії учня.

Модуль оцінювання призначений для оцінки поточних і планування наступних кроків тренування в залежності від їх успішності. До сценарію тренування можуть бути послідовно включені кілька технологічних систем, що наближає сценарій тренування до реальних дій енергоменеджера в умовах виробництва.

Формування моделі тренувального процесу починається з обрання даних для предметної області. В першу чергу це вибір галузі, до якої відноситься підприємство.

- металургія;
- машинобудування;
- харчова промисловість;

- легка промисловість;
- промисловість будівельних матеріалів;
- інша.

Наступним кроком обираються технологічні системи, на яких буде протікати тренування. Це можуть бути

- система електропостачання;
- система повітропостачання;
- система водопостачання;
- система теплопостачання;
- система опалення;
- інша.

Кожна технологічна система представляється мнемосхемою, зручною для тренувань і точками контролю технологічних параметрів.

Крім того, для кожної технологічної системи збирається бібліотека заходів з енергозбереження, до складу якої входять енергетична ефективність і вартість впровадження кожного заходу. Приклад елементів бібліотеки заходів з енергозбереження для технологічної системи водопостачання наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Перелік заходів з енергозбереження

№	Захід	Очікувана ефективність	Вартість впровадження
...
n	Усунути витоки через ущільнення	7%	1500 грн
n+1	Замінити асбесто-графітне ущільнення помпи на тефлонове	8%	5000 грн
...

Узагальнена схема формування траєкторій тренування на основі прецедентно-аналітичного підходу представлена на рис. 3.

На початку тренування учень обирає галузь і технологічні системи, з якими він зустрічатиметься на практиці. Після цього КСТ, згідно з програмою тренування, створює ситуацію з підвищеним енергоспоживанням для першої технологічної системи. На екран монітора виводиться мнемосхема з технологічними параметрами та значеннями поточного та базового енергоспоживання. Перед учнем постає задача із запропонованого переліку енергозберігаючих заходів обрати підходящий для зменшення енергетичних втрат з урахуванням обмежень. КСТ у відповідності до алгоритму трансформації прецедентів перераховує нові значення технологічних параметрів і оцінює дії учня. Після цього, в залежності від результатів оцінювання, виконується перехід або до наступної технологічної системи, або повернення до попередньої.

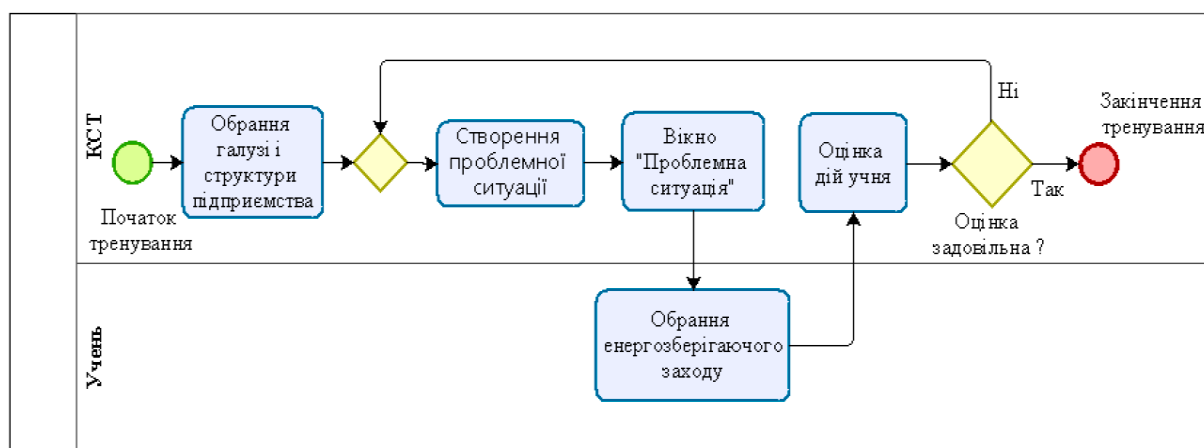


Рис. 3. Узагальнена схема тренування енергоменеджера.

Висновки.

1. Актуальним є питання створення комп'ютерних тренажерів, призначених для закріплення навиків та вмінь по управлінню енергоспоживанням технологічного обладнання промислових об'єктів.
2. Формування прецедентно-аналітичної моделі процесу тренування дозволяють створити інтелектуальний комп'ютерний тренажер енергоменеджера, здатний адаптуватись до різних технологічних систем і змінних умов виробництва.

Список використаної літератури

1. International Organization for Standardization, ISO 50001. Energy Management. Режим доступу : <https://www.iso.org/standard/69426.html>
2. Захаров Н.Д., Бурдо О.Г., Хобин В.А., Мазур А.В. Управление энергетической эффективностью города. Интегрированные технологии и энергосбережение, 2, '2004, с. 13-17
3. Energy Manager - Pro Solution, https://nadascientific.com/engineering_education/energy-manager-pro-solution.html
4. Абрамович Р.П., Самойлов В.Д. Технологія конструювання комп'ютерних систем підготовки персоналу в енергетиці. Київ, «Прометей», 2021 р., 111 с
5. Шерстюк В.Г. Сценарно-прецедентная модель тренажерно-обучающей интеллектуальной системы. «Искусственный интеллект», 2013, № 4, с. 488 – 500.
6. Находов В.Ф., Бориченко О.В., Іванько Д.О. Контроль ефективності енерговикористання в системі енергетичного менеджменту. «Вісник КНУТД», 2013, №6, с. 67-77.
7. Прокопенко В.В. Енергетичний аудит: Навчальний посібник / В.В.Прокопенко, О.О.Закладний, П.В.Кульбачний. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. – 400 с.
8. Сидоренко В.В. Цикл Шухарта-Демінга (PDCA) для організації безперервного професійного розвитку фахівців.: VI-а Міжнародна науково-практична конференція «Неперервна освіта нового сторіччя: досягнення та перспективи» (12-18 травня 2020 року у м. Запоріжжі (Україна)
9. Плєскач Б.М., Давіденко А.М., Прокопенко В.В., та ін. Практичний посібник з енергозбереження для об'єктів промисловості, будівництва та житлово -комунального господарства України. Луганськ.,- «Лунне саяво», 2012, 700 с.

B. Pleskach, Cand.Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-9842-647X

V.Samoilov, Dr. Eng. Sc

**G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering
National Academy of Sciences of Ukraine**

V. Prokopenko Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-5518-5802

O. Zakladnyi, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2813-3692
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

PRECEDENT-ANALYTICAL MODEL OF EXERCISE SYSTEM FOR ENERGY MANAGERS

The topical issue of development of theoretical bases of creation and application of computerized systems for training of energy managers of industrial enterprises is considered. The object of the study is the practical activities of the company's staff, aimed at improving the energy efficiency of production systems for various purposes. The subject of research is computer technologies of training and coaching of industrial enterprise personnel. The purpose of the study is to create tools aimed at training the staff of energy management services. The research is based on scenario modeling of energy manager actions and precedent modeling of equipment reactions to such actions. The modeling of energy manager actions is based on the Deming cycle, and the modeling of reactions of production systems is based on cases of quasi-stationary energy consumption of the technological system. The software platform of the proposed technology consists of software modules that reproduce the control cycle PDCA (Plan-Do-Check-Act) and the subject area of training in the form of a software add-on. The technology allows to work out the actions of the energy manager aimed at planning energy saving measures and calculating the financial and economic results achieved during their implementation.

Keywords: energy management, computer simulator, scenario-precedent technology.

1. *International Organization for Standardization, ISO 50001. Energy Management. Access mode: <https://www.iso.org/standard/69426.html>*
2. *Zakharov ND, Burdo OG, Hobin VA, Mazur AV City energy efficiency management. Integrated Technologies and Energy Saving, 2, '2004, p. 13-17*
3. *Energy Manager - Pro Solution, https://nadascientific.com/engineering_education/energy-manager-pro-solution.html*
4. *Abramovich RP, Samoilo VD Technology of designing computer systems for personnel training in energy. Kyiv, Prometheus, 2021, 111 p*
5. *Sherstyuk VG Scenario-precedent model of a training and training intellectual system. Artificial Intelligence, 2013, № 4, p. 488 - 500.*
6. *Nakhodov VF, Borychenko OV, Ivanko DO Control of energy efficiency in the energy management system. "Bulletin of KNUTD", 2013, №6, p. 67-77.*
7. *Prokopenko VV Energy audit: Textbook / VV Prokopenko, OO Zakladny, PV Kulbachny. - Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky, Polytechnic Publishing House, 2018. - 400 p.*
8. *Sidorenko VV Schuhart-Deming Cycle (PDCA) for the organization of continuous professional development of specialists .: VI International Scientific and Practical Conference "Continuing Education of the New Century: Achievements and Prospects" (May 12-18, 2020 in Zaporozhye (Ukraine))*
9. *Pleskach BM, Davidenko AM, Prokopenko VV, and others. A practical guide to energy saving for industrial, construction and housing and communal services of Ukraine. Luhansk., - "Moonlight", 2012, 700 p.*

Надійшла 17.08.2021
Received 17.08.2021

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.311:681.3

DOI 10.20535/1813-5420.2.2021.247368

П.В. Шиманюк, асп. ORCID 0000-0002-7585-7493
В.О. Мірошник, мол. наук. співроб. ORCID 0000-0001-9036-7268
І.В. Блінов, д-р. техн. наук, ORCID 0000-0001-8010-5301
П.О. Черненко д-р. техн. наук, ORCID 0000-0002-5888-4780
Інститут електродинаміки НАН України

АСПЕКТИ ВРАХУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ВУЗЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Розглянуто особливості впливу даних про температуру повітря на точність прогнозування вузлових навантажень в енергосистемах та зміну точності такого прогнозування в залежності від навчальної вибірки та її обсягу. Показано застосування методу аналізу даних для виявлення аномальних значень та пропусків для зменшення спотворень даних та покращення результатів прогнозування. Для багатофакторного прогнозу вузлових навантажень було використано нейронну мережу глибинного навчання типу LSTM. Для оцінки ефективності точності прогнозу розглянуто різні варіанти вибірок даних для навчання нейронної мережі.

Ключові слова: вузлове електричне навантаження, короткострокове прогнозування, штучна нейронна мережа, рекурентна мережа, багатофакторний прогноз

Вступ. Сьогодні в Україні функціонує модель ринку електричної енергії [1-3] в якому оператори систем розподілу (ОСР) та оператор системи передачі (ОСП) мають купувати електроенергію [4] задля покриття втрат (ТВЕ) у власних мережах [5]. З метою зниження вартості електроенергії для всіх категорій споживачів Кабінетом Міністрів України було затверджено положення щодо покладання спеціальних обов'язків (ПСО) на певних учасників ринку електричної енергії. Також з 01.01.2020 р. вступили у силу зміни в механізмі ПСО, за якими ОСП та ОСР мають купувати свої втрати на РДН.

Прогнозування електричного навантаження [6,7] є одним з важливих напрямків досліджень в електроенергетиці, оскільки дозволяє підвищити ефективність вирішення широкого спектру задач поточного планування та оперативного керування режимами функціонування електроенергетичної системи. Точність прогнозів навантажень впливає на економічність завантаження генеруючого обладнання та відповідно на вартість електроенергії. Зокрема прогноз вузлових навантажень [8,9] необхідний для оптимізації майбутніх та корегування поточних режимів, прийняття оперативних диспетчерських заявок, а також для подання заявок на купівлю та продаж електроенергії ОСР, що обумовлює необхідність отримання прогнозних даних для закупівлі електроенергії на різних сегментах ринку. При незадовільних результатах прогнозування, виникає значний небаланс енергії яку потрібно докуповувати на балансуючому ринку електроенергії, що відповідно збільшує витрати ОСР та ОСП.

Мета та завдання. Публікація присвячена висвітленню особливостей врахування температури повітря для підвищення точності короткострокового прогнозування вузлових навантажень, визначенню взаємозв'язку температури повітря та вузловим навантаженням, а також зміни похибки прогнозу при різних навчальних вибірках.

Матеріал і результати досліджень. На підставі результатів короткострокового прогнозування вузлових навантажень в службах режимів енергосистем вирішується більшість технологічних задач планування режимів, які спрямовані на підвищення економічності та надійності функціонування енергосистем. В цей час ця задача розв'язується дуже спрощено: вузлові навантаження визначаються за допомогою коефіцієнтів розподілу сумарного навантаження по ступеню їх зв'язку з вузловими навантаженнями. Однак є роботи в яких для визначення вузлових навантажень використовують більш удосконалені методи прогнозування. Так в [10] для прогнозування вузлових навантажень використовують інверсію нейронної мережі на базі багатосарового перцептрона. В [11] для прогнозування вузлових навантажень розглянуто алгоритм на основі штучної нейронної мережі типу багатосаровий перцептрон, поєднаний з математичний апарат авторегресії. З використанням методу

авторегресії проводиться попередня обробка даних та оцінка параметрів математичної моделі (ММ). Похибка результатів прогнозування для робочих днів знаходиться в межах 2.4-6.2%. В окремих опублікованих роботах присвячених короткостроковому прогнозуванню сумарного електричного навантаження, враховується вплив метеорологічних факторів (температури повітря, хмарності тощо) [12]. Також проведені попередні дослідження показали, що для підвищення точності та надійності результатів короткострокового прогнозування необхідно додатково враховувати технологічні фактори, зокрема, режим роботи енергоємних підприємств.

Для прогнозування вузлових навантажень використовувалась нейронна мережа глибинного навчання типу LSTM, архітектура якої представлена в [8]. Така нейронна мережа являє собою комбіновану архітектуру на основі багат шарового перцептрону прихований шар якого містить рекурентний модуль пам'яті LSTM [13], а також два повнозв'язних шари, і одне обхідне з'єднання яке подає вхідні дані до вихідних, які сумуються для покращення процесу навчання нейронної мережі. Дані на вхід нейронної мережі подіюються з кроком в 24 значення. В якості активаційної функції прихованих шарів використовувалась функція SELU (scaled exponential linear unit) [14]. Навчання проводиться за допомогою оптимізатора ADAM (adaptive moment estimation) [15]. Для навчання було обрано період в 100 епох. Дані про температуру навколишнього середовища використовувались, як віртуальний вузол і конкатенувались з вхідним вектором навантаження вузлів.

Для дослідження впливу температури повітря на точність прогнозування вузлових навантажень використано дані про навантаження отримані від системи АСКУЕ АТ «Вінницяобленерго» за період з 10.01.2017 по 06.10.2019, що місяць навантаження 15-ти вузлів з погодинною дискретністю. Дані температури повітря отримані з метеостанції міста Вінниці (за індексом міжнародної метеорологічної організації 33562). Використані дані по температурі мають дискретність в одну годину.

Для виявлення взаємозв'язку між вузлами навантаження було проведено кореляцію даних для робочих та вихідних днів, що наведено на рисунках 1-2.

Як видно з наведених даних, при між вузловій кореляції даних робочих днів було виявлено, що декілька вузлів, які не мають жодного зв'язку вузлами, це вузли 4, 11 та 13 (коефіцієнт кореляції яких становить в межах 0.2-(-0.2)). Тоді як для вихідних днів лише 4 вузол не має ніякого зв'язку з іншими вузлами. Можна виділити вузли з найбільшими коефіцієнтами кореляції між собою, це: 3,5, 6, 7, 8, 12. (кореляція становить в межах від 0,7 до 1). Також можна згрупувати вузли 9-10-14-15 з коефіцієнтом кореляції 0.7-0.6, а вузли 1-2 з коефіцієнтом кореляції 0.5-0.4.

Вузли	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	0,58	0,43	-0,22	0,45	0,49	0,54	0,66	0,27	0,49	0,54	0,59	0,22	0,59	0,43
2		1	0,57	-0,18	0,60	0,66	0,59	0,85	0,53	0,68	0,67	0,74	0,26	0,64	0,55
3			1	0,04	0,70	0,77	0,74	0,67	0,69	0,68	0,74	0,79	0,52	0,69	0,66
4				1	-0,05	-0,11	0,04	-0,23	0,20	-0,07	0,06	-0,08	0,21	-0,01	0,00
5					1	0,81	0,79	0,73	0,74	0,74	0,81	0,87	0,54	0,75	0,68
6						1	0,85	0,80	0,74	0,79	0,83	0,91	0,56	0,75	0,74
7							1	0,71	0,74	0,71	0,86	0,89	0,71	0,82	0,72
8								1	0,59	0,79	0,76	0,88	0,32	0,73	0,67
9									1	0,72	0,79	0,75	0,59	0,67	0,71
10										1	0,80	0,81	0,41	0,69	0,72
11											1	0,89	0,60	0,82	0,74
12												1	0,58	0,87	0,75
13													1	0,61	0,47
14														1	0,66
15															1

Рисунок 1. Між вузлова кореляція робочих днів.

Вузли	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1,0	0,58	0,29	-0,31	0,34	0,38	0,41	0,65	0,13	0,44	0,49	0,52	0,02	0,54	0,29
2		1,0	0,56	-0,24	0,60	0,63	0,63	0,85	0,48	0,67	0,71	0,76	0,18	0,71	0,50
3			1,0	-0,07	0,75	0,81	0,78	0,69	0,71	0,71	0,76	0,78	0,52	0,68	0,63
4				1,0	-0,22	-0,26	-0,14	-0,31	0,09	-0,16	-0,10	-0,25	0,10	-0,18	-0,14
5					1,0	0,83	0,82	0,77	0,76	0,78	0,80	0,87	0,53	0,77	0,65
6						1,0	0,90	0,82	0,74	0,80	0,84	0,90	0,56	0,75	0,73
7							1,0	0,81	0,75	0,79	0,84	0,90	0,59	0,79	0,70
8								1,0	0,59	0,80	0,83	0,92	0,33	0,80	0,67
9									1,0	0,73	0,74	0,71	0,61	0,66	0,67
10										1,0	0,83	0,82	0,41	0,73	0,71
11											1,0	0,88	0,45	0,80	0,70
12												1,0	0,51	0,87	0,72
13													1,0	0,47	0,43
14														1,0	0,61
15															1

Рисунок 2. Між вузлова кореляція вихідних днів.

Також досліджено кореляцію даних між вузлами навантаження та температурою. За результатами якої (Рисунок 3), видно що зв'язок робочих та вихідних днів з температурою є ідентичним. Майже усі вузли мають від'ємний кореляційний зв'язок з температурою.

Кореляція вузлів	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
робочі дні	-0,66	-0,76	-0,34	0,33	-0,42	-0,47	-0,48	-0,79	-0,25	-0,57	-0,58	-0,63	0,13	-0,53	-0,40
вихідні	-0,66	-0,76	-0,34	0,33	-0,42	-0,47	-0,48	-0,79	-0,25	-0,57	-0,58	-0,63	0,13	-0,53	-0,40

Рисунок 3. Кореляція вузлів навантаження з температурою повітря.

Для визначення оптимального обсягу навчальних вибірок для зимового та літнього періодів було проведено порівняльний аналіз середньодобових графіків навантаження та температури для усіх вузлів за весь період. Проаналізувавши графіки навантаження та температури повітря можна виділити такі загальні особливості:

- Усі вузли мають залежність від температури в зимовий період, при чому одні мають лінійну залежність (тобто форма графіків навантаження і температури подібні), а інші мають від'ємний кореляційний зв'язок.
- Зимовий період умовно можна виділити починаючи з періоду 25.09 - 10.10.2017 по 04-05.04.2018. В даний період відбувається спад температури і зростання величини навантаження вузлів.
- Після чого в період з 4 по 9 квітня відбувається різкий спад навантаження та умовно починається літній період під час якого навантаження майже не залежить від впливу температури. Закінчується такий період в межах 20-25 вересня 2018 року.
- В деяких вузлах присутня значна кількість провалів навантаження (в деяких випадках це характеризується наявністю святкових днів, а в інших – появою імовірною появою аварійних ситуацій), у вузлі 10 присутнє аномальне збільшення навантаження в листопаді 2018 року, що перевищує нормальні значення в 4 рази.

Таким чином для навчальних вибірок можна виділити умовно зимовий з 01.10.2017 по 04.04.2018 та умовно літній з 09.04.2018 по 20.09.2018 періоди з виділенням останніх 7 днів для оцінки прогнозування. На рисунках 4-6 наведено приклади графіків співвідношення навантаження та температури для обраного періоду.

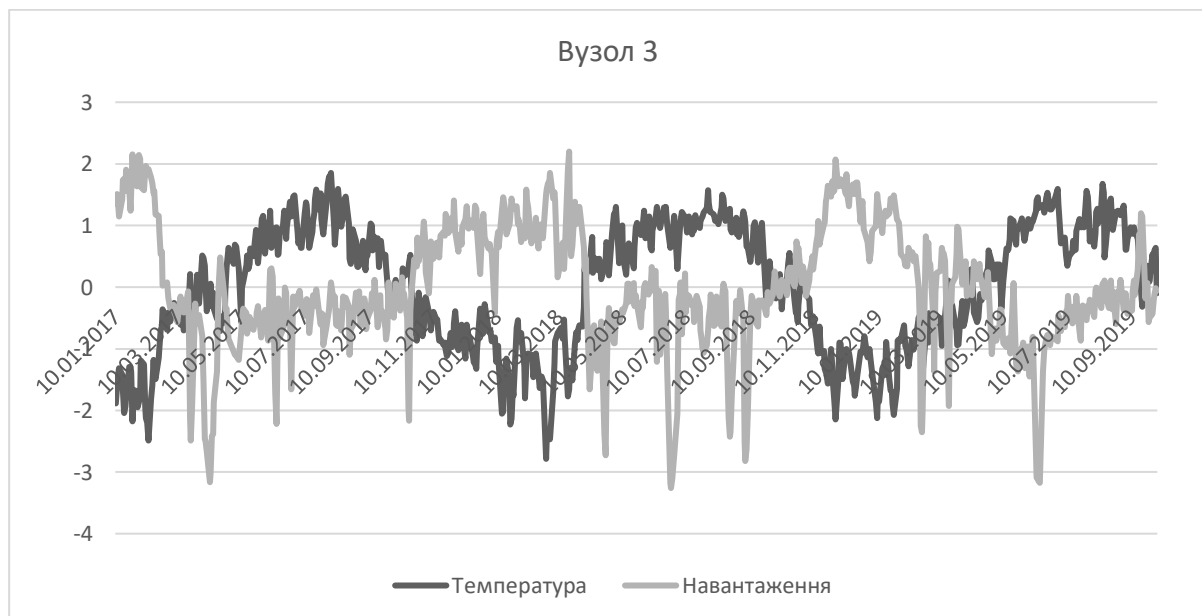


Рисунок 4. Графіки співвідношення навантаження та температури вузла 3.

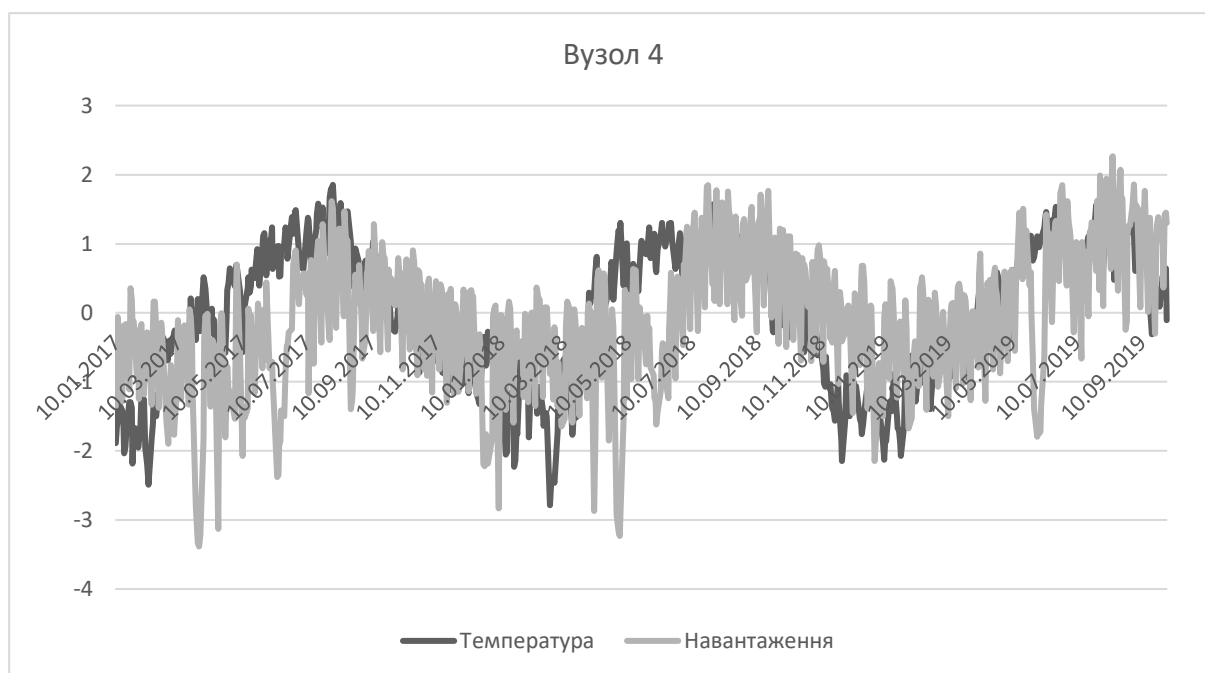


Рисунок 5. Графіки співвідношення навантаження та температури вузла 4.



Рисунки 6. Графіки співвідношення навантаження та температури вузла 8.

Також для перевірки ефективності прогнозування вузлових навантажень виконано аналіз даних для виявлення аномальних значень та пропусків (в подальшому аналіз даних називаємо достовіризацією). Для цього розроблено алгоритм двоетапної достовіризації, яка включає в себе етап кластеризації даних для виділення аномальних значень та їх заміну, після чого за допомогою методу сезонної декомпозиції виділяється залишкові дані, які використовуються для повторної перевірки методом кластеризації.

Детальний аналіз даних вузлового навантаження виявив значну кількість аномальних значень, які потребують заміни.

У таблиці 1 наведено статистичні характеристики навантаження вузлів 1 та 11, до та після процедури достовіризації.

Таблиця 1. Статистичні характеристики навантаження вузлів 1 та 11 до та після процедури достовіризації.

Вузол	Вузол 1		Вузол 11	
	До достовіризації	Після достовіризації	До достовіризації	Після достовіризації
Середнє, кВт·год	2365	2393	15684	13058
СКО, кВт·год	444	372	13787	3315
Коефіцієнт варіації, в.о.	0,19	0,16	0,88	0,25
Мінімальне значення кВт·год	0	1284	0	4777
25 перцентиль, кВт·год	2136	2148	10760	10609
Медіана, кВт·год	2387	2394	12939	12765
75 перцентиль, кВт·год	2638	2641	15797	15318
Максимальне значення, кВт·год	3814	3814	181949	24773

Графік навантаження відповідних вузлів до та після достовіризації, наведено на рисунку 7.

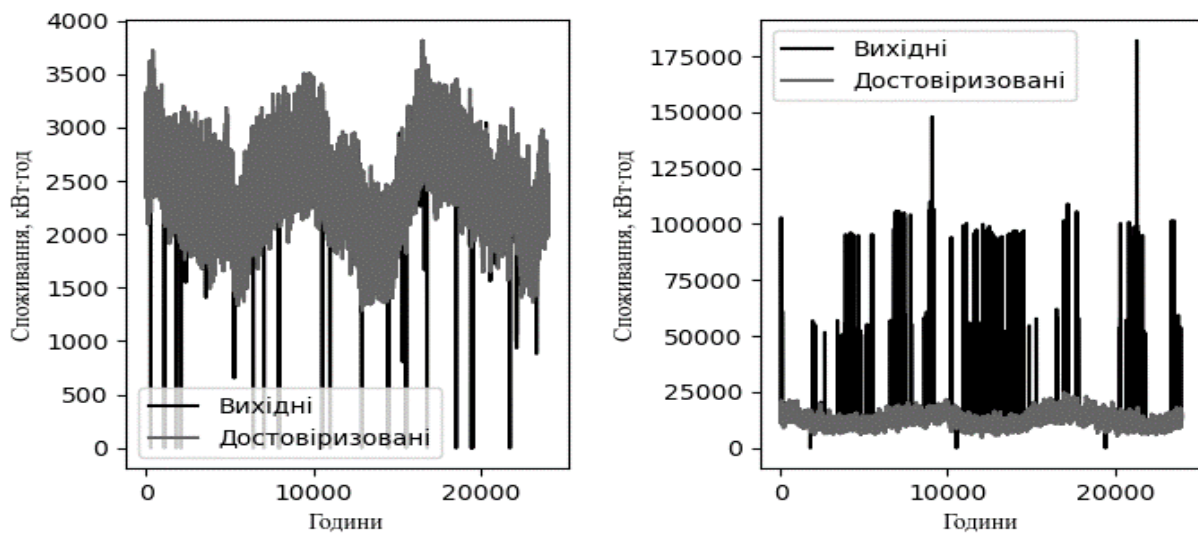


Рисунок 7. – Графік навантаження вузлів до достовіризації та після достовіризації.

Як видно з наведених даних, алгоритм достовіризації в цілому успішно виявив та відновив одиніки викиди, але якість ідентифікації та відновлення групових викидів значно нижча.

Результати прогнозу наведено в таблицях 3-4. Для оцінки точності використовувався показник MARE. Розрахунок похибки проводився на даних за період з 01.01.2019 по 06.10.2019, які не використовувались для навчання нейронної мережі.

Таким чином показано, що використання методу достовіризації для даних вузлового навантаження дозволяє зменшити середню похибку прогнозу з 13,74 % до 11,52%. Використання даних температури повітря в якості додаткових факторів прогнозування дозволяє додатково зменшити похибки прогнозу в межах з 14,22 % до 11,17 %. Також точність прогнозування залежить від вибірок даних. При використанні вибірок за умовно зимовий або літній період в деяких випадках це дозволяє зменшити похибки прогнозу але точність в першу чергу залежить від об'єму вибірки.

Таблиця 2. – Вибірki навчальних та тестових даних для прогнозування.

Вибірка	Додаткові фактори		Аналіз даних	Об'єм навчальної вибірки	Об'єм тестової вибірки
Увесь період	З температурою		Не достовіризовані дані	10.01.2017 по 06.09.2019	06.09.2019 по 06.10.2019.
			Достовіризовані дані	10.01.2017 по 06.09.2019	06.09.2019 по 06.10.2019
	Без температури		Не достовіризовані дані	10.01.2017 по 06.09.2019	06.09.2019 по 06.10.2019
			Достовіризовані дані	10.01.2017 по 06.09.2019	06.09.2019 по 06.10.2019
Робочі дні	З температурою	Зимовий період	Достовіризовані дані	01.11.2017 по 20.03.2018	21.03.2018 по 29.03.2018
	З температурою	Літній період	Достовіризовані дані	01.05.2018 по 20.08.2018	21.08.2018 по 29.08.2018
Вихідні дні	З температурою	Зимовий період	Достовіризовані дані	04.11.2017 по 18.03.2018	24.03.2018 по 04.04.2018
	З температурою	Літній період	Достовіризовані дані	05.05.2018 по 19.08.2018	25.08.2018 по 15.09.2018

Таблиця 3. Результати прогнозу достовіризованих та не достовіризованих днів.

Тип даних	Не достовіризовані дані		Достовіризовані дані	
	Одно-факторний	Багато-факторний	Одно-факторний	Багато-факторний
1	7,60	8,33	6,80	5,86
2	24,49	23,31	23,48	24,17
3	16,76	16,87	16,28	15,73
4	13,92	10,52	9,78	8,34
5	8,74	8,57	8,28	8,66
6	10,60	10,48	10,51	10,04
7	13,40	14,10	13,95	13,24
8	7,18	6,93	6,68	6,83
9	12,01	12,18	11,44	11,65
10	20,91	20,55	20,27	19,74
11	22,57	26,96	9,30	8,38
12	6,87	7,01	7,01	6,62
13	16,32	23,42	9,31	9,31
14	17,69	16,63	11,68	11,00
15	7,12	7,40	7,96	7,95
Середня	13,74	14,22	11,52	11,17
Мінімальна	6,87	6,93	6,68	5,86
Максимальна	24,49	26,96	23,48	24,17

Таблиця 4. Результати прогнозування за зимовий та літній періоди для різних типів днів.

Тип даних	Зимовий період (01.11.2017-04.04.2018)		Літній період (01.05.2018-15.09.2018)	
	Робочі дні	Вихідні дні	Робочі дні	Вихідні дні
1	10,13	8,34	8,79	11,05
2	10,01	19,18	16,47	7,29
3	12,36	39,12	19,62	17,1
4	19,06	20,65	21,02	19,37
5	6,88	5,3	7,7	10,6
6	8,44	4,96	12,87	10,82
7	8,46	9,68	10,24	9,77
8	9,24	4,6	4,79	4,82
9	11,37	6,8	5,44	4,76
10	11,78	39,03	17,95	22,39
11	6,61	7,12	8,42	8,78
12	7,59	3,88	4,4	4,84
13	5,97	11,78	18,84	13,42
14	6,58	6,68	13,91	20,91
15	28,3	13,46	25,86	19,98
Середня	10,85	13,37	13,09	12,39
Мінімальна	5,97	3,88	4,4	4,76
Максимальна	28,3	39,12	25,86	22,39

Висновки. За результатами виконаних досліджень показано, що використання температури повітря в якості додаткового фактору для короткострокового прогнозування вузлового навантаження дозволяє зменшити похибку прогнозу з 11,52% до 11,17%. На основі аналізу даних навантаження та температури визначено, що дані мають протилежний кореляційний зв'язок. Також в залежності від типу вибірки даних змінюється вплив температури і тим самим змінюється точність результатів прогнозування. Встановлено, що вибір навчальної вибірки та її обсяг для навчання нейронної мережі впливає на точність результатів прогнозування. Використання розробленого методу достовіризації дозволяє виявити значні аномальні значення та пропуски даних, тим самим підвищити точність прогнозування. Ретельний аналіз результатів прогнозування вузлових навантажень показав, що для зменшення похибки для вузлів з різко змінним навантаженням необхідний більш удосконалений метод достовіризації даних.

1. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 №2019-VIII.
2. Ivanov H., Blinov I., Parus Y. Simulation Model of New Electricity Market in Ukraine. *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764184>
3. Блінов І.В. Проблеми функціонування та розвитку ринку електричної енергії України. (за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 3 лютого 2021 р.). Вісник НАН України. 2021. № 3. С. 20-28
4. Постанова НКРЕКП «Про затвердження Правил ринку» №307 від 14.03.2018 .
5. Блінов І. В., Мірошник В. О., Шиманюк П.В. Оцінка вартості похибки прогнозу «на добу наперед» технологічних втрат в електричних мережах України// *Технічна електродинаміка*. 2020. № 5. С 70-73. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.070>
6. І. Блінов, В. Мірошник, П. Шиманюк Короткостроковий інтервальний прогноз сумарного відпуску електроенергії виробниками з відновлюваних джерел енергії Праці Інституту електродинаміки НАН України. 2019. Вип. 54: С. 5–12
7. Seyedeh Narjes Fallah; Mehdi Ganjkhani; Shahaboddin Shamshirband. Computational Intelligence on Short-Term Load Forecasting: A Methodological Overview. MDPI 2019.

8. Черненко П.О., Мірошник В.О., Шиманюк П.В. Однофакторне короткострокове прогнозування вузлових електричних навантажень енергосистеми. Технічна електродинаміка №2, Київ, 2020. С. 67-73. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.067>

9. Aoyang Han, Bin Zhang, Zhongliang Sun, Zhiqiang Niu, Junxiang Wang Nodal load forecast model considering network topology constraints. IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference. Xi'an, China. 2016. Pp. 939-943.

10. G.P. Shumilova, N.Je. Gotman, T.B. Starceva Prediction of the active and reactive load of EPS units using inversion of an artificial neural network. Elektrichestvo. No 6. 2007. Pp. 7-13.

11. G. Hou, K. Xu, S. Yin, Y. Wang, Y. Han, Z. Wang, Y. Mao, Z. Lei A novel algorithm for multi-node load forecasting based on big data of distribution network // International Conference on Advanced Electronic Science and Technology (AEST 2016), Shenzhen, 2016, Pp 655-667.

12. Черненко П., Сичова В. Удосконалення алгоритму визначення впливу температури повітря на сумарне електричне навантаження енергосистеми для підвищення точності короткострокового прогнозування. Технічна електродинаміка. 2021. № 2. С. 77–83.

13. S. Hochreiter, J. Schmidhuber Long Short-term Memory // Neural computation. 1997. No 9. Pp 1735-1780.

14. G. Klambauer, T. Unterthiner, A. Mayr, S. Hochreiter Self-Normalizing Neural Networks // Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. № 30. Pp. 971-980.

15. D.P. Kingma, J. Ba Adam. A Method for Stochastic Optimization // Proc. of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR).

P. Shymaniuk, PhD student, ORCID 0000-0002-7585-7493

V. Miroshnyk, Research Assistant ORCID 0000-0001-9036-7268

I. Blinov, Doctor of Technical Sciences, ORCID 0000-0001-8010-5301

P. Chernenko, Doctor of Technical Sciences, ORCID 0000-0002-5888-4780

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

ASPECTS OF TEMPERATURE TAKING INTO ACCOUNT TO INCREASE THE ACCURACY OF SHORT-TERM FORECASTING OF NODE LOADS

The peculiarities of the influence of air temperature data on the accuracy of forecasting of nodal loads in power systems and how the accuracy of such forecasting changes depending on the training sample and its volume are considered. The application of the data analysis method to detect anomalous values and omissions to reduce data distortion and improve forecasting results is considered. A neural network of deep learning of the LSTM type was used for multifactor prediction of nodal loads. To evaluate the effectiveness of the forecast accuracy, various variants of data samples for neural network training are considered.

Keywords: nodal electrical load, short-term forecasting, artificial neural network, recurrent network, multifactor forecasting

1. On Electricity Market: The Law of Ukraine. No. 2019-VIII of 13.04.2017.

2. Ivanov H., Blinov I., Parus Y. Simulation Model of New Electricity Market in Ukraine. *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764184>

3. Blinov I.V. Problems of functioning and development of a new electricity market model in Ukraine (According to the scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, February 3, 2021) // *Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr.* 2021. No 3. Pp. 20-28. (Ukr) DOI: doi.org/10.15407/visn2021.03.020

4. NEURC's Resolution "On Approval of Market Rules" No. 307 dd 14. 03.2018

5. I. Blinov, V. Miroshnyk, P. Shymaniuk The cost of error of "day ahead" forecast of technological losses of electrical energy. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No.5 pp 70-73 DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.070>

6. I. Blinov, V. Miroshnyk, P. Shymaniuk Short-term interval forecast of total electricity generation by renewable energy sources producers. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2019. No. 54 pp. 5-12.

7. Seyedeh Narjes Fallah; Mehdi Ganjkhani; Shahaboddin Shamshirband. *Computational Intelligence on Short-Term Load Forecasting: A Methodological Overview*. MDPI 2019.

8.P. Chernenko, V. Miroshnyk, P. Shymaniuk Univariable short-term forecast of nodal electrical loads of energy systems. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No. 2. Pp 67-73. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.067>

9.Aoyang Han, Bin Zhang, Zhongliang Sun, Zhiqiang Niu, Junxiong Wang Nodal load forecast model considering network topology constraints. *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference*. Xi'an.China. 2016.Pp. 939-943.

10.G.P. Shumilova, N.Je. Gotman, T.B.Starceva Prediction of the active and reactive load of EPS units using inversion of an artificial neural network. *Elektrichestvo*. No 6. 2007. Pp. 7-13.

11.G. Hou, K. Xu, S. Yin, Y. Wang, Y. Han, Z. Wang, Y. Mao, Z. Lei A novel algorithm for multi-node load forecasting based on big data of distribution network. *International Conference on Advanced Electronic Science and Technology (AEST 2016)*, Shenzhen, 2016, Pp 655-667.

12.P. Chernenko, V. Sychova. 2021. Improving the algorithm for determining the effect of air temperature on the overall electrical load of the power system to improve the accuracy of short-term forecasting. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. №2, pp. 77-83.

13.S. Hochreiter, J. Schmidhuber Long Short-term Memory // *Neural computation*. 1997. No 9. Pp 1735-1780.

14.G. Klambauer, T. Unterthiner, A. Mayr, S. Hochreiter Self-Normalizing Neural Networks // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. № 30. Pp. 971-980.

15.D.P. Kingma, J. Ba Adam. A Method for Stochastic Optimization // *Proc. of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR)*.

Надійшла 21.09.2021
Received 21.09.2021

ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ ENERGY OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

УДК 622.235.535

DOI 10.20535/1813-5420.2.2021.247379

О. О. Вовк, д-р техн. наук., проф. ORCID 0000-0001-7531-9847
І. О. Рабош, PhD ORCID 0000-0001-6863-3945
Р.Ф.Харченко, магістр ORCID 0000-0003-1384-5144
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Е.В.Кукуяшний, в.о директора
ДП «Дирекція по будівництву об'єктів» Міністерства енергетики України

ПЕРСПЕКТИВИ ТА ВИКЛИКИ СПРАВЕДЛИВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ВУГІЛЬНИХ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ

В роботі проаналізовані зміни, що відбуваються останніми роками у вугільній галузі України та світу і вивчені заходи з інноваційної діяльності в енергетиці. Виявлені основні цілі, виклики і перспективи справедливої трансформації вугільних регіонів шляхом аналізу сучасного стану вугільної галузі України та світових тенденцій. Визначені інструменти державної політики щодо забезпечення вивільнених працівників вугільних регіонів робочими місцями у разі ліквідації/трансформації шахт та встановлені альтернативи політики сприяння зайнятості вивільнених працівників для прийняття ефективних рішень. Вивчені особливості та чинники створення технологічних або екотехнологічних парків на базі вугільних підприємств. Зроблено висновок, що одним з ефективних рішень справедливої трансформації вугільних регіонів може бути трансформація/перетворення шахти як державного підприємства у паркову систему шляхом залучення енергетичних компаній. Перспективними є реалізація інвестиційних проєктів з використанням інфраструктури шахти для іншого виду діяльності. Значна робота має приділятися програмам створення робочих місць та навчання/перенавчання/перекваліфікації працівників, проєктуванню індустріальних парків та реалізації інноваційних проєктів.

Ключові слова: енергетичний сектор, інновації, трансформація вугільних регіонів, енергетичне законодавство, вугільна промисловість, соціальні гарантії, екотехнологічні парки.

Вступ

Зміни технологічних укладів, котрі зараз відбуваються у світі, створюють нові завдання перед енергетичним сектором та промисловістю України. Енергетичний сектор потребує проведення широкого спектру заходів щодо модернізації об'єктів інфраструктури паливно-енергетичного комплексу, поширення інформаційно-комунікаційних технологій, впровадження інтелектуальних мереж тощо. Водночас має місце підвищення ефективності енерговикористання, впровадження чистих безпечних технологій та процесів, зростання частки використання відновлюваних джерел енергії.

Враховуючи практику переходу провідних країн світу до низьковуглецевої економіки, створення сталого та конкурентноспроможного виробництва, Україна потребує значних інноваційних перетворень та докорінної трансформації вугільної галузі. Узяті міжнародні зобов'язання зі скорочення викидів парникових газів (ПГ) у межах Паризької угоди, наявні соціально-економічні тенденції та екологічні ризики свідчать, що цей процес буде супроводжуватися ліквідацією/трансформацією гірничовидобувних підприємств. У зв'язку з цим, необхідним є впровадження низьковуглецевих енерготехнологій та технологій чистого/зеленого виробництва на базі трансформованих вугільних регіонів України, що потребує ефективних рішень та відповідних політичних інструментів з підтримки інноваційних процесів.

Аналіз останніх досліджень. Постановка проблеми. Стійкий або сталий розвиток є загальною концепцією, що передбачає необхідність встановлення балансу між задоволенням сучасних потреб людства і захистом інтересів майбутніх поколінь, включаючи їх потребу в безпечному і здоровому довкіллі. Однією з найважливіших цілей сталого розвитку є забезпечення всезагального доступу до надійного і сталого енергопостачання та сучасних екологічних джерел енергії [1]. Таким чином, для досягнення сталості в енергетичній сфері необхідним є забезпечення інноваційного розвитку вугільних регіонів та активне впровадження інновацій.

Згідно з проектом КМУ «Про схвалення Другого національно визначеного внеску України до Паризької угоди» в рамках електроенергетичного сектору планується проведення технологічної модернізації існуючих вугільних ТЕС України або заміна їх на більш сучасні технології [2]. Водночас відновлювана енергетика може замінити стару вугільну генерацію. Також Україна має перспективи щодо структурних змін в енергетичній системі та гарантування безперебійного, низьковуглецевого енергопостачання. Для досягнення цього результату після 2030 року, Україні потрібно розробити та реалізувати поетапну стратегію закриття вугільних шахт і створити основу для комплексної декарбонізації сектору на національному рівні.

В документах зазначається, що у 2030 році значну частину електричної генерації складатиме АЕС (близько 50%), з відновлюваних джерел енергії (в т.ч. гідроенергії) генеруватиметься більше 30%, а вугільні ТЕС – 13% [2–4]. Для досягнення бажаних цілей щодо скорочення викидів ПГ у секторі теплопостачання, ТЕЦ мають збільшити частку використання ВДЕ з 14 % до щонайменше 18 % у 2030 р. зі зростанням обсягів виробництва тепла, виробленого з використанням біопалива, на 30 %. Такі заходи спрямовані на стимулювання декарбонізації української промисловості, що включають побудову системи моніторингу, звітності та верифікації викидів ПГ, запровадження системи торгівлі квотами на викиди ПГ (у 2025–2027 рр.).

На сьогодні Україна приймає активну участь у міжнародному співробітництві щодо послаблення негативного впливу на довкілля, зокрема й від функціонування вугільної галузі. Відповідні зобов'язання передбачені Угодою про асоціацію між Україною та ЄС, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, ратифікованою Законом України від 16 вересня 2014 року № 1678-VII; Паризькою угодою, ратифікованою Законом України від 14 липня 2016 року № 1469-VIII, та іншими міжнародними договірними документами [2]. Разом з тим, Україна є учасником ініціативи Європейської комісії «Європейський зелений курс» (Green Deal) [5].

Незважаючи на природні запаси вугілля, вуглевидобувна промисловість України перебуває у напруженому стані. До основних проблем галузі належать: велике навантаження на державний бюджет через субсидії; значна залежність зайнятості населення вугільних регіонів від роботи шахт; висока собівартість вугілля, що перевищує ціну імпортного, світова відмова від викопного палива тощо. У зв'язку з цим, розроблено Концепцію трансформації вугільних регіонів України [6]: на виконання протокольного рішення за результатами Всеукраїнського зібрання працівників вугільної промисловості України від 25 лютого 2020 р. за участю Президента України; на виконання пункту 8.1 Програми діяльності КМУ, затвердженої постановою КМУ від 12 червня 2020 р. № 471; на виконання пункту 279 плану пріоритетних дій Уряду на 2020 рік, затвердженого розпорядженням КМУ від 09 вересня 2020 р. № 1133-р; на виконання протокольного рішення за результатами засідання Координаційного центру з питань трансформації вугільних регіонів України від 08 жовтня 2020 р.; з урахуванням завдань, передбачених Стратегічною ціллю І. «Формування згуртованої держави в соціальному, гуманітарному, економічному, екологічному, безпековому та просторовому вимірах» Державної стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 роки, затвердженої постановою КМУ 05 серпня 2020 р. № 695; у зв'язку з початком комплексного реформування вугільної галузі з урахуванням світових трендів щодо декарбонізації; з урахуванням потреб жінок та чоловіків під час формування та реалізації державної політики у сфері трансформації вугільних регіонів.

Для України критично важливо виважено підійти до трансформації вугільних регіонів, формування енергетичного складника національного Green Deal та виконання поставлених цілей. Для цього необхідно враховувати низку актуальних національних особливостей у вугільному секторі, а саме соціально-економічне значення вугільної галузі, національну індустрію викопного палива, енергетичну безпеку, соціальне навантаження тощо. Адже, в Україні сформовані соціально-економічні кластери – територіальні соціально-господарські утворення, побудовані навколо вугільних регіонів. У цій сфері задіяно десятки тисяч людей, а саме, цілі регіони нерозривно пов'язані з видобутком та використанням вугілля [7]. Тому важливим викликом є формування якісної альтернативи таким традиційним соціально-економічним відносинам України.

Зважаючи на досвід Чеської Республіки, програма «Re: Start», яка там діє, визначає принципи успішної трансформації вугільних регіонів за сімома напрямками: бізнес та інновації, прямі інвестиції, науково-дослідна робота, кадрові ресурси, соціальна стабілізація, довкілля, інфраструктура та органи державної влади, практична реалізація. Самі вугільні регіони вже реалізують різні проекти у своїх громадах. Наприклад, було відкрито кілька Інноваційних центрів для стимулювання розвитку місцевого бізнесу, створено освітні програми для місцевого населення та керівництва міст («Místá zblízka»), а також мобілізаційні платформи, спрямовані на розробку моделей регіональної трансформації («Re: Vize Ústí») [8]. Пріоритети проактивної політики структурних змін в Німеччині включають освіту і наукові дослідження, економічні інновації, розвиток інфраструктури і покращення житлово-побутових умов за допомогою проектів екологічної та культурної ідентичності (наприклад, створення державних музеїв на території колишніх вугільних і металургійних підприємств) тощо [8].

У Румунії упродовж останніх кількох років починає також з'являтися модель відповідальної відмови від використання вугілля. Наприклад, долину Жіулуй було обрано пілотним регіоном для платформи «Трансформація вугільних регіонів» [Coal Regions in Transition Platform], яку було створено Європейською Комісією у грудні 2017 року. Мета платформи полягає у сприянні виробленню довгострокових стратегій, спрямованих на прискорення переходу до екологічно чистої енергії за рахунок більшої уваги до аспектів соціальної справедливості, здобуття нових знань і фінансування реального сектору економіки. Як результат, п'ять неурядових організацій з долини Жіулуй вже відгукнулись на запрошення Міністерства з питань фінансування з фондів ЄС і подали пропозиції щодо соціально-економічної трансформації регіону. Ці пропозиції включають перетворення закритих шахт на нові економічні, соціальні та культурні центри; створення управління зі сприяння розвитку туризму; створення управління з питань залучення інвестицій; створення підрозділу технічної допомоги для надання підтримки органам місцевого самоврядування, приватному сектору і громадянам у питаннях залучення фінансування з фондів ЄС. Результати кількох досліджень вказують на те, що вугільні регіони Румунії мають значний потенціал для виробництва від 2 000 до 5 000 ГВт•г електроенергії на рік за допомогою сонячних електростанцій, а також великий потенціал щодо виробництва електроенергії за допомогою вітряних електростанцій, який може сягати від 5 000 до 10 000 ГВт•г на рік [8].

Аналіз світових тенденцій демонструє різний ступінь розуміння критичності моменту, котрий настав для вугільної галузі в контексті сталого розвитку. Підготовку до декарбонізації світової економіки розпочала і Колумбія, яка є потужним експортером вугілля. У 2012 році уряд Колумбії започаткував Колумбійську стратегію розвитку низьковуглецевих продуктів (CLCDS), метою якої є сприяння сталому зростанню та підготовка до «майбутньої глобальної економіки, що усвідомлює вуглецеві явища» [9]. Найважче дається енергетична вугільна трансформація тим країнам, які мають розвинуту вугільну галузь, або тим, які пов'язують із вугіллям власну енергетичну безпеку. Наприклад, Іспанія різко зменшила свою залежність від вугільної енергії, тому, як наслідок, викиди CO₂ від виробництва електроенергії у 2019 році впали на 33,3% порівняно з 2018 роком. Зважаючи на це, Іспанія досягла за один рік (2019) своєї мети, яка стосується невикористання вугілля на електростанціях для виробництва електроенергії, що, як очікувалося, займе десятиліття (до 2030 року). [9].

Отже, процеси трансформації вугільної галузі у світі започатковані уже не одне десятиліття тому. Ці перетворення суттєво впливають на економіку країн, їх енергетичну безпеку та супроводжуються складними соціальними проблемами. Україна перебуває на початку трансформації вугільних регіонів та переформатування своєї енергетичної сфери. Основними труднощами, котрі зараз стоять перед державою є: низькі темпи приватизації, трансформації або закриття збиткових шахт; відсутність стимулів до зниження витрат через наявну систему державної підтримки підприємств галузі (компенсацію витрат); брак інвестиційних ресурсів для здійснення технічної модернізації шахт; проблеми забезпечення гарантій соціального захисту та зайнятості працівників державних вугледобувних підприємств у випадку їхньої ліквідації та консервації. Таким чином, значні зміни, що відбуваються останнім часом в енергетичному ландшафті та розвиток нових технологій потребують проведення подальших досліджень з вивчення світового та національного досвіду за напрямом ефективної трансформації вугільних регіонів та поступової відмови від вугілля.

Мета роботи та завдання дослідження.

Метою роботи є визначення основних тенденцій і пріоритетів трансформації вугільних регіонів України шляхом аналізу динаміки формування відповідних політичних та стратегічних чинників для прискорення інноваційних процесів у вугільній галузі.

Для реалізації мети були поставлені наступні завдання:

– виявити основні цілі, виклики і перспективи ефективної трансформації вугільних регіонів шляхом аналізу сучасного стану вугільної галузі України;

– вивчити чинники створення технологічних або екотехнологічних парків на базі вугільних регіонів України

– визначити інструменти державної політики щодо забезпечення вивільнених працівників вугільних регіонів робочими місцями у разі ліквідації шахт та встановлення альтернатив політики сприяння зайнятості вивільнених шахтарів для прийняття ефективних рішень щодо трансформації вугільних регіонів України.

Викладення основного матеріалу. За даними Міністерства енергетики, з 2004 р. в Україні було ліквідовано 68 державних гірничих підприємств, 19 державних шахт ліквідуються або перебувають у стадії підготовки до ліквідації. Загальний видобуток вугілля зменшився з близько 65 млн. т. у 2014 р. до 29 млн. т. у 2020 р. (рис. 1) [10].

Водночас вітчизняний вугільний сектор повністю залежить від щорічних багатомільярдних державних дотацій. З 33 шахт, що перебувають під державним контролем, тільки чотири приносять прибуток. У 2013 р. загальна сума на реструктуризацію вугільної промисловості та покриття собівартості вугілля склала майже 14 млрд. грн. Після початку війни на Сході України приблизно 2/3 функціонуючих державних вугільних шахт залишилися на неконтрольованій території, що призвело до скорочення витрат. Проте аналіз державних бюджетів останніх років свідчить про поновлення тенденції щорічного зростання сум відрахувань, і у 2020 р. вони становили вже більше 4 млрд. грн. (рис. 2). [10].

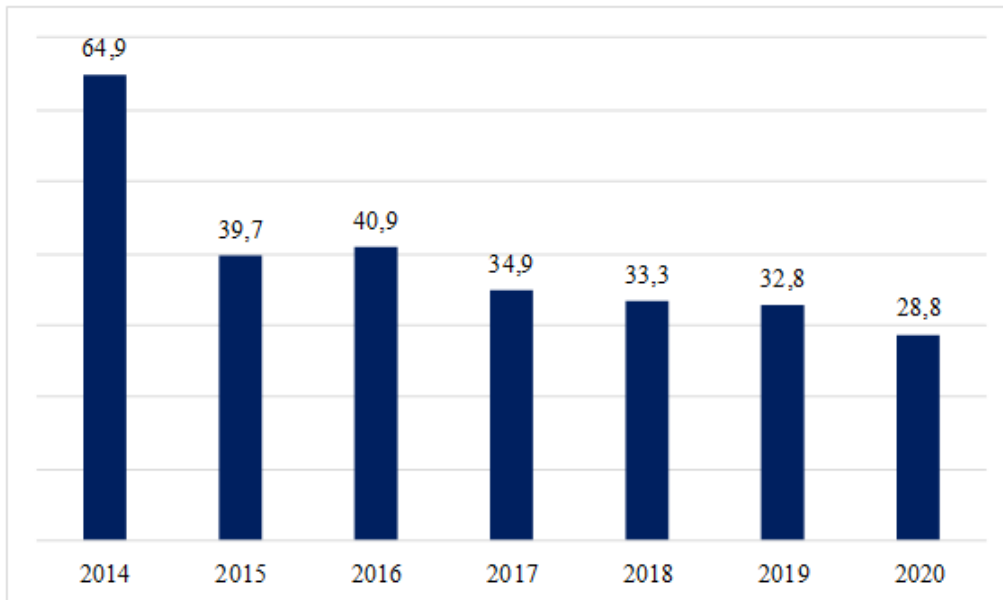


Рисунок 1 – Динаміка видобутку вугілля в Україні за 2014–2020 рр., млн. т.



Рисунок 2 – Видатки з держбюджету на підтримку та реформування галузі у 2015–2021 рр., млн. грн.

Кількість працівників, задіяних в галузі, за період 1991–2013 рр. зменшилася на 88% і у 2013 р. становила приблизно 120 тис. осіб. Тенденція скорочення робочих місць зберігається і сьогодні, на що значно вплинула війна на території Донецької та Луганської областей. Станом на 2021 р. на державних шахтах працює близько 32 тис. осіб [9]. Крім того, в Україні нині стрімко зростає заборгованість по заробітній платі перед шахтарями (рис. 3).

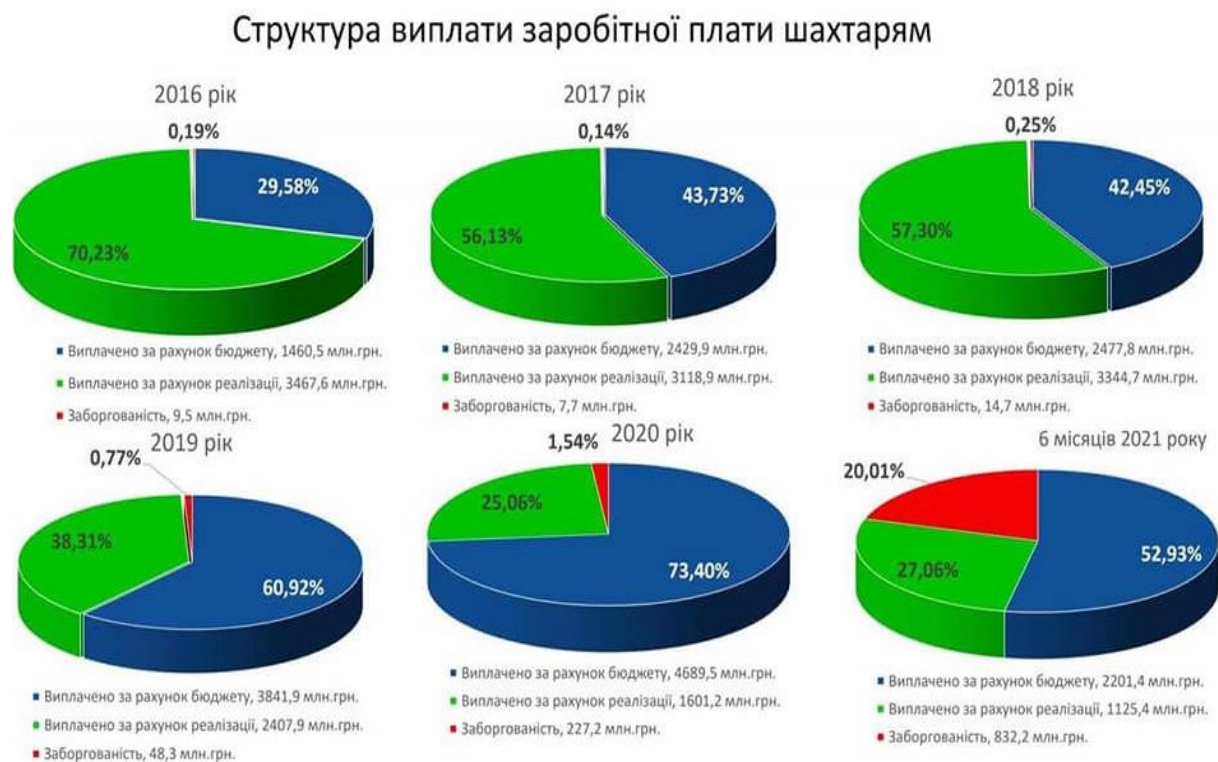


Рисунок 3 – Структура виплати заробітної плати шахтарям у 2016–2021 рр., млн. грн

Слід зазначити, що «Енергетична стратегія України до 2035 р.» передбачає закриття усіх збиткових державних підприємств галузі до 2025 р. [11]. Наявний досвід закриття шахт в Україні свідчить, що воно проводилося без адекватних планів соціально-економічної підтримки територій та призвело до виникнення комплексних негативних наслідків. Важливе значення для видобувного сектора має дієва та ефективна нормативно-правова база, стратегії та практика, що можуть надати позитивний соціально-економічний ефект та реальні гарантії, котрі забезпечать пом'якшення соціальних і екологічних наслідків та збереження біорізноманіття і екосистем після закриття гірничодобувних підприємств [6]. Враховуючи практику переходу провідних країн світу до низьковуглецевої економіки, Україні необхідні ефективні інструменти щодо механізму докорінної трансформації енергетичного сектору.

Як уже зазначалося, урядом підготовлена Концепція трансформації вугільних регіонів України на період до 2030 р., що містить план поступового закриття шахт і здійснення справедливої трансформації вугільних регіонів. Таким чином, виникають нові виклики щодо пошуку та реалізації рішень, які допоможуть трансформувати шахтарські регіони, використовуючи потенціал міст та їх мешканців і створюючи привабливе для життя середовище на місці закритих підприємств [8]. Водночас ефективну трансформацію вугільних регіонів слід розглядати в комплексній системі трансформації структури економіки України в сучасних умовах (рис.4) [12]. За розрахунками науковців вітчизняна макроекономіка до 2050 р. може перетворитися на господарство з домінуванням «зеленої енергетики» [12] та Індустрії 4.0., основними принципами яких є горизонтальні зв'язки. Розподілений характер джерел відновлюваної енергії потребує для одержання електроенергії співробітництва мільйонів суб'єктів, з'єднаних розгалуженими smartgrid – «розумними» мережами електропостачання. Тобто саме горизонтальні (мережеві) енергетичні структури створюють передумови для кардинального перетворення світової економіки та здатні стати полем вирощування безлічі нових видів економічної діяльності [12].

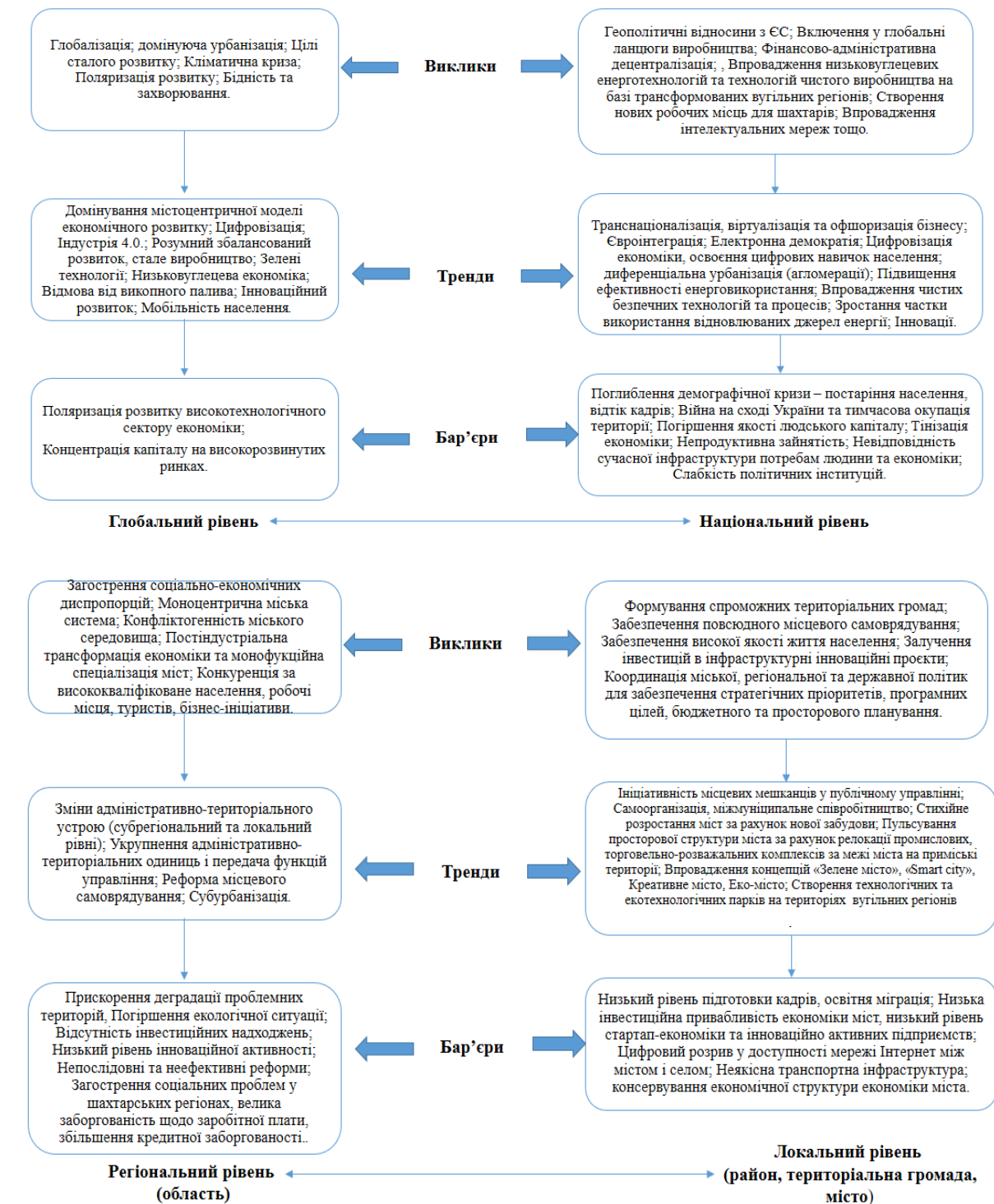


Рисунок 4 – Система трансформації структури економіки України в сучасних умовах

Отже, відповідно до глобальних та національних викликів маємо з однієї сторони деградацію вугільної промисловості, а з іншої – розвиток енергетики на відновлюваних джерелах. Ефективним рішенням є, наприклад, - сховища енергетичних ресурсів на базі шахт, оскільки саме акумуляція енергії є проблемою розвитку вітряної та сонячної енергетики. Конкурентноспроможна модель запропонованого рішення базується на трансформації шахти як державного підприємства у паркову систему шляхом залучення енергетичних компаній, котрі прагнуть володіти енергосховищами. При цьому матимемо синергетичний ефект, а саме зниження собівартості гірничих робіт та підвищення надійності енергопостачання [13].

Також свердловини, споруджені з метою дегазації вугільно-породного масиву можуть стати основою іншого енергетичного парку, що має у своєму складі теплову електростанцію та компанію з видобутку метану, який використовується як її паливо. Таким чином, комплекс дегазаційних свердловин шахт може бути модулем паркового комплексу. Це також вирішує іншу екологічну проблему, а саме уникнення заболочення та засолення ґрунтів мінералізованими шахтними водами, в разі їх масового закриття без належних інженерних робіт. Оскільки мінералізовані шахтні води призводять до пошкодження будівель, доріг, корозії підземних інженерних мереж та руйнування залізобетонних фундаментів. Концепція комплексного вуглевидобутку неможлива без утилізації шахтної води, що являє собою самостійний ресурс. Якщо зараз це відходить, то в подальшій перспективі переробка шахтних вод може стати напрямком диверсифікованості діяльності вугільних підприємств [13]. Розширення можливостей індустріального парку на базі шахти пов'язане з наявністю в ньому фірми із трансформаційного сектору, яка має інноваційну технологію очищення шахтних вод [13]. Таким чином, гірничопромисловий парковий комплекс забезпечує ефективність та оперативність управління, створює передумови для залучення інвесторів, зацікавлених у розвитку конкретного виду діяльності.

Надважливою складовою питання трансформації галузі і, зокрема, закриття шахт є вирішення соціальних та екологічних наслідків, що можуть виникнути в процесі реформування галузі (безробіття через закриття містоутворюючих підприємств, загроза навколишньому середовищу через консервацію/закриття шахт). Особливістю української вугільної галузі є те, що у своїй більшості вугільні підприємства – містоутворюючі, що посилює соціальний ефект. Усунення таких наслідків є найважливішою складовою трансформації галузі і потребує особливої уваги (рис. 5).



Рисунок 5 – Соціальна складова процесу закриття шахт.

Найбільша проблема стосується високих ризиків падіння рівня життя працівників державних підприємств вугільної галузі у випадку ліквідації/консервації шахт. Адже вразливою групою у випадку закриття всіх державних шахт залишається 32 тис. шахтарів. Формула «Справедлива трансформація» означає, що для фахівців вугільної промисловості потрібно створити можливість отримати альтернативні робочі місця після закриття чи реорганізації вугільних підприємств. Отже, для кожного регіону мають бути створені програми соціальної підтримки, професійного розвитку та перекваліфікації. Перспективними є реалізація інвестиційних проєктів з використанням інфраструктури шахти для іншого виду діяльності. Конкретні напрями залежать від плану економічного розвитку для конкретного регіону. На початку процесу реструктуризації в Україні не було жодної узгодженої Програми створення робочих місць. Діяльність зі створення робочих місць не розглядалася в регіональній перспективі. В той час служби зайнятості, профільні органи державної влади мали небагатий досвід у підтримці створення робочих місць за нових економічних умов. Місцеві та обласні органи влади і бізнес-спільноти не брали участі або брали

незначну участь у процесі планування і прийняття рішень [8].

Аналіз інструментів державної політики показує, що разом із проектом ліквідації/консервації гірничого підприємства повинен затверджуватися комплексний план заходів, а саме, – соціального захисту працівників, які вивільняються, розвитку соціальної інфраструктури та фінансування. Механізм соціальних гарантій та гарантій у сфері зайнятості передбачає основні підходи наведені в таблиці 1 [14].

Таблиця 1 – Аналіз політики соціальних гарантій.

Підхід		
Механізм створення робочих місць	Законодавча база	Причини недієздатності програми
1. Створення нових робочих місць за галузевим стандартом ліквідації, консервації гірничих підприємств та за підтримки міжнародних організацій		
Створення нових робочих місць на підприємствах інших галузей економіки у рамках бюджетів ліквідації шахт.	Галузевий стандарт діяв до 2002 року. «Проект ліквідації шахт. Еталон».	Нестабільне фінансування із держбюджету.
2. Створення нових робочих місць обласними державними адміністраціями (з 2002 року)		
Власник підприємства складає: проект ліквідації та комплексний план соціального захисту працівників, які вивільняються. Облдержадміністрація у процесі розробки та погодження проекту та плану визначає прогнозований обсяг працевлаштування вивільнених працівників.	Постанова Кабінету Міністрів України від 25 грудня 2002 р. № 1954 (1954–2002-п) про затвердження Порядку створення нових робочих місць для працевлаштування працівників, які вивільняються з вугледобувних, вуглепереробних та торфодобувних підприємств, що ліквідуються за рахунок коштів державного бюджету на реструктуризацію вугільної і торфодобувної промисловості.	Брак коштів державного бюджету через високу вартість нових робочих місць; неможливість створити нові робочі місця за 1 рік до ліквідації підприємства; блокування на етапі затвердження облдержадміністраціями.
3. Створення нових робочих місць за рахунок Фонду загальнообов'язкового державного страхування на випадок безробіття		
У Програмах визначалося: 1.перелік підприємств, установ, організацій, на яких створювались робочі місця; 2. кількість нових робочих місць із зазначенням професій (спеціальностей); 3. обсяг коштів Фонду, які спрямовуються на створення нових робочих місць; 4. чисельність працівників, яких передбачено працевлаштувати; графік перерахування коштів облдержадміністраціям.	Постанова Кабінету Міністрів України від 4 березня 2004 р. № 260 (260–2004-п) «Про затвердження Порядку спрямування коштів Фонду загальнообов'язкового державного соціального страхування на випадок безробіття	Ризики нецільового призначення перерахованих коштів
4. Проект TACIS «Підтримка вугільного сектору»		
Завданням проекту було надання підтримки Міністерству вугільної промисловості у сфері розроблення відповідних інструментів, заходів та політики для виконання соціальних зобов'язань, що впливають із процесу реструктуризації вугільного сектору (вересень 2008 р.-червень 2011 р.).	Розпорядження КМУ від 5 грудня 2012 р. №990-р «Про схвалення Концепції створення системи підтримки працівників вугільної галузі...»	Необхідність створення цілісної та дієвої системи соціальної підтримки; фінансування в повному обсязі; неможливість залучення недержавних інвестицій; адаптація до нових умов; перерозподіл трудових ресурсів тощо.

Як бачимо, минулий досвід реструктуризації вугільної промисловості України показує недієздатність державних програм і міжнародних проєктів та неефективність інструментів реструктуризації. Отже, для уникнення соціальної деградації вивільнених шахтарів необхідна ефективна розробка дієвих інструментів державної політики.

Успішна політика реструктуризації вугільної галузі, соціального захисту та зайнятості вивільнених шахтарів повинна враховувати наступні чинники:

1. Висококваліфіковані фахівці з досвідом роботи у сфері соціального планування, аудиту, працевлаштування та соціальної підтримки населення;
2. Системний підхід (глибокий аналіз регіонального ринку праці, підготовка методичного інструментарію для роботи з вивільненими шахтарями (анкети, методики, інструкції тощо);
3. Врахування соціальних потреб та інтересів шахтарів на ряду з інтересами держави і галузі та оптимізацією витрат бюджетних коштів;
4. Ефективна взаємодія, партнерство та координація стейкхолдерів.

Розглянемо міжнародний досвід застосування різних інструментів політики реструктуризації людського капіталу вугільної галузі. Різні країни демонструють свої підходи до вирішення проблеми масових звільнень шахтарів (табл. 3) [14].

Таблиця 2 – Міжнародний досвід застосування інструментів політики реструктуризації вугільної галузі

Бельгія	Франція	Німеччина
Прийняття короткострокових інтегрованих планів, як закриття шахт, так і створення альтернативної зайнятості. Введення програм перенавчання для забезпечення зайнятості тих, хто не зміг знайти іншу роботу і не підходить за віком для раннього виходу на пенсію.	Соціальні плани, які розпочинали процес закриття за 2 роки до його початку. Згідно з планом необхідно було знайти нову роботу для всіх звільнених з шахт, крім осіб пенсійного віку.	Працівники старшого віку були готові на прийнятних умовах піти на скорочення, щоб молоді шахтарі продовжували працювати. Запровадження податкових та інших пільг для депресивних регіонів.
Польща	Великобританія	Іспанія
Досвід масового залучення в сферу малого бізнесу шахтарів, звільнених у процесі реструктуризації вугільної галузі.	Довгострокові програми інвестування.	Для створення нових робочих місць була заснована компанія «SODECO». Фінансова підтримка тим, хто вирішив зайнятися своєю підприємницькою діяльністю.

Отже, головним завданням вугільних компаній розвинених країн при звільненні шахтарів було їх працевлаштування на створені завчасно робочі місця або переведення за їхньою згодою на підприємства інших галузей [14].

Програма реструктуризації повинна бути розроблена на основі ефективної моделі, яка органічно поєднує різноманітні інструменти регулювання як внутрішнього ринку праці підприємств вугільної галузі, так і зовнішнього ринку праці. Модель орієнтована, в першу чергу, на задоволення критерію ефективності, а саме мінімізації видатків реструктуризації та допустимої максимізації соціальних вигод шахтарів та їх сімей [8, 14].

Оцінку альтернатив вирішення проблеми соціального захисту та сприяння зайнятості вивільнених шахтарів наведено в табл. 3.

Таким чином, пропонується застосувати Альтернативу IV, яка передбачає розробку та впровадження програми реструктуризації людського капіталу, орієнтовану на забезпечення робочими місцями шахтарів, оскільки вона максимально відповідає всім зазначеним критеріям.

Інституційна основа «зовнішніх» інструментів реструктуризації (програми підтримки підприємництва, перекваліфікації та працевлаштування, створення робочих місць) передбачає мобільні групи та проєктні офіси реструктуризації або трансформації вугільних регіонів. Саме вони можуть забезпечити ефективну координацію програм підтримки вивільнених працівників на зовнішньому ринку праці, а також програм контролю ризиків.

Значна робота має приділятися програмам створення робочих місць, зокрема проєктуванню індустріальних, екоіндустріальних парків та реалізації інвестиційних проєктів на базі активів шахт, які закриваються. Окрім державних служб зайнятості, передбачається розширення можливостей у постачанні послуг сприяння зайнятості за рахунок недержавного сектору. На основі конкурсів передбачається

залучення недержавних провайдерів послуг – підприємств та громадських організацій. Очікується, що саме вони зможуть успішно реалізувати програми підтримки підприємництва.

Таблиця 3 – Оцінка альтернатив вирішення проблеми соціального захисту та сприяння зайнятості вивільнених шахтарів

Альтернативи					
Критерій бюджетних витрат	Критерій чистих вигід для цільової групи політики	Критерій ефективності програм реструктуризації та економіки державних вугледобувних підприємств.	Критерій політичної прийнятності та безконфліктності	Критерій корупційної чутливості	Підсумковий бал
<i>I. Орієнтація на збереження робочих місць у вугільній галузі за рахунок державної підтримки</i>					
4 Видатки на соціальний захист є невисокими за незначного скорочення персоналу. У 2015 році - 14,8 тис. грн. / 1 особу, всього – майже 4,3 млн. грн. на рік на 288 осіб. Але при цьому значні кошти витрачаються на дотації галузі та ліквідаційні роботи.	2 За чинної системи працівники шахт, які закриваються, часто вимушені звільнятися за власним бажанням і отримують незначні виплати у випадку звільнення. Політика сприяння зайнятості в шахтарських регіонах не дозволяє продовжити прибуткову економічну активність, що веде до поступової соціальної деградації шахтарських родин. Інтереси галузі переважають над соціальними інтересами працівників.	1 Значні витрати на дотації галузі, зокрема покриття зборгованості по зарплаті за мінімальних видатків на соціальний захист та сприяння зайнятості вивільнених шахтарів.	1 Постійна конфліктна ситуація, яка не задовольняє жодну із сторін стейкхолдерів. Тривала практика політичних спекуляцій.	1 Найвищі корупційні ризики у процесі ліквідації шахт та звільнення.	9
<i>II. Застосування пасивних інструментів соціального захисту та сприяння зайнятості, зокрема пріоритетне впровадження програм соціального захисту шахтарів разом із масовим закриттям шахт.</i>					
3 У випадку збереження рентабельних шахт та необхідності звільнення майже 9 тис. шахтарів видатки на соціальний захист орієнтовно становитимуть майже 560 млн. грн. (2016 р.).	2 Подібно до Альтернативи 1. Крім того, не враховуються інтереси працездатних осіб, які мають намір продовжити економічну активність і розраховують на належну підтримку з боку держави.	2 При значних видатках на соціальний захист ігноруються питання гарантій зайнятості та сталого доходу домогосподарств вивільнених шахтарів. Високий ризик тривалого безробіття та неформальної зайнятості.	3 Не задовольняє вимогам профспілок щодо гарантій зайнятості вивільнених шахтарів. Не відповідає інтересам уряду з огляду на високі бюджетні витрати.	3 Можливі корупційні ризики при визначенні розмірів допомоги та права на неї. Потребує уваги та контролю, власне, процедура призначення допомоги	13

Продовження таблиці 3

<i>III. Активізація програм сприяння зайнятості та створення робочих місць, зокрема перекваліфікації, професійного навчання</i>					
3 За найнижчими нормативними оцінками вартості створення робочого місця (майже 500 тис. грн.) видатки для 9 тис. осіб становитимуть 500 млн. грн.	4 Нові робочі місця із високою зарплатою гарантують високий рівень добробуту. Недоліком є тривалість часу їх створення. Не враховуються інтереси працівників, які прагнуть залишитися працювати у вугільній галузі.	3 Високі соціальні гарантії доходів за значних видатків на створення робочих місць	4 Не сприймається стейкхолдерами як належна гарантія соціального захисту. Проте потреба у стимулюванні зайнятості визнається всіма.	2 Високі корупційні ризики під час визначення інвесторів, розподілу видатків на створення робочих місць та програми сприяння зайнятості.	16
<i>IV. Змішана стратегія збереження робочих місць у вугільній галузі на рентабельних підприємствах (Альтернатива I) разом з обмеженими заходами стимулювання виходу на пенсію (Альтернатива II) і поетапним стимулюванням ринку праці та підприємницької активності вивільнених шахтарів на основі сучасних послуг сприяння зайнятості (Альтернатива III).</i>					
4 Видатки програми реструктуризації людського капіталу без врахування видатків контролю ризиків - майже 300 млн. грн. (2016 р.).	5 Враховано інтереси всіх категорій працівників, які можуть бути вивільнені із передбаченням належних соціальних гарантій та гарантій зайнятості.	5 Високі гарантії збереження робочих місць у вугільній галузі, створення нових мінімальних потреб перекваліфікації. Враховується чинник економічної стійкості підприємств. Усі показники ефективності програми кількісно визначені.	4 Враховує інтереси більшості стейкхолдерів, однак вимагає активного залучення міжнародної підтримки, що потребує узгодження інтересів з міжнародними організаціями та донорами.	4 Точні програмні показники та інституційна основа програми забезпечують належний контроль за можливими корупційним і ризиками. Проте ігнорувати корупційні ризики заходів створення робочих місць та внутрішньої реструктуризації не доцільно.	18

* Критерій/вага чи важливість критерію визначається максимальним балом оцінки альтернативи, де «1» – найменше значення критерію, «5» – найбільше.

Висновки

Враховуючи світовий тренд декарбонізації економіки для виконання цілей Сталого розвитку та амбітних цілей Паризької кліматичної угоди, а також Європейський Green Deal, Україні потрібні дієві кроки для забезпечення економічної, екологічної та соціальної безпеки трансформованих вугільних регіонів. Наразі деякі збиткові шахти України просто ліквідуються без виконання належної державної

підтримки (наприклад, забезпечення новими робочими місцями) як самих вивільнених шахтарів, так і мешканців тих територій, котрі залежать від вугільної промисловості, а також, без врахування подальших економічних та екологічних наслідків занедбаних регіонів. При цьому український уряд виплачує величезні дотації на реструктуризацію вугільної галузі, однак кошти спрямовуються на погашення заборгованості по заробітній платі працівникам і борги з кожним роком збільшуються.

Тому вкрай важливо розробляти якісні проектні пропозиції з трансформації вугільних регіонів, перенавчати, перекваліфіковувати молодих спеціалістів гірничодобувних підприємств для уникнення негативних соціальних та екологічних наслідків. Необхідними є реалізація проектів для сприятливого інвестиційного розвитку вугільних територій, враховуючи найкращі Світові практики, наприклад розробка моделей індустріальних та екоіндустріальних парків, переформатування гірничих підприємств на інші види економічної діяльності тощо.

Основними викликами є пошук та реалізація ефективних рішень справедливої або зеленої трансформації вугільних регіонів, використання їхнього потенціалу для створення привабливого для життя середовища, що підвищить екологічну та соціально-економічну безпеку таких територій після закриття об'єктів вугільної промисловості. Використання нових енергетичних технологій дозволить зменшити негативні наслідки ліквідації безперспективних вугільних шахт та інших підприємств, збільшити зайнятість населення місцевих громад, забезпечити позитивний вплив на промислову й екологічну безпеку, фінансування та соціально-економічний розвиток територій.

Список використаної літератури

1. Цілі сталого розвитку - Global Compact Network Ukraine. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://globalcompact.org.ua/pro-nas/tsili-stijkogo-rozvytku/>. – Назва з екрана.
2. Проект КМУ «Про схвалення Другого національно визначеного внеску України до Паризької угоди». [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/>. – Назва з екрана.
3. Дорожня карта кліматичних цілей України до 2030 року. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2020/02/dk-clim-ciley-full2.pdf>. – Назва з екрана.
4. Проект Аналітичного огляду Другого національно визначеного внеску України до Паризької угоди, квітень 2021. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://mepr.gov.ua>. – Назва з екрана.
5. Рамкові програми з досліджень та інновацій (горизонт 2020 та горизонт Європа) та ініціативи Європейської комісії (Європейський зелений курс). [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://mon.gov.ua/ua/nauka/yevrointegraciya/ramkovi-programi-z-doslidzen-ta-innovacij-gorizont-2020-ta-gorizont-yevropa-ta-iniciativi-yevropejskoyi-komisiyi-yevropejskij-zelenij-kurs>. – Назва з екрана.
6. Проект розпорядження Кабінету Міністрів України “Про схвалення Концепції трансформації вугільних регіонів України на період до 2030 року”. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.minregion.gov.ua>. – Назва з екрана.
7. Відкритий лист Платформи сталого розвитку вугільних міст Донецької області щодо процесу трансформації шахтарських регіонів. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ua.interfax.com.ua/news/press-release/760258.html>. – Назва з екрана.
8. Досвід трансформації шахтарських регіонів: Рекомендації для України. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ecoaction.org.ua/aftercoal-ua.html> – Назва з екрана.
9. Харитоновна Т.Є., Григор'єва Х. А. Енергетичний складник українського Green Deal: аналіз правових передумов. Юридичний науковий електронний журнал. URL: http://www.lsej.org.ua/2_2021/37.pdf.
10. ЗВІТ про результати аудиту ефективності використання коштів державного бюджету, передбачених Міністерству енергетики та вугільної промисловості України на державну підтримку вугледобувних підприємств на часткове покриття витрат із собівартості готової товарної вугільної продукції. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://rp.gov.ua/upload-files/Activity/Collegium/2019/32-2_2019/Zvit_32-2_2019.pdf. – Назва з екрана.
11. Нова енергетична стратегія Екраїни до 2035 року: «<езпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/docscatalog/document?id=245213112>. – Назва з екрана.
12. Структурна трансформація економіки міст Західного регіону України: передумови, чинники та особливості: наукова доповідь / НАН України. ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М. І. Долишнього НАН України»; наук. редактор М.І. Мельник. – Львів, 2020. – 163 с. (Серія «Проблеми регіонального розвитку»)
13. Розвиток публічно-приватного партнерства у процесі модернізації вугільної промисловості та теплової енергетики: монографія / О.І. Амоша, Д.Ю. Черватський, Ю.С. Залознава та ін.; за заг. ред. О.І. Амоші; НАН України, Ін-т економіки пром-сті. Київ, 2019. 160 с. <https://ie.org.ua/monographs->

2019/rozvitok-publichno-privatnogo-partnerstva-u-protsesi-modernizatsiyi-vugilnoyi-promislovosti-ta-teplovoyi-energetiki/

14.Якою має бути державна політика України щодо шахтарів за умов масового закриття вугледобувних підприємств? [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00XC8J.pdf. – Назва з екрана.

O. Vovk, Dr. Sc. (Eng.), Prof. ORCID 0000-0001-7531-9847

I. Rabosh, PhD, ORCID 0000-0001-6863-3945

R. Kharchenko, Msc, ORCID 0000-0003-1384-5144

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

E. Kukuyashnyy

Ministry of Energy of Ukraine

PROSPECTS AND CHALLENGES OF FAIR TRANSFORMATION OF COAL REGIONS OF UKRAINE

The paper analyzes the changes taking place in recent years in the coal industry of Ukraine and the world and examines measures for innovation in energy. The main goals, challenges and prospects of fair transformation of coal regions are revealed by analyzing the current state of the coal industry of Ukraine and world trends. The instruments of the state policy on providing the fired workers of the coal regions with jobs in case of liquidation / transformation of mines are defined and the alternatives of the policy of promoting the employment of the fired workers for making effective decisions are established. Peculiarities and factors of creation of technological or eco-technological parks on the basis of coal enterprises are studied. It is concluded that one of the effective solutions for the fair transformation of coal regions can be the transformation / transformation of the mine as a state enterprise into a park system by involving energy companies. The implementation of investment projects using the infrastructure of the mine for other activities is promising. Significant work should be done on job creation programs and training / retraining / retraining of workers, design of industrial parks and implementation of innovative projects.

Keywords: energy sector, innovations, transformation of coal regions, energy legislation, coal industry, social guarantees, eco-technological parks.

References

1. Tsili staloho rozvytku - Global Compact Network Ukraine. [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://globalcompact.org.ua/pro-nas/tsili-stijkogo-rozvytku/>. – Nazva z ekrana.
2. Proiekt KМУ «Pro skhvalennia Druhoho natsionalno vyznachenoho vnesku Ukrainy do Paryzkoi uhody». [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://mepr.gov.ua/>. – Nazva z ekrana.
3. Dorozhnia karta klimatychnykh tsilei Ukrainy do 2030 roku. [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2020/02/dk-clim-ciley-full2.pdf>. – Nazva z ekrana.
4. Proiekt Analitychnoho ohliadu Druhoho natsionalno vyznachenoho vnesku Ukrainy do Paryzkoi uhody, kviten 2021. [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://mepr.gov.ua/>. – Nazva z ekrana.
5. Ramkovi prohramy z doslidzhen ta innovatsii (horyzont 2020 ta horyzont Yevropa) ta initsiatyvy Yevropeiskoi komisii (Yevropeyskyi zelenyi kurs). [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://mon.gov.ua/ua/nauka/yevrointegraciya/ramkovi-programi-z-doslidzhen-ta-innovacij-gorizont-2020-ta-gorizont-yevropa-ta-iniciativi-yevropejskoyi-komisiyi-yevropejskij-zelenij-kurs>. – Nazva z ekrana.
6. Proiekt rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy “Pro skhvalennia Kontseptsii transformatsii vuhilnykh rehioniv Ukrainy na period do 2030 roku”. [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://www.minregion.gov.ua/>. – Nazva z ekrana.
7. Vidkryty lyst Platformy staloho rozvytku vuhilnykh mist Donetskoj oblasti shchodo protsesu transformatsii shakhtarskykh rehioniv. [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://ua.interfax.com.ua/news/press-release/760258.html>. – Nazva z ekrana.
8. Dosvid transformatsii shakhtarskykh rehioniv: Rekomendatsii dlia Ukrainy. [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://ecoaction.org.ua/aftercoal-ua.html>. – Nazva z ekrana.
9. Kharytonova T.Ie., Hryhorieva Kh. A. Enerhetychnyi skladnyk ukrainskoho Green Deal: analiz pravovykh peredumov. Yurydychnyi naukovyi elektronnyi zhurnal. URL: http://www.lsej.org.ua/2_2021/37.pdf.

10.ZVIT pro rezultaty audytu efektyvnosti vykorystannia koshtiv derzhavnoho biudzhetu, peredbachenykh Ministerstvu enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy na derzhavnu pidtrymku vuhledobuvnykh pidpriemstv na chastkove pokryttia vytrat iz sobivartosti hotovoi tovarnoi vuhilnoi produktsii. [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: https://rp.gov.ua/upload-files/Activity/Collegium/2019/32-2_2019/Zvit_32-2_2019.pdf. – Nazva z ekrana.

11.Nova enerhetychna stratehiia Ekrainy do 2035 roku: «<ezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist». [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245213112>. – Nazva z ekrana.

12.Strukturna transformatsiia ekonomiky mist Zakhidnoho rehionu Ukrainy: peredumovy, chynnyky ta osoblyvosti: naukova dopovid / NAN Ukrainy. DU «Instytut rehionalnykh doslidzhen imeni M. I. Dolishnoho NAN Ukrainy»; nauk. redaktor M.I. Melnyk. – Lviv, 2020. – 163 s. (Seriia «Problemy rehionalnoho rozvytku»)

13.Rozvytok publichno-privatnoho partnerstva u protsesi modernizatsii vuhilnoi promyslovosti ta teplovoi enerhetyky: monohrafiia / O.I. Amosha, D.Iu. Cherevatskyi, Yu.S. Zaloznova ta in.; za zah. red. O.I. Amoshi; NAN Ukrainy, In-t ekonomiky prom-sti. Kyiv, 2019. 160 s. <https://iee.org.ua/monographs-2019/rozvitok-publichno-privatnogo-partnerstva-u-protsesi-modernizatsiyi-vuhilnoyi-promyslovosti-ta-teplovoyi-energetiki/>

14.Iakoiu maie buty derzhavna polityka Ukrainy shchodo shakhtariv za umov masovoho zakryttia vuhledobuvnykh pidpriemstv? [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00XC8J.pdf. – Nazva z ekrana.

Надійшла 25.07.2021

Received 25.07.2021

ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ЕНЕРГЕТИКИ ECONOMIC ASPECTS OF ENERGY

УДК 620.9

DOI 10.20535/1813-5420.2.2021.247411

Г.Г. Панченко, канд. техн. наук, ст. наук. співр., доцент ORCID 0000-0002-7234-4078
Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління

ЕНЕРГОЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ СЕКТОРІВ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ

Робота присвячена методам розрахунку повної енергоємності палива, валюти, продукції, трудовитрат, сировини і матеріалів, необхідних для практичного застосування енергоекономічного аналізу ефективності виробництва. В статті запропоновано спрощену методіку і виконано розрахунки з оцінки повної енергоємності валюти і продукції семи секторів економіки України, в яких виробляється харчова, мінеральна, хімічна, металургійна та машинобудівна продукція, а також надаються послуги - транспортні та з комп'ютерного програмування. Розрахунки виконувались для трьох видів палива - ядерного палива, кам'яного вугілля і природного газу, які в 2017 р. становили понад 76 % всіх витрат палива в Україні. Основні складові повної енергоємності продукції секторів економіки обумовлені використанням палива для виробництва палива, електричної і теплової енергії, сировини, матеріалів і продукції, а також витратами палива для виробництва продукції, яку виробники продукції купують за одержану заробітну плату. В роботі визначено відносну енергоекономічну ефективність використання палива в секторах економіки України.

Ключові слова: енергоекономічний аналіз; повні витрати палива, повна енергоємність, повна енергоємність валюти.

Вступ

В [1] було зроблено висновок про необхідність вдосконалення методіки енергетичного аналізу, яке дозволить підвищити ефективність інвестиційних проєктів, зовнішньоекономічних зв'язків, планів економічного розвитку країни, функціонування економіки і окремих виробничих процесів, а також розширити сфери застосування енергетичного аналізу. Метою даної роботи є започаткування практичного використання показника повних енерговитрат на виробництво продукції або повної енергоємності продукції в економічних розрахунках з використанням підходу «аналізу процесу», який використовується в стандарті [2 і 3]. Крім того, на відміну від [2, 3] в роботі визначаються повні енерговитрати не тільки в показниках умовного палива, а й в натуральних одиницях вимірювання енерговитрат.

Для акцентування на тому, що енергетичний аналіз буде використано для аналізу економіки, в роботі використовується термін енергоекономічний аналіз, як він був визначений в [4]. Цей термін співпадає з терміном енергетичний аналіз, який визначено в [5] як «визначення кількості енергії, витраченої на виробництво певного матеріального блага або послуги, на основі прийнятих домовленостей».

При виконанні енергоекономічного аналізу секторів економіки такими домовленостями є наступні обмеження виробничої системи в часі і просторі:

- розрахунки повних енерговитрат виконуються в межах одного року;
- виробництво, зберігання і транспортування продукції, сировини і матеріалів здійснюються в межах сектору економіки, в якому виробляється продукція;
- межі виробничої системи співпадають з кордонами країни.

В роботі запропоновано вдосконалену методіку і виконано розрахунки з оцінки повної енергоємності валюти і продукції семи секторів економіки України, в яких в 2017 р. вироблялося понад 87 % від загального обсягу продукції в Україні. До цих секторів відносяться харчова, мінеральна, хімічна, металургійна та машинобудівна продукція, а також два сектори з надання послуг - транспортних та з комп'ютерного програмування (в подальшому - комп'ютерні послуги). Надходження валюти від експорту продукції цих секторів, а також від експорту кам'яного вугілля, залізної руди і коксу, які використовуються як сировина і матеріали при виробництві продукції в семи вищезазначених секторах, перевищують 89 % від загальної вартості експортованої продукції.

Зважаючи на те, що надання послуг можна вважати продукцією відповідних секторів, в подальшому замість терміну «енергоємність продукції і послуг» використовується термін «енергоємність продукції», як основного результату економічної діяльності на рівні секторів економіки.

Розрахунки виконувались з врахуванням витрат трьох основних видів палива – кам'яного вугілля, природного газу і ядерного палива, які становили понад 76 % від всіх витрат палива в Україні у 2017 р.

Повна енергоємність виробництва продукції

Згідно стандарту [2, 3], повна енергоємність продукції визначається відношенням повних енерговитрат на її виробництво до обсягів виробництва. При визначенні повної енергоємності виробництва продукції секторів економіки в даній роботі враховувались витрати палива на добування палива, виробництво електричної і теплової енергії, виробництво, зберігання і транспортування продукції, сировини і матеріалів, а також енергетичний еквівалент валюти, витраченої на імпорт палива. Зважаючи на високу зношеність основних виробничих фондів, а також на поки що відносно невеликі енерговитрати на охорону довкілля, ці дві складові повної енергоємності продукції не враховувались. Попередні оцінки дозволяють зробити припущення щодо їх незначної частки в загальній енергоємності продукції.

Для виконання детального енергетичного аналізу повну енергоємність продукції секторів економіки необхідно розраховувати для кожного виду палива окремо. Взаємна залежність повної енергоємності валюти і палива викликає необхідність виконання ітераційних розрахунків. При цьому формулу для розрахунку повної енергоємності продукції можна представити у вигляді

$$e_{isr} = e_{isr}^{\Pi} + e_{isr}^B + e_{isr}^C + e_{isr}^P + e_{isr}^M, \quad (1)$$

де i – індекс сектору економіки або виду продукції; s – індекс виду палива; r – порядковий номер ітерації; e_{isr} – повна енергоємність i -го виду продукції, визначена для s -го виду палива в r -ій ітерації, н.о. /тис. грн.; н.о. /тис. грн.; e_{isr}^{Π} – повна енергоємність продукції i -го сектору, обумовлена виробництвом s -го виду палива, використаного в i -му секторі економіки, визначена в r -ій ітерації розрахунків, н.о. /тис. грн.; e_{isr}^B – повна енергоємність продукції i -го сектору, обумовлена використанням s -го виду палива безпосередньо в i -му секторі економіки, визначена в r -ій ітерації розрахунків, н.о. /тис. грн.; e_{isr}^C – повна енергоємність продукції i -го сектору, обумовлена використанням s -го виду палива в енергетичній системі для виробництва електричної і теплової енергії, необхідної для виробництва продукції в i -му секторі економіки, визначена для s -го виду палива в r -ій ітерації, н.о. /тис. грн.; e_{isr}^P – повна енергоємність трудовитрат, обумовлених відтворенням робочої сили при виробництві i -го виду продукції, визначена для s -го виду палива в r -ій ітерації, н.о./тис.грн.; e_{isr}^M – повна енергоємність сировини і матеріалів, використаних при виробництві i -го виду продукції, визначена для s -го виду палива в r -ій ітерації, н.о. /тис. грн.

В Україні використовується понад п'ятдесят видів вуглецевого палива. Але обсяги їх використання коливаються в широких межах. Три види палива – ядерне паливо, кам'яне вугілля і природний газ – в 2017 р. становлять понад 76 % від всіх витрат палива в Україні. З метою спрощення розрахунків оцінка повної енергоємності валюти здійснювалася за даними тільки цих трьох видів палива. Серед неврахованих видів палива є багато таких, що одержані з первинних видів палива - кам'яного вугілля і природного газу, а також з відновлюваних джерел енергії. Як можна передбачити, повна енергоємність палив, вироблених з відновлюваних джерел енергії, буде значно нижчою, ніж повна енергоємність кам'яного вугілля, природного газу і ядерного палива. Тому повна енергоємність продукції секторів економіки України, визначена тільки за даними про використання кам'яного вугілля, природного газу і ядерного палива, буде дещо нижчою за фактичну величину, але менше, ніж на 24 %.

В подальшому використовуються наступні позначення для видів палива: $s = 1$ – для кам'яного вугілля, $s = 2$ – для природного газу і $s = 3$ – для ядерного палива.

Повна енергоємність продукції, обумовлена виробництвом палива

Повну енергоємність продукції, обумовлену виробництвом палива можна розрахувати за формулою

$$e_{isr}^{\Pi} = e_{is}^{\Pi Y} + e_{isr}^{\Pi}, \quad (2)$$

де $e_{is}^{\Pi Y}$ і e_{isr}^{Π} – складові повної енергоємності продукції, обумовлені використанням палива для виробництва s -го виду палива, яке використовується для виробництва продукції в i -му секторі економіки, відповідно, виробленого в Україні, та імпортованого палива, визначені в r -ій ітерації розрахунків, н.о. /тис. грн.

При визначенні величини $e_{is}^{\Pi Y}$ в ітераційних розрахунках немає необхідності, тому в її позначенні індекс r не використовується. Повну енергоємність продукції, обумовлену використанням видобутого в Україні палива при виробництві продукції в i -му секторі економіки, можна розрахувати за формулою

$$e_{is}^{PY} = \sum_q (1 - \lambda_s) e_{sq}^{PY} E_{is} / A_i, \quad (3)$$

де E_{is} – загальні обсяги використання палива s -го виду для виробництва продукції в i -му секторі економіки, н.о.; λ_s – частка імпортного палива в загальному обсязі використаного палива s -го виду, в.о.; e_{sq}^{PY} – повна енергоемність, розрахована за витратами q -го виду палива для виробництва s -го виду палива, н.о./н.о.; A_i – обсяги виробництва продукції в i -му секторі економіки, тис.грн.

Частку імпортного палива в загальному обсязі використаного палива можна розрахувати за формулою

$$\lambda_s = E_s^I / (E_s^Y + E_s^I), \quad (4)$$

де E_s^Y і E_s^I – загальні обсяги використання, відповідно, вітчизняного і імпортного палива s -го виду, н.о.

Повна енергоемність вітчизняного палива визначається як витрати всіх видів палива на виробництво кожного виду палива, що зумовлює необхідність використання додаткового індексу q для позначення виду палива, яке використовується для виробництва кожного виду палива. В Україні ядерне паливо не виробляється, тому енергоемність виробленого в Україні ядерного палива дорівнює нулю. На рис.1 показано схему потоків кам'яного вугілля і природного газу при виробництві і використанні вітчизняного палива для виробництва i -го виду продукції – загальні обсяги використання кам'яного вугілля ($E_{q=1}^Y$) і природного газу ($E_{q=2}^Y$), обсяги використання кам'яного вугілля і природного газу, відповідно, для виробництва вугілля ($E_{s=1,q=1}^Y$ і $E_{s=1,q=2}^Y$) і для виробництва природного газу ($E_{s=2,q=1}^Y$ і $E_{s=2,q=2}^Y$), а також обсяги використання кам'яного вугілля і природного газу для виробництва продукції, відповідно, $E_{i,s=2}^Y$ і $E_{i,s=1}^Y$.

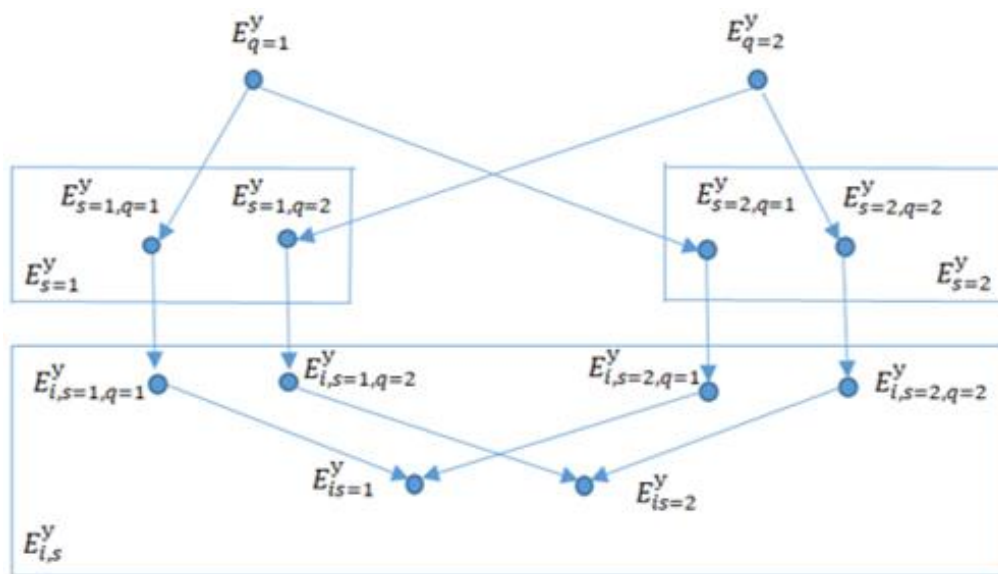


Рис.1. Схема потоків кам'яного вугілля і природного газу при виробництві палива

Оскільки в Україні ядерне паливо не виробляється, на рис.1 потоки ядерного палива не показані. При цьому повну енергоемність виробництва вітчизняного палива можна розрахувати за формулою

$$e_{sq}^{PY} = (1 - \lambda_s) E_{sq}^{PY} / E_s, \quad (5)$$

де q – індекс виду палива, яке використовується для виробництва s -го виду палива (значення індексу q становлять: $q = 1$ – для кам'яного вугілля і $q = 2$ – для природного газу); E_{sq}^{PY} – загальні обсяги використання q -го виду палива при виробництві s -го виду палива в Україні, н.о.; E_s – обсяги виробництва s -го виду палива в Україні, н.о.

Обсяги використання кам'яного вугілля і природного газу при виробництві палива можна розрахувати за формулою

$$E_{sq}^{PY} = E_{sq}^{PB} + E_{sq}^{PC} + E_{sq}^{PP}, \quad (6)$$

де $E_{sq}^{PB}, E_{sq}^{PC}, E_{sq}^{PP}$ – обсяги використання q -го виду палива, обумовлені виробництвом s -го виду палива, відповідно, безпосередньо при виробництві палива, використанням s -го виду палива в енергетичній системі (для виробництва електричної і теплової енергії, які використовуються для виробництва палива), і відтворенням робочої сили при виробництві палива, н.о.

Повну енергоємність використання імпортованого палива на виробництво продукції можна розрахувати за формулою

$$e_{isr}^{PI} = \sum_q \lambda_s e_{sqr} E_{is} / A_i, \quad (7)$$

де e_{sqr} – повна енергоємність s -го виду палива, обумовлена витратами валюти на закупівлю q -го виду імпортного палива, визначена в g -ій ітерації, н.о./тис. дол. США; E_{is} – обсяги використання s -го виду палива в i -му секторі економіки, н.о.

Величину e_{sqr} можна розрахувати за формулою

$$e_{sqr} = \lambda_s e_{sr-1}^V c_s^I E_{sq} / E_s \quad (8)$$

де e_{sr-1}^V – складова повної енергоємності валюти, обумовлена витратами валюти на закупівлю s -го виду імпортного палива, н.о./тис.дол.США; c_s^I – ціна імпортованого палива s -го виду, тис. дол. США/н.о.; E_{sq} – обсяги використання q -го виду палива для виробництва s -го виду палива, н.о.

Методику визначення повної енергоємності валюти буде розглянуто нижче. Обсяги використання ядерного палива в Україні вимірюються в тоннах умовного палива. Тому в якості натуральних одиниць вимірювання обсягів ядерного палива також використовуються тонни умовного палива.

Повна енергоємність продукції, обумовлена використанням палива при виробництві продукції безпосередньо у виробничому секторі, в енергосистемі і для відтворення робочої сили

Складові повної енергоємності продукції, обумовлені використанням палива при виробництві продукції безпосередньо у виробничому секторі, в енергосистемі і для відтворення робочої сили, розраховуються за схожими формулами. Тому в формулах для їх визначення верхні індекси не використовуються. Величини $e_{isr}^B, e_{isr}^C, e_{isr}^P$ можна розрахувати за формулою

$$e_{isr} = e_{is}^Y + e_{isr}^I, \quad (9)$$

де e_{is}^Y і e_{isr}^I – складові повної енергоємності продукції, обумовлені використанням палива для виробництва продукції в i -му секторі економіки, виробленої з використанням s -го виду палива, відповідно, видобутого в Україні, та імпортованого палива, визначені в g -ій ітерації розрахунків, н.о. /тис. грн.

Складові повної енергоємності продукції e_{is}^Y можна розрахувати за формулою

$$e_{is}^Y = (1 - \lambda_s) E_{is} / A_i, \quad (10)$$

де E_{is} – обсяги використання s -го виду палива при виробництві продукції в i -му секторі економіки, н.о.

Методику визначення обсягів використання палива $E_{is}^B, E_{is}^C, E_{is}^P$ для розрахунку величини $e_{isr}^B, e_{isr}^C, e_{isr}^P$ по формулі (10) розглянуті нижче.

Складову повної енергоємності продукції e_{isr}^I можна розрахувати за формулою

$$e_{isr}^I = \lambda_s e_{sr-1}^V c_s^I E_{is} / A_i, \quad (11)$$

Обсяги спалювання палива

Для розрахунку трьох складових повної енергоємності продукції секторів економіки, обумовлених спалюванням палива, використовуються дані щодо відповідних обсягів спалювання палива – безпосередньо в секторі економіки, в енергоустановках енергетичної системи і в котельнях і обсяги спалювання палива, обумовлені відтворенням робочої сили.

Обсяги спалювання палива безпосередньо в секторі економіки E_{is}^B визначаються за даними форми статистичної звітності 4-МТП, як загальні обсяги використаного палива s -го виду в i -му секторі економіки.

Витрати палива в енергосистемі і в котельнях для виробництві електричної і теплової енергії, необхідної для виробництва продукції E_{is}^C , можна розрахувати за формулою

$$E_{is}^C = [\mu_s^W \xi_s^W b_s^W (W_i^C - W_i^B) / \eta^W + \mu_s^Q \xi_s^Q b_s^Q (Q_i^C - Q_i^B) / \eta^Q] // 10^3 k_s, \quad (12)$$

де η^W і η^Q - коефіцієнти корисної дії при використанні, відповідно, електричної і теплової енергії в енергосистемі України, в.о.; μ_s^W і μ_s^Q - частка виробництва, відповідно, електричної і теплової енергії за рахунок спалювання ядерного або вуглецевого палива в енергосистемі України, в.о.; ξ_s^W і ξ_s^Q - коефіцієнти використання s-го виду палива в установках з виробництва, відповідно, електричної і теплової енергії в енергосистемі України, в.о.; b_s^W і b_s^Q - середньозважені питомі витрати палива в установках з виробництва електричної і теплової енергії в енергосистемі України, кг у.п./тис.кВт.год/ і кг у.п./Гкал; W_i^C і Q_i^C - обсяги використання, відповідно, електричної і теплової енергії при виробництві продукції в i-му секторі, тис.кВт.год. і Гкал; W_i^B і Q_i^B - власне виробництво, відповідно, електричної і теплової енергії в i-му секторі економіки, Гкал і тис.кВт.год.; k_s - коефіцієнт перерахунку обсягів виробництва палива в одиниці умовного палива, т у.п./н.о.

Коефіцієнти корисної дії при використанні теплової і електричної енергії в енергосистемі України визначаються за даними форми статистичної звітності 11-МТП та Енергетичного балансу України. В табл. 1 наведено результати розрахунків цих коефіцієнтів за даними 2017 р.

Таблиця 1. – Коефіцієнти корисної дії при використанні теплової і електричної енергії в енергосистемі України (за даними 2017 р.).

Назва показника	Величина показника	
	для електричної енергії	для теплової енергії
Загальне виробництво енергії в Україні, всього, тис.кВт.год. і Гкал	145059574	93292785
Загальне використання енергії в Україні, всього, тис.кВт.год. і Гкал	96773763	58927609
Експорт, тис.кВт.год. і Гкал	5166300	0
Імпорт, тис.кВт.год. і Гкал	48000	0
Виробництво енергії в Україні, яка використовується в Україні, всього, тис.кВт.год. і Гкал	139893274	93292785
Коефіцієнти корисної дії при використанні теплової і електричної енергії в енергосистемі України, в.о.	0,6914254	0,631641654

Середньозважені питомі витрати ядерного палива на виробництво теплової енергії, розраховані за даними [6], наведено в табл. 2. Середньозважені питомі витрати кам'яного вугілля і природного газу на виробництво електричної енергії, наведені в табл. 2, визначались за даними [7] за припущення, що весь природний газ для виробництва електричної і теплової енергії в Україні використовується виключно на ТЕЦ. При цьому середньозважені питомі витрати ядерного палива на виробництво електричної енергії визначались за умови енергетичного балансу з врахуванням обсягу використання ядерного палива (визначеного з Енергетичного балансу України) і питомих витрат ядерного палива на виробництво теплової енергії. А середньозважені питомі витрати кам'яного вугілля і природного газу на виробництво теплової енергії визначались за умови енергетичного балансу з врахуванням обсягу використання ядерного палива (визначеного за даними форми статистичної звітності 4-МТП) і питомих витрат ядерного палива на виробництво електричної енергії.

Частка виробництва електричної і теплової енергії за рахунок спалювання ядерного і вуглецевого палива в енергосистемі України визначається за даними форми статистичної звітності 11-МТП.

Для виробництва електричної і теплової енергії на атомних станціях використовується виключно ядерне паливо. Тому коефіцієнти використання ядерного палива для виробництва електричної і теплової енергії в Україні приймаються рівними одиниці. Коефіцієнти використання кам'яного вугілля і природного газу для виробництва електричної і теплової енергії в енергосистемі України можна розрахувати за даними форми статистичної звітності 4-МТП за формулами

$$\xi_s^W = E_s^W / \sum_s E_s^W ; \quad \xi_s^Q = E_s^Q / \sum_s E_s^Q, \quad (13)$$

де E_s^W і E_s^Q – витрати s-го виду вуглецевого палива в Україні на виробництво, відповідно, електричної і теплової енергії в енергосистемі України, т.у.п.

Витрати вуглецевого палива на виробництво електричної і теплової енергії в енергосистемі України визначаються за даними форми 4-МТП, а витрати ядерного палива – з енергетичного балансу України. В табл. 2 наведено дані щодо частки виробництва електричної і теплової енергії за рахунок спалювання вуглецевого і ядерного палива, коефіцієнтів використання палива і середньозважених питомих витрат палива в установках з виробництва електричної і теплової енергії в енергосистемі України в 2017 р.

Таблиця 2. – Показники виробництва теплової і електричної енергії в електростанціях і котельнях енергосистеми України (за даними 2017 р.).

Назва величини	Вид палива	Значення величин при виробництві	
		електричної енергії	теплової енергії
Частка виробництва електричної і теплової енергії за рахунок спалювання палива на енергоустановках енергосистеми і в котельнях, в.о.	Ядерне паливо	0,5535	0,01628
	Вуглецеве паливо	0,35645	0,9262
Частка виробництва електричної і теплової енергії за рахунок спалювання палива на АЕС, в.о.	Ядерне паливо	1	1
	Вуглецеве паливо	0	0
Коефіцієнти використання палива, в.о.	Ядерне паливо	1	1
	Кам'яне вугілля	0,8053	0,0941
	Природний газ	0,0338	0,8790
Середньозважені питомі витрати палива, кг.п./тис.кВт.год., кг у.п./Гкал	Ядерне паливо	396,9	158,0
	Кам'яне вугілля	390,3	155,0
	Природний газ	335,5	155,0

Витрати палива, обумовлені відтворенням робочої сили, можна визначити з використанням результатів [8], за формулою

$$E_{is}^P = E_s^B V^P F_i / V^T F, \quad (14)$$

де E_s^B - обсяг використаного палива s-го виду в Україні, н.о.; V^T і V^P - відповідно, загальна вартість вироблених товарів та послуг і кінцеві споживчі витрати в Україні, млн.грн.; F і F_i - фонд оплати праці найманих працівників, відповідно, в Україні і в i-му секторі, млн.грн.

У 2017 р. загальна вартість вироблених товарів та послуг, кінцеві споживчі витрати та оплата праці найманих працівників склали, відповідно, $V^T = 8381846$, $V^P = 2618126$ і $F = 753735,6$ млн.грн. У цьому ж році було використано 42664 тис.т кам'яного вугілля, 33577,9 млн м3 природного газу і 32107,4 тис. т у.п ядерного палива.

Витрати палива на виробництво сировини і матеріалів

Повну енергоємність продукції, обумовлену використанням сировини в матеріалів, можна визначити за формулою

$$e_{ijsr}^M = e_{ijsr}^{MY} + e_{ijsr}^{MI}, \quad (15)$$

де e_{ijsr}^{MY} і e_{ijsr}^{MI} - складові повної енергоємності продукції, обумовлені використанням j-го виду сировини в матеріалів при виробництві продукції в i-му секторі економіки, виробленої з використанням s-го виду палива, відповідно, видобутого в Україні, та імпортованого палива, визначені в g-ій ітерації розрахунків, н.о. /тис. грн.

Складову повної енергоємності продукції e_{ijsr}^{MY} можна розрахувати за формулою

$$e_{ijsr}^{MY} = (1 - \lambda_s) E_{ijs}^M / A_i, \quad (16)$$

де E_{ijs}^M – обсяги спалювання палива s -го виду для виробництва j -го виду сировини в матеріалів, які використовуються при виробництві продукції в i -му секторі економіки, н.о.

Витрати палива на виробництво сировини і матеріалів можна розрахувати за формулою

$$E_{ijs}^M = \sum_j e_{ijsr-1} A_{ij}, \quad (17)$$

де j - індекс виду продукції, яка використовується в якості сировини і матеріалів при виробництві i -го виду продукції; e_{ijsr-1} - повна енергоємність j -го виду продукції, яка використовується в якості сировини і матеріалів при виробництві i -го виду продукції, визначена для s -го виду палива в попередній ($r-1$ -ій) ітерації, н.о./т; A_{ij} - обсяги використання j -го виду продукції в якості сировини і матеріалів при виробництві i -го виду продукції, т.

Складову повної енергоємності продукції e_{ijsr}^{MI} можна розрахувати за формулою

$$e_{ijsr}^{MI} = \lambda_s e_{qr-1}^V c_s^I E_{ijs}^M / A_i. \quad (18)$$

В якості сировини і матеріалів в роботі враховувалась повна енергоємність продукції металургійного сектору економіки (при визначенні повної енергоємності продукції машинобудування), залізної руди і коксу (при визначенні повної енергоємності продукції металургії), а також кам'яного вугілля (при визначенні повної енергоємності коксу).

При виконанні розрахунків в даній роботі зроблено припущення, що імпортна продукція, яка входить до статистичної інформації, стосується тільки готової продукції даного сектору. Тобто, вся сировина і матеріали виробляються в межах економіки країни і складова повної енергоємності сировини і матеріалів імпортного походження не враховувалась.

Повна енергоємність валюти

В [9] запропоновано визначати повну енергоємності валюти за відношенням повних витрат палива на виробництво експортної продукції до величини загальних надходжень валюти в країну експортера. При цьому повну енергоємність валюти можна розрахувати за формулою

$$e_{sr}^V = E_{sr}^V / V, \quad (19)$$

де E_{sr}^V - повні витрати s -го виду палива на виробництво експортної продукції, визначені в g -ій ітерації, н.о.; V – загальні надходження валюти в Україну (не тільки від експорту продукції) в розрахунковому році, млн дол. США.

Величину E_{sr}^V можна розрахувати за формулою

$$E_{sr}^V = e_{sr-1} E_{sr}^E + \sum_j e_{jsr-1} A_j^E + \sum_i e_{isr-1} V_i^E R, \quad (20)$$

де E_{sr}^E - обсяги експорту s -го виду палива, визначені в g -ій ітерації, н.о.; A_j^E - обсяги експорту j -го виду сировини і матеріалів, т; V_i^E - надходження валюти від експорту i -го виду продукції в розрахунковому році, тис.дол. США; R – середньозважений курс гривні до долара США в розрахунковому році, грн./дол.США.

Величини e_{sr-1} і e_{jsr-1} розраховуються, відповідно, за формулами (5) і (9), за даними попередньої ітерації. Загальні надходження валюти в Україну в 2017 р. склали 68806721,7 тис. дол. США [10], а частка експорту продукції і послуг секторів економіки, для яких виконувались дослідження, а також експорту вугілля, металеві руди і коксу, за даними [11] (табл. 4), складала 89,3 % від загального експорту в Україні.

Результати розрахунків

В результаті ітераційних розрахунків було визначено величини повної енергоємності продукції і повних витрат палива на виробництво продукції в секторах економіки України. Розрахунки виконувались за статистичними даними 2017 р. і були закінчені після третьої ітерації, коли різниця між даними останньої і попередньої ітерації для повної енергоємності продукції і валюти не перевищувала 0,06%. При цьому розрахована величина повної енергоємності валюти становила 203,865 кг вугілля/тис. дол. США і

65,462 м³/ тис. дол. США або 228,82 кг у.п./тис. дол. США. В табл. 3 наведено результати розрахунків повної енергоемності палива і продукції в Україні за даними 2017 р. Як уже було сказано, в Україні ядерне паливо не виробляється, а тільки використовується. Тому в повній енергоемності продукції, яка виробляється в Україні, присутні тільки складові, обумовлені використанням кам'яного вугілля і природного газу.

З аналізу табл.3 можна зробити висновок, що складова повних енерговитрат, обумовлена імпортом палива, становить біля 3,8 % для вугілля і біля 1,06 % для природного газу.

Таблиця 3. – Результати розрахунків повної енергоемності палива і продукції в Україні (за даними 2017 р.).

Повна енергоемність	Складові повної енергоемності		В тому числі, обумовлені використанням			
			вітчизняного палива		імпортного палива	
	кам'яного вугілля	природного газу	кам'яного вугілля	природного газу	кам'яного вугілля	природного газу
кам'яного вугілля, кг/т, м ³ /т	10,1226	2,0114	9,8813	1,9900	0,2415	0,0214
природного газу, кг/м ³ , м ³ /тис.м ³	0,7270	13,3412	0,7097	13,1992	0,0173	0,1420
використання ядерного палива, кг/т у.п., м ³ / т у.п.	0,5447	0,4611	0,5317	0,4562	0,0130	0,0049
добування залізних руд, кг/тис.грн., м ³ /т	5,8565	1,5393	5,7167	1,5230	0,1397	0,0164
виробництва коксу, кг/тис.грн., м ³ /т	752,0073	7,3117	734,0904	7,2361	17,9168	0,0757
харчової продукції, кг/тис.грн., м ³ /тис.грн.	1,3817	1,3511	1,3488	1,3367	0,0329	0,0143
мінеральної продукції, кг/тис.грн., м ³ /тис.грн.	7,1402	2,8353	6,9700	2,8052	0,1702	0,0301
хімічної продукції, кг/тис.грн., м ³ /тис.грн.	18,2477	12,3661	17,8124	12,2348	0,4353	0,1313
металургійної продукція, кг/тис.грн., м ³ /тис.грн.	39,8303	5,5573	38,8811	5,4984	0,9492	0,0589
продукції машинобудування, кг/тис.грн., м ³ /тис.грн.	5,8250	3,4901	5,6861	3,4531	0,1389	0,0371
транспортних послуг, кг/тис.грн., м ³ /тис.грн.	1,0137	6,9615	0,9895	6,8877	0,0241	0,0738
комп'ютерних послуг, кг/тис.грн., м ³ /тис.грн.	0,7840	0,6349	0,7653	0,6281	0,0187	0,0067

Швидке (за три кроки) «сходження» ітераційних розрахунків обумовлене низькими значеннями енергоємності валюти. Це пояснюється тим, що вартість експортної продукції визначається не тільки витратами палива, а й вартістю сировини і матеріалів, заробітної плати на її виробництво, економічною кон'юнктурою, податками тощо. Тому експорт продукції є позитивним чинником, який значно зменшує повну енергоємність продукції. При цьому складова повної енергоємності, обумовлена використанням імпортного палива (за даними табл.3) в повній енергоємності кам'яного вугілля становить 0,206 кг у.п/т (або 2,07 % від повної енергоємності вугілля), а природного газу – 0,178 кг у.п/тис.м³ (або 1,11 % від повної енергоємності природного газу).

З іншого боку, не можна вважати, що порівняно невелика величина повної енергоємності валюти обумовлена врахуванням (при її визначенні) не тільки валютних надходжень не тільки від експорту продукції, але й надходженнями з інших джерел - кредитних запозичень, інвестицій, грошових переказів від українців, що працюють за кордоном, і надходжень з офшорів. Перелічені складові в 2017 р. забезпечили не більше 20 % від загальних валютних надходжень в Україну [9]. Це дозволяє зробити висновок про високу енергоекономічну ефективність використання імпортного палива (звичайно, за умов наявності потужного експортного потенціалу країни-експортера).

На рис.2 і 3 наведено діаграми величин і структури повної енергоємності продукції секторів економіки України, побудовані за даними табл.3. Для порівняння значення повної енергоємності на рис.2 надано не в натуральних одиницях вимірювання кам'яного вугілля і природного газу а в умовних (кг у.п./тис.грн.). Оскільки паливна складова повної енергоємності продукції секторів економіки (e_{isr}^P) непорівняно менша за інші складові, на рис.3 вона не відображена. Також для скорочення назв складових повної енергоємності продукції на рис.3 ці складові названо наступним чином: e_{isr}^B – Технологія, e_{isr}^C – Енергосистема, e_{isr}^P – Трудовитрати і e_{isr}^M – Матеріали.

Таблиця 4. - Коефіцієнти перерахунку натуральних одиниць вимірювання кількості палива в одиниці умовного палива, частки імпортного палива в загальному обсязі використаного палива в Україні і ціна імпортного палива в 2017 р.

Назва величини	Значення величин для видів палива		
	Кам'яне вугілля, т	Природний газ, тис.м ³	Ядерне паливо, т у.п.
Коефіцієнти перерахунку, т у.п.	0,75	1,16	1
Частка імпортного палива, в.о.	0,46357	0,4152	1
Ціна імпортного палива, тис.дол.США	0,1387	0,2315	0,0214

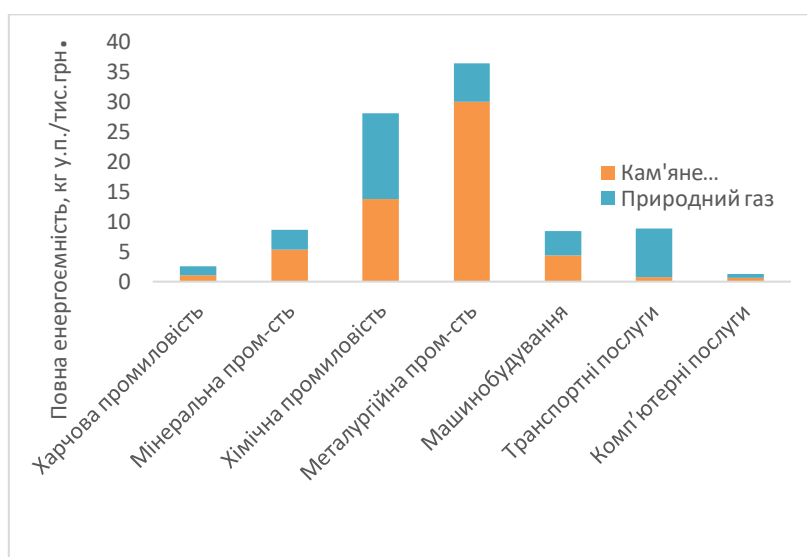


Рис.2 Енергоємність продукції основних секторів економіки України в 2017 р.

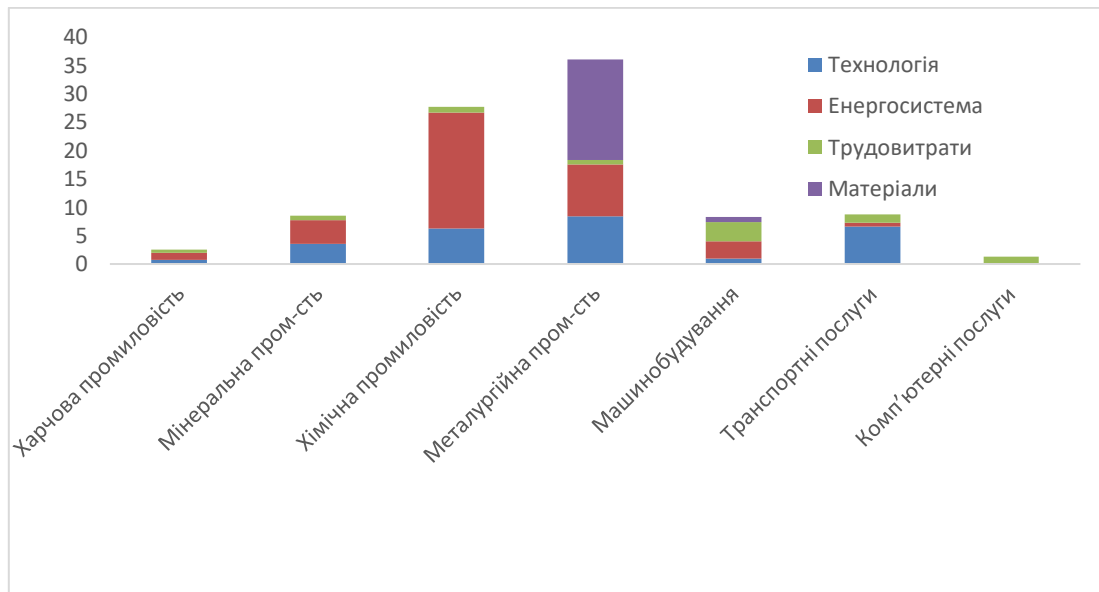


Рис.3. Структура повної енергоємності продукції основних секторів економіки України, кг.у.п./тис.грн

Аналіз діаграми на рис.2 дозволяє зробити висновок, що найвищу повну енергоємність в Україні має металургійна продукція (понад 36 кг у.п./тис.грн.), а найнижчу – комп'ютерні послуги (1,32 кг у.п./тис.грн.). З аналізу діаграми на рис.3 можна зробити висновок, що витрати палива в енергосистемі і в котельнях мають найбільшу частку в повній енергоємності хімічної продукції (понад 73 % від загальних повної енергоємності), витрати палива, обумовлені відтворенням робочої сили, найбільші в секторі надання комп'ютерних послуг (понад 93 %), а витрати палива, обумовлені виробництвом сировини і матеріалів, найбільші в металургійному секторі (майже 49 %).

В табл.5 наведено дані щодо обсягів виробництва продукції в секторах економіки України в 2017р. [12], а також повних (E_{is}^H) витрат палива на її виробництво і витрат палива, які визначаються за даними про нижчу теплоту згоряння палива (E_{is}^H), розрахованих за формулами

$$E_{is}^H = e_{is} A_i ; \quad (21)$$

$$E_{is}^H = E_{is}^H + E_{is}^B + E_{is}^C + E_{is}^P + \sum_j E_{ijs}^M. \quad (22)$$

За результатами розрахунків, наведених в табл.5, можна зробити висновок, що витрати палива E_{is}^H на виробництво продукції в секторах економіки України значно перевищують повні витрати палива. Так, сумарні витрати палива, розраховані за даними про нижчу теплоту згоряння палива, перевищують повні витрати в 14 разів, в тому числі, в 6,8 разів - по кам'яному вугіллю і в 290,7 разів – по природному газу. Така різниця обумовлена двома факторами. По-перше, в енергоекономічному аналізі повна енергоємність палива розраховується як відношення витрат палива на виробництво палива до обсягів виробництва палива, а не за даними про питому теплоту згоряння палива. Тобто, можна вважати, що в енергоекономічному аналізі розглядається витратна, а не дохідна частина енергетичного балансу. Для порівняння, повна енергоємність виробництва кам'яного вугілля становить 9,92 кг у.п./т, а природного газу – 16,02 кг у.п./тис.м³ (за даними табл.3), в той час як питома теплота згоряння вугілля в 2017 р. становила 750 кг у.п./т, а природного газу – 1160 кг у.п./тис.м³ (табл.4).

Іншим фактором, який обумовлює велику різницю між повними витратами палива і величинами E_{is}^H , є врахування витрат імпортного палива як витрат палива на виробництво продукції, валютні надходження від експорту якої використовуються для закупівлі імпортного палива.

Останній висновок підтверджується даними табл.6, в якій наведено дані щодо вартості експортованої продукції [11], повних витрат палива, використаного при її виробництві V_{is}^E , і загальної вартості імпортованого палива V_{is}^I , розрахованих за формулами

$$V_{is}^E = e_{is} c_s^I A_i^E; \quad (23)$$

$$V_{is}^I = \lambda_s c_s^I E_{is}^H A_i^E / A_i. \quad (24)$$

Таблиця 5. - Повні витрати палива на виробництво продукції в Україні (за даними 2017 р.).

Вид продукції і одиниці виміру	Обсяги виробництва продукції	Повні витрати палива			Номінальні витрати палива			
		Всього, т у.п.	в т.ч. вугілля, т	газу, тис.м ³	Всього, т у.п.	в т.ч. вугілля, т	газу, тис.м ³	ядерного палива, т у.п.
Кам'яне вугілля, тис.т	42664,0	6372,8	8035,0	298,8	1211687,2	232046,7	1509587	1211687,2
Залізна руда, тис.т	166000,0	8449,2	10257,2	652,0	2700407,7	676346,2	5109143	2700407,7
Кокс, тис.т	10316,2	7742870	10323213	397,1	21435590	156145,6	630763,2	21435590
Харчова, млн грн.	548377,9	3349,0	1885,2	1668,2	2104012	1967755,9	2994470	2104012
Мінеральна, млн грн.	134146,9	11318,8	12320,2	1792,0	2660469,6	1008326,9	2074164	2660469,6
Хімічна, млн грн.	65767,6	49006,4	39441,4	16746,0	3332921,6	2158836,6	6183359	3332921,6
Металургійна млн грн.	411372,3	400287	504714,5	18751,6	37705373	5864244,2	16879980	37705373
Машинобудування, млн грн.	168281,9	10237,4	8751,2	3167,3	2600405,3	1529564,4	3465431	2600405,3
Транспорт, млн грн.	201940,8	19230,9	372,1	16337,8	566906,7	3737776,5	693285,0	566906,7
Комп'ютерні послуги, млн грн.	38989,6	62,7	43,2	26,2	84891,2	65727,9	87279,5	84891,2
Всього		8251185	10909033	59836,8	74402665	17396771,0	39627464	74402665

Таблиця 6. - Вартість повних витрат палива, використаного при виробництві продукції, і імпортованого палива, тис. дол.США (за даними 2017 р.).

Вид продукції	Вартість експортної продукції A_i^E	Вартість повних витрат палива на виробництво експортованої продукції			Загальна вартість імпортованого палива				Відношення	
		всього V_i^E	в т.ч. кам'яного вугілля	природного газу	всього V_i^I	в т.ч. кам'яного вугілля	природного газу	ядерного палива	$\frac{A_i^I}{(V_i^E + V_i^I)}$	$\frac{A_i^E}{V_i^I}$
Кам'яне вугілля	635759	1204,7	901,8	302,9	1975,2	1161,2	332,4	481,6	199	321
Залізна руда	2588193	3025,2	2102,8	922,4	5426,9	2707,7	1013	1705	306	476
Кокс	46605,9	4941,1	4862,3	78,9	6356,8	6228,0	67,8	61	4,1	7
Харчова	17756854	239627	91050,9	148576	12582,6	4381,5	6125	2075	70,4	1411
Мінеральна	3947721,8	173924	104605	69319,2	9194,5	5035,2	2852	1306	21,6	429,4
Хімічна	1660611,8	239632	112454	127177	13994,8	5412,2	5240	3342	6,5	118,7
Металургійна	10124613	1845007	1496548	348459	82449,8	59681,0	13874	8894	5,3	122,8
Машинобудування	5054284,7	218504	109257	109247	11667,4	5022,9	4416	2228	22,0	433,2
Транспорт	5421324,4	254126	20394	233732	11023,6	978,8	9646	398	20,4	491,8
Комп'ютерні послуги	1270720,9	8693	3697	4996	444,8	177,9	205,9	60,9	139	2857
Всього	48506690	2988687	1945874	1042813	155116	90786,4	43775	20554	15,4	312,7

В формулах (23) і (24) значення величин A_i , c_i^I і A_i^E пояснюються в специфікаціях до формул, відповідно, (3), (8) і (20), а величини e_{iS} , λ_S і E_{iS}^H розраховуються, відповідно, за формулами (1), (4) і (22).

В табл.6 наведено також відношення обсягів надходження валюти від експорту продукції до вартості використаного при її виробництві палива (розрахованої при значеннях вартості палива, наведених в табл.4) – вітчизняного і імпортованого. Ці відношення характеризують відносну енергоекономічну ефективність використання палива в секторах економіки. З аналізу даних табл.6 можна зробити наступні висновки:

- найбільші надходження валюти від експорту продукції забезпечують виробництво харчової і металургійної продукції – 36,6 % і 20,9 % від загальної вартості експортованої продукції в 2017 р.;
- найбільш ефективним, з точки зору використання палива, є виробництво залізної руди, кам'яного вугілля і надання комп'ютерних послуг (відношення обсягів надходження валюти до загальної вартості використаного палива – 139,1);
- найменшу залежність від імпорту палива мають надання комп'ютерних послуг і виробництво харчових продуктів.

Висновки

1. Найбільші витрати палива в Україні становлять витрати ядерного палива, кам'яного вугілля і природного газу (понад 76 % всіх витрат палива в 2017 р.). З метою спрощення розрахунків оцінку повної енергоемності валюти можна здійснювати за даними тільки цих трьох видів палива.

2. В Україні ядерне паливо не виробляється. Тому при визначенні повної енергоемності валюти можна оцінювати тільки витрати кам'яного вугілля і природного газу. При цьому величина повної енергоемності валюти в Україні в 2017 р. становила 203, 865 кг вугілля/тис. дол. США і 65,462 м³/ тис. дол. США або в цілому 228,82 кг у.п./тис. дол. США.

3. Найвищою в Україні є повна енергоемність металургійної продукції (понад 36 кг у.п./тис.грн. в 2017 р.), а найнижчою – комп'ютерні послуги (1,32 кг у.п./тис.грн.).

4. Витрати палива в енергосистемі і в котельнях (при виробництві електричної і теплової енергії) мають найбільшу частку в повній енергоемності хімічної продукції (понад 73 % від загальних повних енерговитрат); витрати палива, обумовлені відтворенням робочої сили, найбільші в секторі надання комп'ютерних послуг (понад 93 %); а витрати палива, обумовлені виробництвом сировини і матеріалів, найбільші в металургійному секторі (майже 49 %).

5. Причинами значного перевищення повних витрат на виробництво продукції витратами палива, які визначаються за даними про нижчу теплоту згоряння палива) є те, що в енергоекономічному аналізі:

- повна енергоемність палива розраховується як відношення витрат палива на виробництво палива до обсягів виробництва палива (повна енергоемність вугілля становила 9,93 кг у.п./т і природного газу – 16,02 кг у.п./тис.м³), а не за даними про питому теплоту згоряння палива (яка в 2017 р. для вугілля становила 750 кг у.п./т, а природного газу – 1160 кг у.п./тис.м³);
- витрати імпортного палива на виробництво продукції визначаються витратами палива на виробництво експортованої продукції, валютні надходження від експорту якої використовуються для закупівлі імпортного палива (при цьому складова повної енергоемності продукції, обумовлена імпортом палива, становить біля 3,8 % для вугілля і 1,06 % для природного газу).

6. Методи енергоекономічного аналізу і показники повної енергоемності продукції можна використовувати для аналізу ефективності інвестиційних проектів, зовнішньоекономічних зв'язків, планів економічного розвитку країни, функціонування її економіки і окремих технологічних процесів, а також модернізації виробництва, в результаті якого скорочуються витрати сировини, матеріалів і трудовитрати на виробництво продукції.

Список використаної літератури

1. Панченко Г.Г. Стан і перспективи розвитку енергетичного аналізу. – Енергетика: економіка, технології, екологія. 2019. № 4. – с. 48-56.
2. Тонкаль В.Ю., Гнідой М.В., Панченко Г.Г., Стоянова І.І., Соколовська І.С. Методика визначення повної енергоемності продукції, робіт і послуг. - ДСТУ 30583-98.– Держстандарт України. – Київ. – 1998. – 11 с.
3. Тонкаль В.Е., Гнедой Н.В., Панченко Г.Г., Стоянова И.И., Соколовская И.С. Методика определения полной энергоёмкости продукции, работ и услуг. - ГОСТ 30583-98 Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – 1998. – 11 с.
4. Энергоэкономический анализ производства продукции, работ и услуг. // Панченко Г.Г. – К., 1994. – 30 с. – (Препринт/НАН Украины. Институт проблем энергосбережения; 94-3).

5. Slesser M. Energy in the Economy. The Macmillan Press Ltd. London and Basingstoke, 1978, 164 p.
6. Дубовський С.В., Хортова О.О. Оцінка основних показників комбінованого виробництва електричної енергії та теплоти на паротурбінних установках атомних електричних станцій. – ISSN 0204-3602. Пром. Теплотехніка, 2015, т. 37. №5. – с.47-55.
7. Інформація про роботу електроенергетичного комплексу за грудень 2017 року. – http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245272535&cat_id=245183225.
8. Панченко Г.Г. Повна енергоємність трудовитрат. – Актуальні питання розвитку сучасної економіки, управління та адміністрування: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 28 грудня 2019 р. – Київ: Таврійський національний університет імені В.І.Вернадського, 2019. Ч. II. – с.43-46.
9. Панченко Г.Г. Повна енергоємність валюти. – Актуальні питання розвитку сучасної економіки, управління та адміністрування: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 28 грудня 2019 р. – Київ: Таврійський національний університет імені В.І.Вернадського, 2019. Ч. II. – с.80-84.
10. Хмельовська О. Які країни й міжнародні організації фінансово підтримують Україну. – 5.06.2014. <https://tyzhden.ua/News/111562>.
11. Зовнішня торгівля окремими видами товарів за країнами світу за січень-грудень 2017 року. - http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2017/zd/tsztt/tsztt_u/tsztt1217_u.htm.
12. Обсяг реалізованої промислової продукції (товарів, послуг) за видами економічної діяльності у 2010-2019 роках. - http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2013/pr/orp_rik/orp_rik_u.htm.

G.G. Panchenko, Cand.Sc.(Eng.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-7234-4078
State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management

ENERGY-ECONOMIC ANALYSIS SECTORS OF THE ECONOMY OF UKRAINE

The work is devoted to methods of calculating the total energy intensity of fuel, currency, products, labor costs, raw materials and materials necessary for the practical application of energy-economic analysis of production efficiency. The article proposes a simplified methodology and performs calculations to estimate the total energy intensity of currency and products of seven sectors of the economy of Ukraine, which produce food, mineral, chemical, metallurgical and machine-building products, as well as services - transport and computer programming. Calculations were made for three types of fuel - nuclear fuel, coal and natural gas, which in 2017 accounted for more than 76% of total fuel consumption in Ukraine. The main components of the total energy intensity of the products of the national economy are due to the use of fuel for the production of fuel, electricity and heat and raw materials, as well as the cost of fuel for the production of products that workers buy for wages. The article identifies the relative energy and economic efficiency of fuel use in the economy of Ukraine.

Keywords: energy-economic analysis; total fuel consumption, total energy intensity, total energy intensity of currency.

References

1. Panchenko G.G. Stan i perspektivi rozvitku energetichnogo analizu. – Energetika: ekonomika, tekhnologii, ekologiya. 2019. № 4. – s. 48-56.
2. Tonkal' V.Yu., Gnidoi M.V., Panchenko G.G., Stoyanova I.I., Sokolov'ska I.S. Metodika viznachennya povnoї energoemnosti produktsii, robot i poslug. - DSTU 30583-98.– Derzhstandart Ukraїni. – Kїiv. – 1998. – 11 s.
3. Tonkal' V.E., Gnidoi N.V., Panchenko G.G., Stoyanova I.I., Sokolovskaya I.S. Metodika opredeleniya polnoi energoemkosti produktsii, robot i uslug. - GOST 30583-98 Mezghosudarstvennyi sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii. – 1998. – 11 s.
4. Energoekonomicheskii analiz proizvodstva produktsii, robot i uslug. // Panchenko G.G. – K., 1994. – 30 s. – (Preprint/NAN Ukrainy. Institut problem energobsrezheniya; 94-3).
5. Slesser M. Energy in the Economy. The Macmillan Press Ltd. London and Basingstoke, 1978, 164 p.
6. Dubov'skii S.V., Khortova O.O. Otsinka osnovnikh pokaznikov kombinovanogo virobntstva elektrichnoi

energii ta teploti na paroturbinnikh ustanovkakh atomnikh elektrichnikh stantsii. – ISSN 0204-3602. Prom. Teplotekhnika, 2015, t. 37. №5. – s.47-55.

7. Informatsiya pro robotu elektroenergetichnogo kompleksu za grudn' 2017 roku. – http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245272535&cat_id=245183225.

8. Panchenko G.G. Povna energoemnist' trudovitrat. – Aktual'ni pitannya rozvitku suchasnoi ekonomiki, upravlinnya ta administruvannya: Materiali mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, m. Kiiv, 28 grudnya 2019 r. – Kiiv: Tavriis'kii natsional'nii universitet imeni V.I.Vernads'kogo, 2019. Ch. II. – s.43-46.

9. Panchenko G.G. Povna energoemnist' valyuti. – Aktual'ni pitannya rozvitku suchasnoi ekonomiki, upravlinnya ta administruvannya: Materiali mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, m. Kiiv, 28 grudnya 2019 r. – Kiiv: Tavriis'kii natsional'nii universitet imeni V.I.Vernads'kogo, 2019. Ch. II. – s.80-84.

10. Khmel'ovs'ka O. Yaki kraïni i mizhnarodni organizatsii finansovo pidtrimuyut' Ukraïnu. – 5.06.2014. <https://tyzhden.ua/News/111562>.

11. Zovnishnya torgivlya okremimi vidami tovariv za kraïnami svitu za sichen'-gruden' 2017 roku. - http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2017/zd/tsztt/tsztt_u/tsztt1217_u.htm.

12. Obsyag realizovanoi promислоvoi produktsii (tovariv, poslug) za vidami ekonomichnoi diyal'nosti u 2010-2019 rokakh. - http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2013/pr/orp_rik/orp_rik_u.htm.

Надійшла 13.07.2021

Received 13.07.2021

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Роботу присвячено аналізу особливостей визначення економічних показників доцільності впровадження заходів з підвищення енергетичної ефективності. На відміну від енергозбереження, що спрямоване на зменшення споживання енергетичних ресурсів, енергоефективність – це питання доцільного витрачання енергії, тобто застосування меншої кількості енергії для того ж рівня забезпечення будівель або виробництва. Тема є актуальною, оскільки наразі ціни на енергоресурси зростають з кожним роком все вище. В той же час Міжнародне енергетичне агентство передбачує збільшення загальної потреби в ресурсах до 2040 року на 25%.

Для досягнення мети було проаналізовано, оцінено і по груповано типові заходи спрямовані на підвищення енергетичної ефективності будівель, ефекти від впровадження описаних заходів, ряд економічних показників, серед яких PP, ARR, NPV, PI, BCR, SIR, MARR, IRR та DPP. Основну увагу було приділено динамічній групі показників у зв'язку з тим, що під час їхнього розрахунку передбачають використання процедури дисконтування. Загальна схема всіх динамічних показників однакова і ґрунтується на прогнозуванні витрат і доходів на плановий період. Показники цієї групи враховують зміни вартості грошей у часі, чим нехтують показники статичної групи. Найбільш популярними вважаються показники розрахунку чистої приведеної вартості (NPV) та визначення індексу рентабельності (PI). Дана робота може бути використана при вирішенні проблеми низької енергоефективності та недостатньому фінансуванні для модернізації будівлі.

Ключові слова: енергоефективність, енергозбереження, комплекс заходів з підвищення енергетичної ефективності, економічні показники, зростання цін, енергетичні ресурси, будівлі, статичні та динамічні показники, витрати, доходи.

Вступ

В умовах постійного зростання цін на основні види енергоресурсів, особливої актуальності набувають питання енергозбереження та підвищення енергоефективності в будівлях. Для вирішення цієї проблеми є необхідним впроваджувати комплекс заходів спрямованих на підвищення енергоефективності будівель, які дадуть позитивний вплив не лише на комфортний режим перебування в них, але і на зменшення платежів за енергоносії.

Для цього було проаналізовано заходи, проведення яких в більшій мірі сприяє енергозбереженню і підвищенню ефективності використання енергетичних ресурсів. Заходів для підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів існує велика кількість, які мають свої особливості, сферу застосування, вартість впровадження та відносний економічний ефект. Після аналізу існуючих заходів постає лише питання вибору найбільш доцільних враховуючи стан існуючої будівлі та інші аспекти впровадження.

При впровадженні енергозберігаючих заходів наявні такі ефекти:

Таблиця 1 – Ефекти від впровадження енергозберігаючих заходів

	Складові ефектів
Енергетичні	Поліпшення енергетичних характеристик будівель і об'єктів нерухомості, економія тепла, електроенергії, води, палива, інших ресурсів.
Економічні	Зниження частки паливно-енергетичних ресурсів в собівартості продукції, зростання (в тому числі питомо) продуктивності, товарообігу, виробництва послуг, підвищення капіталізації будівель.
Ергономічні	Поліпшення умов праці, комфортності перебування, мікроклімату в навчальних, робочих і житлових приміщеннях.
Екологічні	Скорочення одного або декількох впливів на навколишнє середовище (викидів в атмосферу, водні джерела, шуму, відходів).
Фінансові	Зниження платежів за енергоресурси, економія і вивільнення бюджетних коштів (на оплату енергоресурсів), зниження сум оплати за ресурси, окупність заходів.

Матеріал та результати досліджень

Типові заходи умовно поділяються на дві підгрупи: пасивні та активні. До них входять[1]:

Таблиця 2 – Типові енергозберігаючі заходи

Назва заходу	Мета заходу	Застосовувані технології, матеріали, обладнання
Підгрупа «пасивних» заходів з енергозбереження		
Утеплення огорожувальної конструкції (зовнішніх стін, стелі підвалу, підлоги горища, покрівлі) [2]	1) зменшення промерзання стін 2) зменшення охолодження чи промерзання стелі технічного підвалу 3) зменшення протікань, охолодження чи промерзання підлоги технічного поверху чи горища 4) раціональне використання теплової енергії 5) збільшення строку служби будівельних конструкцій	Технологія вентиляваного фасаду, ізоляційні матеріали, захисний шар, обшивка, технології плоских дахів, тепло-, водо-, пароізоляційні матеріали та ін.
Ізоляція міжпанельних і компенсаційних швів	1) зменшення протягів, протікань, промерзання, утворення грибків 2) раціональне використання теплової енергії 3) збільшення строку служби стінових конструкцій	Технологія «теплий шов», герметик, теплоізоляційні прокладки, мастики та ін.
Гідрофобізація стін [2]	1) зменшення намокання та промерзання стін 2) раціональне використання теплової енергії 3) збільшення строку служби стінових конструкцій	Гідрофобізатори на кремній-органічній або акриловій основі
Заміна віконних та балконних блоків, встановлення тепловідбивних плівок на вікна та низькоемісійних склопакетів	1) зниження інфільтрації 2) зниження втрат випромінюваної енергії; 3) раціональне використання теплової енергії 4) збільшення строку служби	Сучасні склопакети, тепловідбиваюча плівка, низькоемісійні склопакети
Ремонт ізоляції трубопроводів і стояків системи опалення та ГВП [2]	1) Раціональне використання теплової енергії 2) зменшення споживання теплової енергії в системі опалення та води в системі ГВП	Сучасні теплоізоляційні матеріали для труб
Промивання трубопроводів і стояків системи опалення [2]	1) Раціональне використання теплової енергії 2) зменшення споживання теплової енергії в системі опалення	Промивочні машини та реагенти
Ущільнення та утеплення входних блоків, забезпечення автоматичного закривання дверей [2]	1) зменшення втрат тепла через двері 2) раціональне використання теплової енергії 3) підвищення безпеки	Двері з теплоізоляцією, ущільнювачі, поліуретанова піна, автоматичні доводчики дверей

Продовження таблиці 2

Модернізація трубопроводів і арматури системи опалення [2]	1)Збільшення строку експлуатації трубопроводів 2)зменшення протікань 3)зменшення числа аварій 4)раціональне використання теплової енергії 5)економія теплової енергії в системі опалення	Сучасні ізольовані трубопроводи, арматура
Підгрупа «активних» заходів з енергозбереження		
Заміна ламп розжарювання на енергоефективні лампи та встановлення обладнання для автоматичного освітлення	1)економія електроенергії 2)підвищення якості освітлення 3)автоматичне регулювання освітленості	Світлодіодні лампи, датчики освітленості, датчики присутності
Встановлення лінійних балансувальних вентилів та балансування системи опалення	1)раціональне використання теплової енергії 2)Зниження споживання теплової енергії в системі опалення	Балансувальні вентиля, запірні вентиля, повітровипускні клапани
Модернізація ІТП із встановленням погодного регулювання [2]	1)автоматичне регулювання параметрів в системі опалення 2)раціональне використання теплової енергії 3)Зниження споживання теплової енергії в системі опалення	Обладнання для автоматичного регулювання витрати, температури та тиску води в системі опалення, в тому числі насоси, контролери, регулювальні клапани з приводом, датчики температури
Встановлення термостатичних вентилів на радіаторах	1)підвищення рівня температурного комфорту в приміщеннях 2)зниження споживання теплової енергії в системі опалення	Термостатичні радіаторні вентиля (термоголовки)
Забезпечення рециркуляції води в системі ГВП [2]	1)економія теплової енергії в системі ГВП	Циркуляційні насоси, автоматика, трубопроводи
Модернізація електродвигунів або заміна на енергоефективні	1)точне регулювання параметрів в системі опалення, ГВП та ХВП 2)економія електроенергії	Три швидкісні двигуни, двигуни з частотним регулюванням
Встановлення теплових насосів для системи опалення та кондиціонування	Економія теплової енергії	Теплові насоси
Ремонт змішувачів душових насадок та унітазів або їх заміна	1)ліквідація втрат води 2)Раціональне використання води 3)Зменшення споживання води в системі ХВП та ГВП	Запчастини, сучасні економічні моделі
Ремонт або встановлення повітряних заслонок [2]	1)ліквідація втрат тепла через систему вентиляції 2)раціональне використання теплової енергії	Повітряні заслонки з регулюванням прохідного перерізу

В умовах дефіциту фінансування та відсутності коштів у власників будівлі на її модернізацію, слід враховувати ефект від впроваджених заходів, які дадуть змогу обрати більш доцільний захід не лише з фінансової точки зору, а й з таких аспектів як енергетичний, економічний, ергономічний та екологічний.

У ряді випадків додаткові ефекти проведення енергоресурсозбереження цілком можуть дати досить значні економічні та фінансові показники. Їх адекватна і професійна капіталізація, а також розробка методів розрахунку кумулятивних, синергетичних ефектів є актуальним методологічним завданням

прикладної економічної науки, особливо в світлі зростання соціально-екологічних пріоритетів розвитку економіки.

Розрахунок ефективності капіталовкладень зазвичай не відповідав вимогам, які ставили інвестори. Використовувалися лише статичні методи розрахунку. Недолік в тому, що вони не враховують фактор часу. Некоректно порівнювати проекти лише на основі первинних інвестицій в них, адже може виявитися, що за сумою витрат до повного зносу проект з меншими капітальними вкладеннями виявиться більш дорогим, а значить, менш вигідним.

Отже, економічні показники можна умовно поділити на 2 групи: статичні та динамічні показники. Розглянемо деякі види методів оцінки ефективності інвестиційних проектів.

Методи, що не передбачають використання процедури дисконтування, – статичні методи або прості методи [3]. Зазвичай застосовується для зовнішньої демонстрації успішності того чи іншого проекту. Показники цієї групи у своїй формулі не враховують зміни вартості грошей у часі. Даний показник краще використовувати на початкових етапах оцінки та відбору інвестиційних проектів.

Існують такі методи: метод розрахунку періоду окупності інвестицій (PP, Payback Period); метод визначення рентабельності інвестицій (ARR, Accounting Rate of Return) [3].

Термін окупності (PP, Payback Period) – це період часу, за який початкові витрати на реалізацію проекту покриваються сумарними результатами (економією) від його здійснення. Економічний зміст даного показника полягає в тому, щоб показати строк, за який інвестор поверне назад свої вкладені гроші (капітал) [3].

$$PP = \sum_{t=1}^n CF_t \geq I_0 \quad (1)$$

де, CF – грошові потоки, I_0 – інвестиції, n – кількість періодів окупності інвестицій в проект.

Рентабельність інвестиційного проекту (ARR, Accounting Rate of Return) – це показник, що показує прибутковість об'єкта інвестицій без урахування дисконтування. Даний показник використовується для порівняння різних альтернативних інвестиційних проектів. Чим вище ARR, тим вище привабливість даного проекту для інвестора. Як правило, даний показник використовується для оцінки вже існуючих проектів, де можна дослідити і статистично оцінити ефективність створення грошового потоку даної інвестиції.

$$ARR = \frac{PN}{1/2 \cdot (I + RI)} \quad (2)$$

де, PN — середньорічний прибуток (середній грошовий потік за мінусом амортизаційних відрахувань (тобто чистий прибуток) об'єкта інвестицій за аналізований період), I – інвестиції (вартість інвестицій (витраченого капіталу) на початок періоду), RI – ліквідаційна вартість (вартість інвестицій на кінець періоду) [3].

Перевага статичних показників в простоті розрахунку. До недоліків даної групи можна віднести складність прогнозування майбутніх грошових надходжень / доходів від проекту.

Динамічними називаються показники, які визначаються на основі значень результатів за проектом протягом всього строку реалізації проекту.

Всі динамічні показники враховують фактор впливу часу. При їх розрахунку використовується техніка дисконтування. Важливим етапом цього методу є визначення ставки дисконту.

Виділяють такі показники:

- 1) Метод розрахунку чистої приведеної вартості проекту (Net Present Value – NPV)
- 2) Метод визначення індексу рентабельності (прибутковості) інвестицій (Profitability Index - PI)
- 3) Savings-to-Investment Ratio (SIR)/Benefit-to-Cost Ratio (BCR)
- 4) Мінімальна приваблива ставка доходності (MARR)
- 5) Метод визначення внутрішньої норми доходності (Internal Rate of Return - IRR)
- 6) Модель дисконтованого періоду окупності (DPP).

NPV (Net Present Value) – являє собою суму чистої економії за весь розрахунковий період з урахуванням зміни вартості грошей. Враховує не тільки витрати протягом життєвого циклу, а й ефект від реалізації заходів [3].

$$NPV = -Inv + \sum_{i=1}^n \frac{(E_i - C_i)}{(1+r)^i} \quad (3)$$

де n – кількість років в періоді; i – поточний рік; Inv – інвестиції в проект; E_i – економія за період; C_i – поточні витрати за період; r – норма дисконту.

Якщо $NPV > 0$ – грошовий потік проекту за конкретний термін покрив своїми надходженнями інвестиції та поточні витрати.

Якщо $NPV = 0$ – проект покрив інвестиції і поточні витрати та забезпечив мінімальний дохід.

Якщо $NPV < 0$ – проект в розглянутий період не забезпечив навіть мінімального доходу, закладеного в ставці дисконтування, а можливо, не покрив навіть інвестиції та поточні витрати.

Основна перевага NPV полягає в тому, що всі розрахунки проводяться на основі грошових потоків, а не чистих доходів. Окрім того, ефективність головного проекту можна оцінити шляхом підсумовування NPV його окремих підпроектів. Це дуже важлива властивість, яка дає змогу використовувати NPV як основний критерій при аналізі проекту.

Основним недоліком NPV є те, що її розрахунок вимагає детального прогнозу грошових потоків на термін життя проекту. Часто робиться припущення про постійність ставки дисконту.

Для порівняння проектів зі схожими показниками NPV застосовується індекс рентабельності. Індекс прибутковості (Profitability Index – PI) – це процес прийняття рішень, який допомагає оцінити, чи продовжувати проект. Сам індекс – це розрахунок потенційного прибутку пропонованого проекту. Індекс прибутковості розраховується шляхом ділення теперішньої вартості майбутніх грошових потоків, які будуть генеровані проектом, на початкову вартість проекту [3].

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{B_i}{(1+r)^i}}{I_0} = \frac{NPV}{I_0} \quad (4)$$

де, B – чистий дохід i -го року, n – кількість періодів експлуатації проекту, I_0 – інвестиції проекту, r – ставка дисконтування.

Якщо PI більше 1 вказує на те, що проект повинен продовжуватися; якщо PI або коефіцієнт нижче 1 вказує на те, що від проекту слід відмовитись. якщо PI дорівнює 1, то проект є безбитковим [8].

До переваг цього методу можна віднести:

- можливість у більшості випадків точно враховувати зростання вартості майна;
- можливість враховувати чинник часу;
- легкість застосування фахівцями;
- використання для розрахунків показників усього грошового потоку проекту;
- можливість правильно обрати об'єкти інвестування у разі обмеженості фінансових ресурсів підприємства;
- можливість використовувати різні рівні вартості капіталу в розрахунку.

До недоліків можна віднести:

- досить складно одержати дані для всього періоду реалізації проекту;
- у разі вибору одного із взаємовиключаючих проектів може бути неправильний результат (тоді краще застосувати метод ЧСВ);
- розробляти методологію та аналізувати проекти може лише підготований персонал;
- показник використовується лише в тих випадках, коли інвестиційний проект можна реалізувати частинами, тобто його можна розділити.

Benefit-to-Cost Ratio (BCR) та Savings-to-Investment Ratio (SIR) – це числові коефіцієнти, розмір яких вказує на економічні показники інвестиції.

BCR – це коефіцієнт, який використовується в аналізі витрат і вигід для узагальнення загальної залежності між відносними витратами та вигодами від запропонованого проекту. Він обчислюється як вигоди, за вирахуванням майбутніх не інвестиційних витрат, поділених на інвестиційні витрати. Критерій BCR може бути використаний для демонстрації того, наскільки можливе збільшення витрат без перетворення проекту на економічно непривабливий.

$$BCR = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{B_i}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^i}} \quad (5)$$

де, B – витрати; C – вигоди.

Якщо коефіцієнт BCR проекту > 1.0 , очікується, що проект забезпечить позитивну чисту поточну вартість для фірми та її інвесторів. Якщо BCR проекту < 1.0 , витрати проекту перевищують вигоди, і їх не слід враховувати [5].

Основна перевага критерію полягає в можливості швидкого з'ясування його значень для оцінки впливу на результати проекту рівнів ризиків та непевностей.

SIR використовується щоб визначити, чи виправдовує потенційна економія проекту початкові інвестиції. Він розраховується шляхом ділення прогнозованої економії енергетичних витрат на фінансовий

термін на загальну встановлену вартість проекту, включаючи вартість обладнання, монтажу та фінансування

$$SIR = \frac{PV_{AS}}{PV_1} \quad (6)$$

де, PV_{AS} – це економія; PV_1 – інвестиційні витрати.

Коефіцієнт менше $< 1,0$ вказує на неекономічні інвестиції. Коефіцієнт $1,0$ означає інвестицію, вигоди чи економія якої просто дорівнює її витратам. Коефіцієнт $> 1,0$ вказує на економічний проект [6].

Мінімальна приваблива ставка дохідності Minimum Attractive Rate of Return (MARR) – це така мінімальна норма віддачі на вкладений капітал (з урахуванням рівня ризику), яка може стимулювати інвесторів до відповідних фінансових вкладень. Це ставка, яка вказує нижню межу середньозваженої дохідності подібних альтернативних інвестицій з близьким ступенем ризику; її можна застосовувати як процентну ставку для дисконтування.

$$MARR = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{ЧП}{(1+q)^i} * m}{\sum_{i=1}^m \frac{ІВ}{(1+q)^i} * n} \quad (7)$$

де, $ІВ$ – інвестиційні витрати; $ЧП$ – середнє за період життєвого циклу інвестицій значення чистого інвестиційного прибутку; q – ставка дисконтування; n – число періодів життєвого циклу інвестицій; m – кількість періодів інвестування.

Коли проект був запропонований, він повинен спочатку пройти попередній аналіз, щоб визначити, чи має він позитивну чисту приведену вартість з використанням ставки дисконтування. MARR є цільовим показником для оцінки інвестицій в проект. Це досягається шляхом створення схеми грошових потоків для проекту і переміщення всіх транзакцій на цій діаграмі в одну і ту ж точку з використанням MARR як процентної ставки. Якщо результуюче значення в цій точці дорівнює нулю або вище, тоді проект перейде до наступного етапу аналізу. В іншому випадку він відкидається. MARR зазвичай збільшується з підвищеним ризиком. Як правило, рівень перешкод дорівнює витратам компанії на капітал, який є поєднанням вартості власного капіталу та вартості боргу [7].

Внутрішня норма рентабельності (IRR, Internal Rate of Return) – показує таку ставку дисконтування, при якій чистий дисконтований дохід дорівнює нулю [3].

$$IRR = r_1 + \frac{NPV(r_1)}{NPV(r_1) - NPV(r_2)} * (r_2 - r_1) \quad (8)$$

де, r_1 – значення ставки дисконтування, при якому $NPV(r_1) > 0$; r_2 – значення ставки дисконтування, при якому $NPV(r_2) < 0$;

Переваги внутрішньої норми прибутковості IRR:

- Можливість порівняння інвестиційних проектів між собою, які мають різний горизонт інвестування.
- Можливість порівняння не тільки проектів, а й альтернативних інвестицій, наприклад банківський вклад.
- Експрес-оцінка проекту на доцільність його подальшого розвитку.

Недоліки внутрішньої норми прибутковості IRR.

- не показує абсолютне зростання вартості інвестиційного проекту;
- грошові потоки часто не мають систематичної структури, це ускладнює правильний розрахунок даного показника.

Оцінка значень коефіцієнта IRR:

- $IRR > MARR$ – вкладений в інвестиційний проект капітал буде створювати прибутковість вище, ніж вартість вкладеного капіталу. Такий проект інвестиційно привабливий.
- $IRR = MARR$ – проект не принесе ні збитків, ні доходу в майбутньому періоді і такий проект не є привабливим.
- $IRR < MARR$ – такий проект буде створювати негативний дисконтований грошовий потік в майбутньому.

Дисконтований термін окупності (DPP, Discounted Payback Period) – показник відображає період, через який окупляться початкові інвестиційні витрати. Формула розрахунку коефіцієнта подібна формулі оцінки періоду окупності інвестицій (PP), але з використанням дисконтування [7].

$$DPP = \sum_{i=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \geq I_0 \quad (9)$$

де, CF – фінансові потоки, що отримуються від реалізації інвестиційного проекту; r – ставка дисконтування; n – кількість періодів інвестування, I_0 – інвестиції.

Перевагою коефіцієнта є можливість використовувати у формулі властивість грошей змінювати свою вартість з часом за рахунок інфляційних процесів. Це підвищує точність оцінки періоду повернення

вкладеного капіталу. Недоліком показника є те, що використання даного коефіцієнта полягає в точному визначенні майбутніх грошових надходжень від інвестиції та оцінці ставки дисконтування. Ставка може змінюватися на всьому життєвому циклі інвестиції через дії економічних, політичних, виробничих факторів.

Взагалі між показниками NPV, PI, IRR, MARR існує тісний взаємозв'язок: якщо $NPV > 0$, то водночас $IRR > MARR$, а $PI > 1$; якщо $NPV < 0$, то водночас $IRR < MARR$, а $PI < 1$; якщо $NPV = 0$, то водночас $IRR = MARR$, а $PI = 1$.

Необхідно зауважити, що у разі незалежних проєктів, і метод NPV, та IRR приводять до однакового результату про прийняття чи відхилення проєктів. Але при оцінці взаємовиключних проєктів, особливо проєктів з різними масштабами чи розподіленням грошових потоків в часі, повинен бути використаний метод NPV [3].

Метод розрахунку терміну окупності найбільш виправданий у випадку, коли інвестиції мають високий ступінь ризику. Тому чим менший термін окупності, тим менш ризикованим є проєкт. Але ці методи мають суттєвий недолік, який полягає в ігноруванні потоків грошових коштів, які витрачаються чи надходять після завершення періоду окупності.

Висновки

Використання коефіцієнтів оцінки інвестиційних проєктів дозволяє зробити вибір найбільш привабливих об'єктів для вкладення грошових коштів. Ми розглянули як статистичні, так і динамічні методи оцінки, на практиці, перші підходять для відображення загальної характеристики об'єкта, тоді як динамічні дозволяють більш точно оцінити параметри інвестиції. У сучасній економіці використання даних показників ефективно на порівняно невеликий горизонт інвестування. Крім зовнішніх чинників, на оцінку впливають внутрішні – складність точного визначення майбутніх грошових надходжень від проєкту. Показники більшою мірою відображають фінансовий опис життя інвестиції і не розкривають причинно-наслідкових зв'язків з одержуваними доходами (складно оцінити венчурні проєкти і стартапи). У той же час, простота розрахунків коефіцієнтів дозволяє вже на першому етапі аналізу виключити не рентабельні проєкти.

Використання економічних показників оцінки інвестиційних проєктів дозволяє зробити вибір найбільш привабливих об'єктів для вкладення грошових коштів. Ми умовно поділили коефіцієнти на декілька груп, розглянули як статичні, так і динамічні методи оцінки. Перші підходять для демонстрації загальної характеристики об'єкта, тоді як динамічні дозволяють більш точно оцінити параметри вкладеної інвестиції. Аналіз показав, що є різні групи економічних показників. Кожна має свої переваги та недоліки. Тому, в залежності від потреб інвестора доцільніше обирати окремі групи економічних показників.

Список використаної літератури

1. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 № 2118-VIII. С. 359
2. 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.
3. Офіційний сайт програмного продукту SGV, [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sgv.in.ua/off-lifaq/28-otsinka-efektivnosti-investitsij-v-excel-rozrakhunok-npv-pp-dpp-irr-arr-pi>.
4. Rosalie T. Ruegg, Harold E. Marshall, Building Economics: Theory and Practice, p. 46-48, Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4757-4688-4_4
5. Benefit-Cost Ratio (BCR), [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.investopedia.com/terms/b/bcr.asp>
6. Aditya Goenka, Lin Liu, and Manh-Hung Nguyen, SIR Economic Epidemiological Models with Disease Induced Mortality, TSE Working Paper, n. 20-1150, October 2020, revised January 2021.
7. Дерев'яно Д.Г., Оцінювання ефективності регулювання енергетичних процесів в локальних електротехнічних системах з джерелами розосередженої генерації, : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03. Київ, 2016. 14 с.
8. Discounted Payback Period, [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.investopedia.com/terms/d/discounted-payback-period.asp>
9. Profitability Index (PI) Rule, [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.investopedia.com/terms/p/profitability-index-rule.asp>

D. Derevianko, Ph.D Assoc, Prof, ORCID 0000-0002-4877-5601

A. Kolodiazhna, student, ORCID 0000-0001-6840-6988

Y. Nytsun, student, ORCID 0000-0002-6209-5741

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

PECULIARITIES OF DETERMINATION OF ECONOMIC INDICATORS OF EXECUTIBILITY OF IMPLEMENTATION OF MEASURES TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY

The work is devoted to the analysis of the peculiarities of determining the economic indicators of the feasibility of implementing measures to improve energy efficiency. In contrast to energy saving, which aims to reduce the consumption of energy resources, energy efficiency is a matter of appropriate energy consumption. That is, the use of less energy for the same level of supply of buildings or industries. The topic is relevant, because now energy prices are rising every year. At the same time, the International Energy Agency estimates an increase in total resource needs by 25% by 2040.

To achieve this goal, standard measures aimed at improving the energy efficiency of buildings, the effects of the implementation of these measures, a number of economic indicators, including PP, ARR, NPV, PI, BCR, SIR, MARR, IRR and DPP, were analyzed, evaluated and grouped. The focus was on the dynamic group of indicators due to the fact that their calculation involves the use of a discounting procedure. The general scheme of all dynamic indicators is the same and is based on forecasting costs and revenues for the planning period. The indicators of this group take into account changes in the value of money over time, which is neglected by the indicators of the static group. The most popular indicators are the calculation of net present value (NPV) and the definition of profitability index (PI). This work can be used to solve the problem of low energy efficiency and insufficient funding for the modernization of the building.

Keywords: energy efficiency, energy saving, a set of measures to improve energy efficiency, economic indicators, rising prices, energy resources, buildings, static and dynamic indicators, costs, revenues.

REFERENCES

1. Pro enerhetychnu efektyvnist budivel: Zakon Ukrainy vid 22.06.2017№ 2118-VIII. S. 359.
2. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrahunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osviltleni ta hariachomu vodopostachanni / DSTU B A.2.2-12:2015 [Natsionalnyi standart Ukrainy] – K.: Minrehion Ukrainy, 2015, - 203 s.
3. Oficiyinyi sayit prohramnoho produktu ELCUT, [Electronic resource]. - Access mode: <https://sgv.in.ua/off-lifag/28-otsinka-efektivnosti-investitsij-v-excel-rozrahunok-npv-pp-dpp-irr-arr-pi>
4. Rosalie T. Ruegg, Harold E. Marshall, Building Economics: Theory and Practice, p. 46-48, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4757-4688-4_4
5. Benefit-Cost Ratio (BCR), [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.investopedia.com/terms/b/bcr.asp>
6. Aditya Goenka, Lin Liu, and Manh-Hung Nguyen, SIR Economic Epidemiological Models with Disease Induced Mortality, TSE Working Paper, n. 20-1150, October 2020, revised January 2021.
7. Derevianko D.G., Evaluation of the effectiveness of regulation of energy processes in the local electrical systems with DG sources,; author's ref. dis. ... cand. tech. Science: 05.09.03. Kyiv, 2016. 14 p.
8. Discounted Payback Period, [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.investopedia.com/terms/d/discounted-payback-period.asp>
9. Profitability Index (PI) Rule, [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.investopedia.com/terms/p/profitability-index-rule.asp>

Надійшла 21.08.2021

Received 21.08.2021

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

УДК 004.032.26;620.91

DOI 10.20535/1813-5420.2.2021.247414

Б.І. Басок, чл.-кор. НАН України, д-р. техн. наук, ORCID 0000-0002-8935-4248

М.П. Новіцька, с.н.с., канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-2867-101X

О.М. Недбайло, с.н.с., д-р. техн. наук., ORCID 0000-0001-1416-9651

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

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

Інститут технічної теплофізики НАН України

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ПОВІТРЯНО- ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМІННИКА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Метою роботи є прогнозування теплового стану повітряно-грунтового теплообмінника на основі штучної нейронної мережі. Навчання, тестування та валідація запропонованої моделі зроблені на експериментальних даних отриманих в теплофізичній лабораторії Інституту технічної теплофізики НАН України. У цій роботі використано просту нейронну мережу. В якості вхідних параметрів для нейронної мережі обрано температуру повітря на вході в теплообмінник та його вологість. У цій роботі в розрахунках використовувався MATLAB (R2016a) та модель Левенберга-Маркватта. В моделі був присутній один прихований шар та 10 нейронів. Масив даних, що аналізувався розбивався у пропорції 70%, 15%, 15% для навчання нейронної мережі, її валідації та тестування відповідно. В результаті отримано, що в усіх моделях прогнозування відбувається із прийнятною точністю. Коефіцієнт середньоквадратичного відхилення для всього масиву даних для різних моделей варіюються від 0,105 до 2,323 °C. Максимальна середня абсолютна помилка у відсотках виявилась найбільшою при використанні формул отриманих із CFD моделі та складала 11,2%. Мінімальне середнє відхилення прогнозованих даних від експериментально виміряних виявилось в моделі із використанням температури, вологості та температури повітря на виході із повітряно-грунтового теплообмінника за попередню годину і складало 0,02%. Навчання та тестування запропонованих моделей на основі штучної нейронної мережі є достатньо задовільними, щоб передбачити температуру із врахуванням впливу погодних умов. Штучні нейронні мережі можна використовувати при прогнозуванні теплового стану повітряно-грунтового теплообмінника. Для налаштування таких системи ШНМ потрібні дані, що представляють опис реальної системи.

Ключові слова: штучна нейронна мережа, повітряно-грунтовий теплообмінник, моделювання, прогнозування.

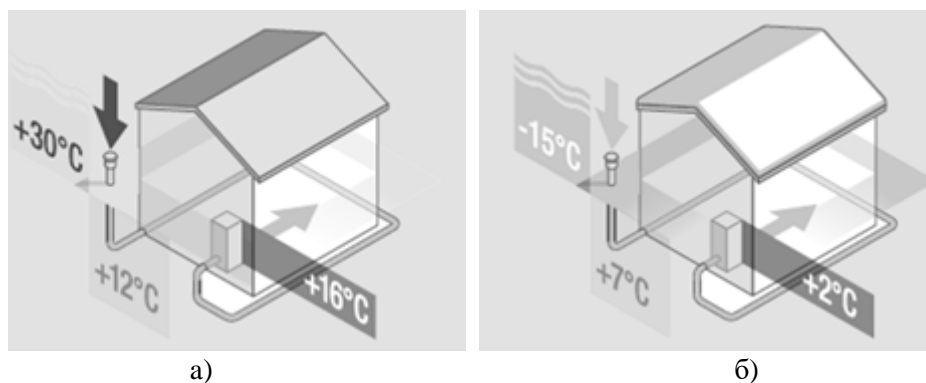
Вступ

Штучні нейронні мережі (ШНМ) - це інструмент моделювання та прогнозування, широко прийнятий як альтернативний спосіб вирішення складних та невизначених задач. Техніка моделювання з використанням штучної нейронної мережі пропонує рішення для розробки більш узагальненої моделі для прогнозування великих масивів різних експериментальних даних, наприклад, при використанні кліматичних та метеорологічних параметрів [1].

В науковій літературі можна зустріти статті, які використовують штучні нейронні мережі як інструмент для прогнозування в багатьох галузях науки, в тому числі у відновлювальній енергетиці. Огляд робіт використання штучних нейронних мереж у відновлювальній енергетиці наведено в [2]. З цієї роботи можна зробити висновки, що ШНМ можуть бути застосовані для моделювання та прогнозування в енергетичних інженерних системах. В [3] можна знайти огляд робіт щодо використання ШНМ при прогнозуванні ефективності роботи теплообмінних апаратів різних типів, в тому числі і повітряно-грунтового.

В цій роботі зроблено спробу використати техніку штучної нейронної мережі для прогнозування теплового стану повітряно-грунтового теплообмінника для потреб опалення та охолодження будинків рис.1.

В науковій літературі є багато робіт, що описують системи із використанням повітряно-грунтових теплообмінників, як ефективний спосіб зменшення затрат на опалення та кондиціонування [4-7]. Приблизно 15 % тепла на опалення будинків втрачається при вентиляції приміщень. Система вентиляції з використанням повітряно-грунтових теплообмінників дає можливість скоротити ці витрати. Повітряно-грунтовий теплообмінник являє собою систему трубопроводів, що закопані в ґрунті на певній глибині, по яким в будівлю постачається припливне повітря. Недоліком таких систем, при експлуатації в умовах України, є їх неефективність певний проміжок часу на протязі року. В роботі [8] описано схему керування таким повітряно-грунтовым теплообмінником, що основана на принципі Internet of Things (IoT). В роботі для визначення моменту коли потрібно вмикати таку систему, за допомогою теплофізичного моделювання, було отримано залежність, що прогнозує температуру повітря на виході із повітряно-грунтового теплообмінника в залежності від температури навколишнього середовища на основі CFD (Computational fluid dynamics) моделі. При валідації моделі було визначено, що частина експериментальних даних співпадає із розрахунком в межах похибок експериментальних вимірювань. Але деякі точки лежать вище розрахункової кривої, що автори пояснили тим, що розрахунок виконувався в стаціонарній постановці, і не може враховувати накопичення теплоти в ґрунті при різкій зміні температурного режиму. Тобто за умови, якщо середньодобова температура протягом попередніх діб перед добою вимірювання відрізнялась на декілька градусів порівняно із добою вимірювання, тоді тепла енергія накопичувалась в масиві ґрунту навколо труби повітряно-грунтового теплообмінника і спричиняла більш високе значення температури на виході із теплообмінника. Ця нестационарність параметрів процесу пов'язана із змінами погодних умов та не була врахована в моделі.



*Рис.1. Схематичне зображення роботи геотермальної вентиляційної системи.
а – літом, б – зимою.*

В [9] використано техніку ШНМ для прогнозування роботи повітряно-грунтових теплообмінників різної довжини. В якості вхідних параметрів ШНМ використовували температуру ґрунту на глибині залягання теплообмінника, температуру земної поверхні, температуру повітря, вологість, витрату теплоносія в теплообміннику та його довжину. Автори перевірили вплив кожного із параметрів на ефективність прогнозування та дійшли висновку, що найбільш впливовим параметром є температура повітря. Авторами розглянуто два типи моделей детерміністичну (основану на рівняннях збереження) та інтелектуальну (з використанням штучної нейронної мережі), точність моделей склала 5,3% та 2,6% відповідно.

Метою цієї роботи є спроба прогнозування теплового стану повітряно-грунтового теплообмінника, що розташований в м. Київ на основі штучної нейронної мережі, яку було навчено на експериментальних даних отриманих в теплофізичній лабораторії Інституту технічної теплофізики НАН України. У цій роботі використано просту нейронну мережу. В якості вхідних параметрів для ШНМ обрано температуру повітря на вході в теплообмінник та його вологість. В роботі були використані дані вимірювання експериментального стенду.

Штучні нейронні мережі

Моделювання реальних об'єктів навколишнього світу, як правило, супроводжується значними труднощами, які виникають ще на етапі постановки задачі [10]. Методологія, що застосована в даній роботі складається з чотирьох основних кроків: моніторинг, моделювання, валідація та оцінка.

Моніторинг було проведено на повномасштабному експериментальному стенді для дослідження теплофізичних процесів Інституту технічної теплофізики [11]. Одним із частин якого є вентиляція будівлі за допомогою повітряно-грунтового теплообмінника. Експериментальний стенд складався з основних частин: приймальний пристрій (розташований в захищеному від прямого сонячного випромінювання місці), теплообмінник ґрунт-повітря (труба ПВХ Ø 110) довжиною 43 м.п., що закопаний на глибині 2,5 м, кільцеподібної форми, вентилятор Вентс ТТ200 для прокачування повітря по теплообміннику, вимірювальної системи - термоанемометр Testo, напівпровідникові датчики ВМЕ280, що реєструють температуру, вологість та тиск атмосферного повітря з вторинним приладом на основі мікропроцесора .

Проводились вимірювання значень швидкості та температури, вологості та тиску повітря у приймальному пристрої та вихідному каналі теплообмінника (на ділянці гідродинамічної і теплової стабілізації потоку) термоанемометром Testo 405-V1 (абсолютні похибки вимірювання температури ± 0,5°C; швидкості ± 0,3 м/с) та напівпровідниковими датчиками ВМЕ280.

Моделювання, валідація та тестування експериментальних даних виконувались за допомогою програмного пакету MATLAB. А саме Neural Network Toolbox, що містить інструменти MATLAB для проєктування, впровадження, візуалізації та імітації нейронних мереж. У цій роботі MATLAB (R2016a) та модель Левенберга-Маркватта використовувалась в розрахунках. В моделі був присутній один прихований шар та 10 нейронів рис.2. Масив даних, що аналізувалися розбивався у пропорції 70%, 15%, 15% для навчання нейронної мережі, її валідації та тестування відповідно.

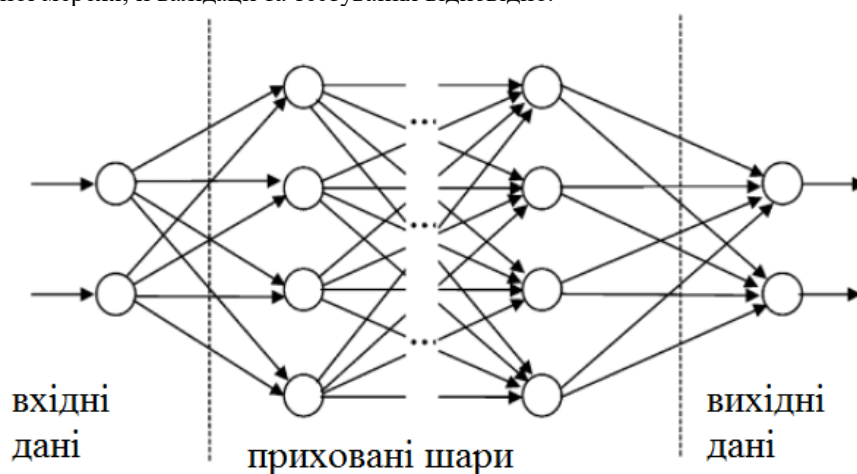


Рис.2. Модель штучної нейронної мережі.

При аналізі ефективності моделей на основі штучних нейронних мереж використовують наступні показники ефективності табл. 1.

Таблиця 1. Статистичні показники ефективності.

Показник ефективності	Performance indicator	Формула
Середньоквадратична помилка прогнозу	RMSE (root mean square error)	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (o_i - t_i)^2}$
Середня абсолютна помилка у відсотках	MAPE (mean absolute percentage error)	$\frac{1}{n} \sum_i \left \frac{o_i - t_i}{t_i} \right \times 100$
Середнє відхилення	MBE (mean bias error)	$\frac{1}{n} \sum_i (o_i - t_i)$
Середнє відхилення у відсотках	MBE%	$\frac{\sum_i (o_i - t_i)}{\sum_i t_i}$

Де t_i – експериментальні значенні, o_i – прогнозовані штучною нейронною мережею значення, N – кількість прогнозованих точок.

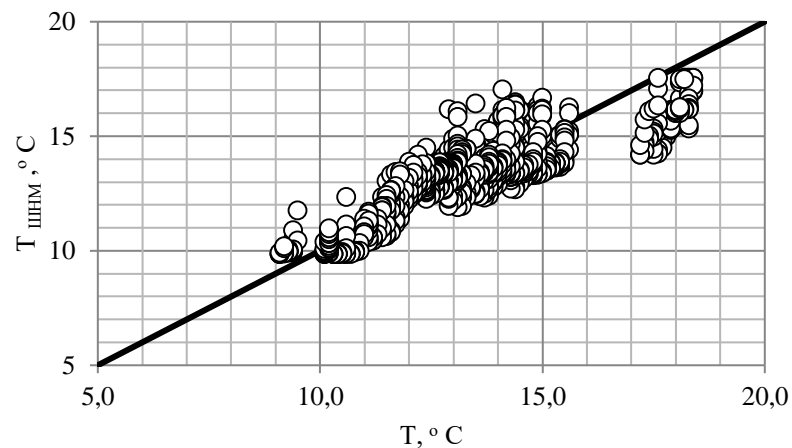
МВЕ є показником середнього відхилення прогнозованих значень від відповідних вимірних даних і може надати інформацію про довгострокову ефективність моделей. Позитивне значення МВЕ вказує на завищення прогнозованих даних і навпаки. RMSE надає інформацію про короткострокову ефективність і є мірою варіації прогнозованих значень навколо вимірюваних даних. Показник RMSE, використовується для аналізу відхилення між реальними та прогнозованими даними. Чим нижче значення RMSE тем кращім є прогноз даних. MAPE є мірою точності прогнозування для обраного методу прогнозування в статистиці.

В даній роботі за допомогою цих показників ефективності аналізувався масив даних вимірювань повітряно-грунтового теплообмінника між 11 вересня та 21 листопада 2018 року. Інтервал між даними складав 1 годину.

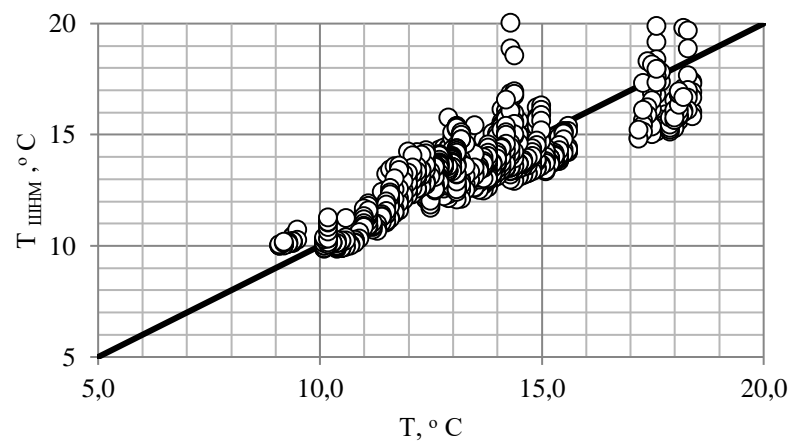
Результати та обговорення

При прогнозуванні методом ШНМ використано три варіанти із різними вхідними умовами. В першій моделі (ШНМ1) в якості вхідних даних використовувалась температура повітря на вході в повітряно-грунтовий теплообмінник. В другій (ШНМ2) в якості вхідних даних температура та вологість повітря на вході в повітряно-грунтовий теплообмінник. В третій (ШНМ3) до вхідних даних другої моделі додано також температуру повітря на виході із повітряно-грунтового теплообмінника за попередню годину, тобто на кроці часу $t-1$.

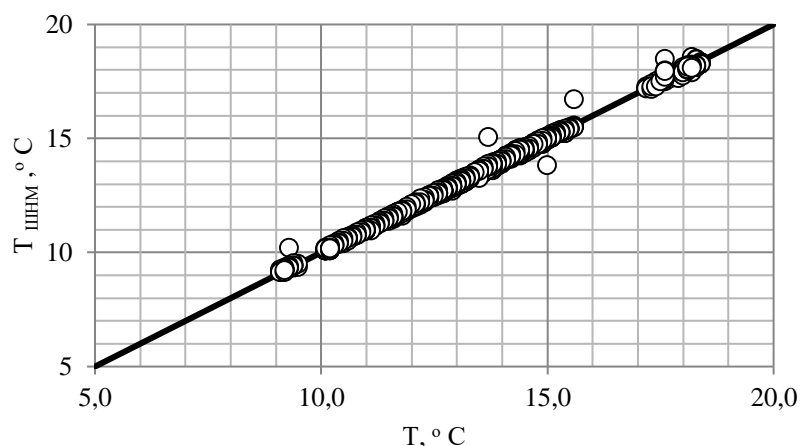
Як видно із рис. 3 та табл.2 найкраще зіставлення між фактичними та прогнозованими даними є у третьої моделі ШНМ3. Ця модель є найкращою при прогнозуванні температури на виході із повітряно-грунтового теплообмінника і може більш точно спрогнозувати момент коли використання повітряно-грунтового теплообмінника є недоцільним. Але наприклад при визначенні моменту коли необхідно вмикати повітряно-грунтовий теплообмінник данні по температурі на виході за попередню годину відсутні тому в такому випадку є необхідність застосування або CFD моделі, або іншої менш точної моделі ШНМ.



a



б



в

Рис. 3. Порівняння експериментальних та прогнозованих ШНМ температур на виході із повітряно-грунтового теплообмінника. а – ШНМ1, б – ШНМ2, в – ШНМ3.

Порівняння експериментальної, прогнозованої за допомогою CFD моделі та ШНМ температури повітря, наведено на рис. 4. В таблиці 2 наведено статистичні показники ефективності моделей.

Таблиця 2. Показники ефективності моделей

Назва	Вхідні данні	RMSE, °C	MAPE, %	MBE, °C	MBE, %
ШНМ1	$T_{вх}$	1,122	7,202	-0,046	-0,28340
ШНМ2	$T_{вх}, RH$	1,051	6,583	0,026	0,15828
ШНМ3	$T_{вх}, RH, T_{i-1}$	0,105	0,456	0,004	0,02420
CFD	$T_{вх}$	2,323	11,224	-1,521	-9,40276

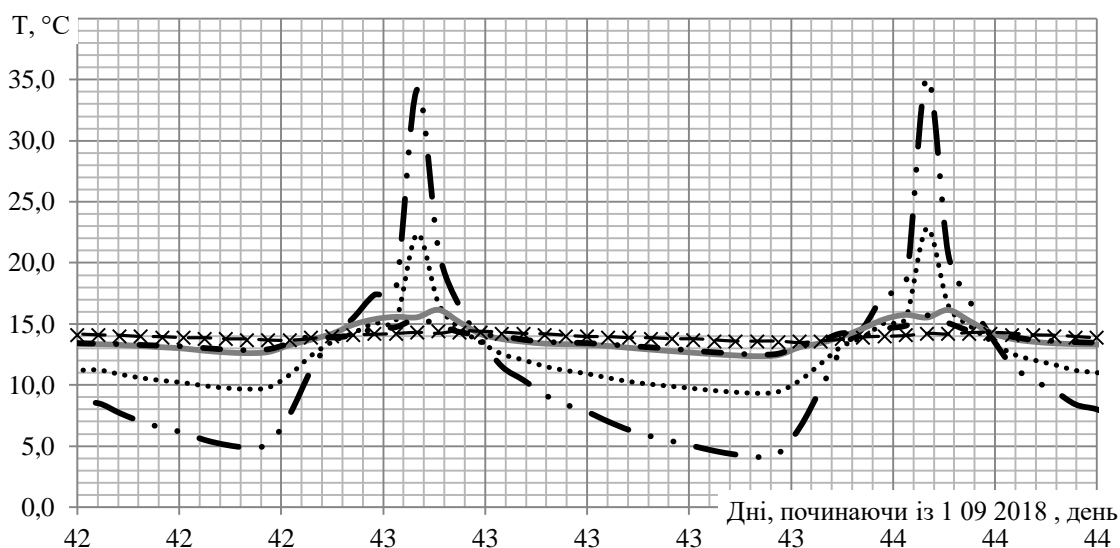


Рис. 4. Залежність температури повітря від часу. — — — — температура повітря на вході в повітряно-грунтовий теплообмінник, ××××××× - температура повітря на виході із повітряно-грунтового теплообмінника, — — — — прогнозування за допомогою CFD моделі [8], — — — — прогнозування моделлю ШНМ1, — — — — прогнозування моделлю ШНМ2, — — — — прогнозування моделлю ШНМ3.

В усіх моделях прогнозування відбувається із прийнятною точністю. Коефіцієнти RMSE для всього масиву даних варіюються від 0,105 до 2,323 °C для різних моделей. Максимальна середня абсолютна помилка у відсотках MAPE виявилась найбільшою при використанні формул отриманих із CFD моделі та складала 11,2%. Мінімальне середнє відхилення прогнозованих даних від експериментально виміряних виявилось в моделі ШНМ3 і складало 0,02%.

Ці результати доводять, що штучні нейронні мережі наряду із іншими моделями можна використовувати для цього типу прогнозування.

В подальшому прогнозування за допомогою ШНМ можна виконати із застосуванням масиву даних для більш довгого періоду часу, наприклад за рік або декілька років.

Висновки

В роботі запропоновано моделі штучної нейронної мережі для оцінки теплового стану повітряно-грунтового теплообмінника. Навчання та тестування запропонованих ШНМ є достатньо задовільними, щоб передбачити температуру із врахуванням впливу погодних умов.

Порівняння моделей ШНМ та результатів CFD моделювання із експериментально отриманими даними показало, що в усіх моделях прогнозування відбувається із прийнятною точністю. Штучні нейронні мережі наряду із CFD моделюванням можна використовувати для цього типу прогнозування.

Для налаштування роботи таких ШНМ потрібні експериментальні дані, що представляють опис реальної системи вентиляції із повітряно-грунтовым теплообмінником.

Список використаної літератури

1.Басок, Б.И., Новіцька М.П., Кравченко В.П. Прогнозування інтенсивності сонячного випромінювання на основі штучних нейронних мереж. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 2021, 43(2), с. 60-67. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2021.7>

2.Soteris A. Kalogirou, Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2001, Volume 5, Issue 4, Pages 373-401. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00006-5)

3.Ghalandari, M., Misagh Irandoost Shahrestani, A. Maleki, Mostafa Safdari Shadloo and M. El Haj Assad. Applications of intelligent methods in various types of heat exchangers: a review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2021, Springer Verlag, p.1-12.

4.M. Verma , V. Bansal ve K. Rana , Development of passive energy source as earth air pipe heat exchangers (eaphe) system - a review, *Journal of Thermal Engineering*, 2020, Vol. 6, No. 5, pp. 651-676. doi:10.18186/thermal.790173

5.Misra, R., Jakhar, S., Agrawal, K., Sharma, S., Jamuwa, D., Soni, M. and Agrawal, G. Field investigations to determine the thermal performance of earth air tunnel heat exchanger with dry and wet soil: Energy and exergetic analysis. *Energy and Buildings*, 2018, 171, pp.107-115. DOI:10.1016/j.enbuild.2018.04.026

6.Congedo, P., Lorusso, C., Baglivo, C., Milanese, M. and Raimondo, L. Experimental validation of horizontal air-ground heat exchangers (HAGHE) for ventilation systems. *Geothermics*, 2019, 80, pp.78-85. DOI: 10.1016/j.geothermics.2019.02.010

7.Филатов С.О., Володин В.И. Эффективность использования энергетических свай с теплоносителем воздух в системах вентиляции и теплоснабжения, *Пром. теплотехника*, 2013, т. 35, №3, с.44-50.

8.B. Basok, M. Novitska, I. Bozhko, V. Priemchenko and M. Tkachenko. Smart geothermal ventilation system, *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 226-229, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160244.

9.Rakesh Kumar, S.C. Kaushik, S.N. Garg, Heating and cooling potential of an earth-to-air heat exchanger using artificial neural network, *Renewable Energy*, Volume 31, Issue 8, 2006, Pages 1139-1155, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.06.007>.

10.М.А. Новотарський, Б.Б. Нестеренко. Штучні нейронні мережі: обчислення // *Праці Інституту математики НАН України*. – Т50. – Київ: Ін-т математики НАН України, 2004. – 408 с.

11.B. Basok, M. Novitska, S. Goncharuk, M. Moroz and A. Tymoshchenko, Experimental Passive House of the Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine, *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 108-111.doi: 10.1109/ESS.2019.8764182

Basok B.I., Cor. Mem. NAS of Ukraine, Dr. Eng. Sc., ORCID 0000-0002-8935-4248

Novitska M.P., SRF, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-2867-101X

Nedbailo O.M., SRF, Dr. Eng. Sc., ORCID 0000-0001-1416-9651

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

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

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

THERMAL STATE OF THE AIR - GROUND HEAT EXCHANGER PREDICTION BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

The work aim is to predict the thermal state of the air-ground heat exchanger based on an artificial neural network. Training, testing and validation of the proposed model were made on experimental data obtained in the

thermophysical laboratory of the Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine. A simple neural network is used in this work. The air temperature at the inlet to the heat exchanger, and its relative humidity are selected as input parameters for the neural network. The MATLAB (R2016a) and Levenberg-Markwatt model were used in this article's calculations. One hidden layer and 10 neurons were presented in the model. The array of analysed data was divided into ratios of 70%, 15%, 15% for neural network training, validation and testing, respectively. As a result, it is obtained that the forecasting takes place with acceptable accuracy in all models. The root mean square error for the whole data set for different models varies from 0.105 to 2.323°C. The maximum mean absolute percentage error was the largest for CFD model and was 11.2%. The minimum mean bias error of the predicted data from the experimentally measured ones was found in the model using temperature, humidity, and air temperature at the outlet of the air-ground heat exchanger for the previous hour and was 0.02%. The training and testing of the proposed models based on an artificial neural network are satisfactory enough to predict the temperature taking into account the influence of weather conditions. Artificial neural networks can be used to predict the thermal state of the air-ground heat exchanger. Data representing the description of a real system are required for forecasting the parameters based on the ANN.

Key words: artificial neuron network, air-ground heat exchanger, forecasting, simulation.

Reference

- 1.B. Basok, M. Novitska, and V. Kravchenko, "Forecasting the intensity of solar radiation based on artificial neural networks", *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, vol. 43, no. 2, pp. 60-67, Feb. 2021.
- 2.Soteris A. Kalogirou, "Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 5, Issue 4, Pages 373-401, 2001. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00006-5)
- 3.Ghalandari, M., Misagh Irandoost Shahrestani, A. Maleki, Mostafa Safdari Shadloo and M. El Haj Assad. "Applications of intelligent methods in various types of heat exchangers: a review." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 1-12, 2021.
- 4.Kumar Verma, M., Bansal, V., Bihari Rana "Development of passive energy source as earth air pipe heat exchangers (eaphe) system -a review." *Journal of Thermal Engineering*, Vol. 6, No. 5, pp. 651-676. 2020, doi:10.18186/thermal.790173
- 5.Misra, R., Jakhar, S., Agrawal, K., Sharma, S., Jamuwa, D., Soni, M. and Agrawal, G. "Field investigations to determine the thermal performance of earth air tunnel heat exchanger with dry and wet soil: Energy and exergetic analysis." *Energy and Buildings*, 171, pp.107-115, 2018. DOI:10.1016/j.enbuild.2018.04.026
- 6.Congedo, P., Lorusso, C., Baglivo, C., Milanese, M. and Raimondo, L. "Experimental validation of horizontal air-ground heat exchangers (HAGHE) for ventilation systems." *Geothermics*, 80, pp.78-85, 2019. DOI: 10.1016/j.geothermics.2019.02.010
- 7.Filatov, S. and Volodin, V. "Efficiency of using energy piles with air coolant in ventilation and heat supply systems." *Industrial heating technology*, 35 (3), pp.44-50, 2013.
- 8.B. Basok, M. Novitska, I. Bozhko, V. Priemchenko and M. Tkachenko, "Smart geothermal ventilation system," *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 226-229, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160244.
- 9.Rakesh Kumar, S.C. Kaushik, S.N. Garg "Heating and cooling potential of an earth-to-air heat exchanger using artificial neural network", *Renewable Energy*, Volume 31, Issue 8, Pages 1139-1155, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.06.007>.
- 10.Novotarskiy M.A., Nesterenko B.B. "Artificial neural networks: calculations" *Proceedings of the Institute of Mathematics of the NAS of Ukraine – V.50. – K: Institute of Mathematics of the NAS of Ukraine, 2004. – 408 p. (Ukr).*
- 11.B. Basok, M. Novitska, S. Goncharuk, M. Moroz and A. Tymoshchenko, "Experimental Passive House of the Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine," *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 108-111. doi: 10.1109/ESS.2019.8764182

Надійшла 01.08.2021
Received 01.08.2021

M. Reytskiy, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-1870-2222
M. Kovalenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-5602-2001
O. Tymoshchuk, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-1863-3095
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

SELECTION AND CALCULATION OF STEPPER MOTORS FOR CNC

Today, modern technologies tend to develop rapidly. The application of advanced inventions, principles, systems and approaches allows to simplify the production process, reduce the cost of manufacturing finished products, replace monotonous manual work with automated systems and devices. The basis of the power drive of such systems are electric motors: with permanent magnets, direct current, stepper, etc. When developing any electromechanical system, the task of choosing the type of drive motor, its parameters and characteristics. This article is devoted to the choice of such an electric motor for an electromechanical system for three-dimensional plastic printing. As a result of comparative analysis of parameters and characteristics of different types of motors, it is established that bipolar stepper motors are optimal for use in low-power and small-sized systems for three-dimensional printing. This is due to the simplicity of their design, reliability and low requirements for nominal and maximum torque.

Keywords: stepper motors, CNC, bipolar, unipolar step motor, single step, motor type.

Introduction

A stepper motor, also known as step motor or stepping motor, is a brushless DC electric motor that divides a full rotation into a number of equal steps. The motor's position can then be commanded to move and hold at one of these steps without any position sensor for feedback (an open-loop controller), as long as the motor is carefully sized to the application in respect to torque and speed.

Brushed DC motors rotate continuously when DC voltage is applied to their terminals. The stepper motor is known for its property of converting a train of input pulses (typically square waves) into a precisely defined increment in the shaft's rotational position. Each pulse rotates the shaft through a fixed angle.

Stepper motors effectively have multiple "toothed" electromagnets arranged as a stator around a central rotor, a gear-shaped piece of iron. The electromagnets are energized by an external driver circuit or a micro controller. To make the motor shaft turn, first, one electromagnet is given power, which magnetically attracts the gear's teeth. When the gear's teeth are aligned to the first electromagnet, they are slightly offset from the next electromagnet. This means that when the next electromagnet is turned on and the first is turned off, the gear rotates slightly to align with the next one. From there the process is repeated. Each of those rotations is called a "step", with an integer number of steps making a full rotation. In that way, the motor can be turned by a precise angle [1, p 48-50].

The circular arrangement of electromagnets is divided into groups, each group called a phase, and there is an equal number of electromagnets per group. The number of groups is chosen by the designer of the stepper motor. The electromagnets of each group are interleaved with the electromagnets of other groups to form a uniform pattern of arrangement. For example, if the stepper motor has two groups identified as A or B, and ten electromagnets in total, then the grouping pattern would be ABABABABAB.

Electromagnets within the same group are all energized together. Because of this, stepper motors with more phases typically have more wires (or leads) to control the motor.

When choosing a stepper motor for CNC, it is necessary to start with the planned scope of use of the machine and technical characteristics. Below are the selection criteria, classification of the most popular engines and examples of calculation.

The purpose of this work is to analyze the design of stepper motors used for computer-controlled equipment.

Figure 1 shows a general view of a unipolar stepper motor that is most commonly used for frequency-controlled drive today.

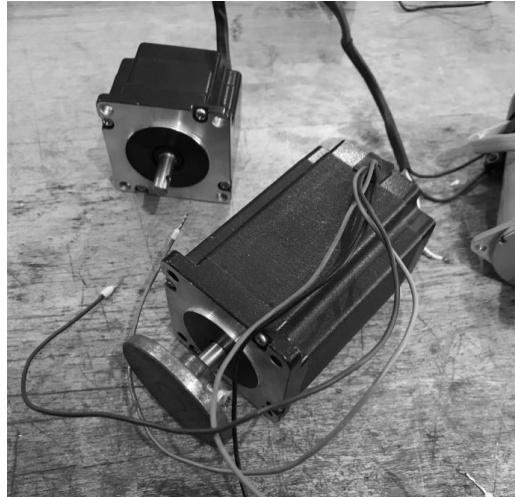


Figure 1. Stepper motors

How to choose a stepper motor for CNC: criteria.

Inductance. You should calculate the square root of the winding inductance and multiply it by 32. The value obtained should be compared with the voltage of the power supply for the driver. The differences between these numbers should not differ much. If the supply voltage is 30% higher, the motor will heat up and make noise. If less, the torque will drop too fast. High inductance will potentially provide the opportunity for more torque. However, this requires a driver with a high supply voltage.

Graph of torque versus speed. Allows you to determine whether the selected engine meets the conditions in the specification.

Geometric parameters. The length of the engine, the flange and the diameter of the shaft are important here.

You should also pay attention to the ohmic resistance of the phases, the rated current in the phase, the moment of inertia of the rotor, the maximum static synchronizing torque [2, p. 5-6].

Motor type that are common use for CNC drive.

An important criterion is the type of stepper motor for the CNC machine. Widespread bipolar, unipolar and three-phase models.

Each of them has its own features:

1. Bipolar motors.

Bipolar motors have a single winding per phase. The current in a winding needs to be reversed in order to reverse a magnetic pole, so the driving circuit must be more complicated, typically with an H-bridge arrangement (however there are several off-the-shelf driver chips available to make this a simple affair). There are two leads per phase, none are common.

A typical driving pattern for a two coil bipolar stepper motor would be: A+ B+ A- B-. I.e. drive coil A with positive current, then remove current from coil A; then drive coil B with positive current, then remove current from coil B; then drive coil A with negative current (flipping polarity by switching the wires e.g. with an H bridge), then remove current from coil A; then drive coil B with negative current (again flipping polarity same as coil A); the cycle is complete and begins anew.

Static friction effects using an H-bridge have been observed with certain drive topologies.

Dithering the stepper signal at a higher frequency than the motor can respond to will reduce this "static friction" effect.

A bipolar stepper motor with gear reduction mechanism used in a flatbed scanner [3, p. 7].

Because windings are better utilized, they are more powerful than a unipolar motor of the same weight. This is due to the physical space occupied by the windings. A unipolar motor has twice the amount of wire in the same space, but only half used at any point in time, hence is 50% efficient (or approximately 70% of the torque output available). Though a bipolar stepper motor is more complicated to drive, the abundance of driver chips means this is much less difficult to achieve.

An 8-lead stepper is like a unipolar stepper, but the leads are not joined to common internally to the motor. This kind of motor can be wired in several configurations:

–Unipolar.

–Bipolar with series windings. This gives higher inductance but lower current per winding.

–Bipolar with parallel windings. This requires higher current but can perform better as the winding inductance is reduced.

–Bipolar with a single winding per phase. This method will run the motor on only half the available windings, which will reduce the available low speed torque but require less current. Examples of such motor are shown in fig. 2.



Figure 2. Bipolar hybrid stepper motor

2. Unipolar motors.

A unipolar stepper motor has one winding with center tap per phase.

Each section of windings is switched on for each direction of magnetic field. Since in this arrangement a magnetic pole can be reversed without switching the direction of current, the commutation circuit can be made very simple (e.g., a single transistor) for each winding. Typically, given a phase, the center tap of each winding is made common: giving three leads per phase and six leads for a typical two-phase motor. Often, these two-phase commons are internally joined, so the motor has only five leads [4, p. 10].

A microcontroller or stepper motor controller can be used to activate the drive transistors in the right order, and this ease of operation makes unipolar motors popular with hobbyists; they are probably the cheapest way to get precise angular movements. For the experimenter, the windings can be identified by touching the terminal wires together in PM motors. If the terminals of a coil are connected, the shaft becomes harder to turn. One way to distinguish the center tap (common wire) from a coil-end wire is by measuring the resistance. Resistance between common wire and coil-end wire is always half of the resistance between coil-end wires. This is because there is twice the length of coil between the ends and only half from center (common wire) to the end. Quick ways to determine if the stepper motor is working is to short circuit every two pairs and try turning the shaft (fig. 3). Whenever a higher than normal resistance is felt, it indicates that the circuit to the particular winding is closed and that the phase is working.

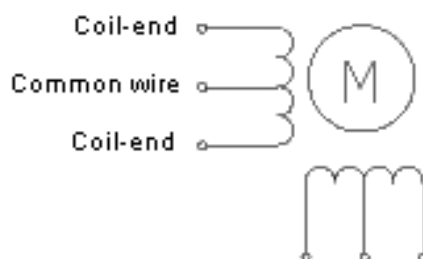


Figure 3. Unipolar stepper motor coils

3. Higher-phase count stepper motors

Multi-phase stepper motors with many phases tend to have much lower levels of vibration. While they are more expensive, they do have a higher power density and with the appropriate drive electronics are often better suited to the application. General four-phase stepper motors are shown in fig. 4



Figure 4. Four-phase stepper motors

Examples of calculations of stepper motors for CNC

Determine the forces acting in the system [5, p. 1-2].

It is necessary to determine the force of friction in the guides, which depends on the materials used.

For example, the coefficient of friction is 0.2, the weight of the part - 300 kgf, the weight of the table - 100 kgf, the required acceleration – 2m/s², the cutting force - 3,000 N.

To calculate the friction force, you need to multiply the coefficient of friction by the weight of the moving system.

For example:

$$0.2 * 9.8 * (100 + 300) = 785 \text{ N}$$

To calculate the force of inertia you need to multiply the mass of the table with the part by the required acceleration.

For example:

$$400 * 2 = 800 \text{ N}$$

To calculate the total force of resistance must add the forces of friction, inertia and cutting.

For example:

$$785 + 800 + 3000 = 4585 \text{ N}$$

Reference: the resistance force must be developed by the table drive on the ball screw nut.

Power calculation.

The formulas below are presented without taking into account the inertia of the shaft of the stepper motor and other rotating mechanisms.

Therefore, for greater accuracy, it is recommended to increase or decrease the acceleration requirements by 10%.

To calculate the power of the stepper motor should use the formula $F = ma$, where:

F is the force in Newtons needed to set the body in motion;

m - body weight in kg;

a- the required acceleration m/c².

To determine the mechanical power, it is necessary to multiply the force of resistance by speed.

There are calculators for automatic power calculation.

Calculation of the speed reduction.

Determined on the basis of the nominal speed of the servo and the maximum speed of the table. For example, the speed of movement is 1,000 mm / min, the pitch of the propeller is 10 mm. Then the speed of rotation of the screw of the screw should be (1 000/10) 100 revolutions per minute.

To calculate the reduction factor, take into account the nominal speed of the servo.

For example, they are equal to 5,000 rpm. Then the reduction will be equal to (5,000/100) 50.

Ratings and specifications.

Stepper motors' nameplates typically give only the winding current and occasionally the voltage and winding resistance. The rated voltage will produce the rated winding current at DC: but this is mostly a meaningless rating, as all modern drivers are current limiting and the drive voltages greatly exceed the motor rated voltage.

Datasheets from the manufacturer often indicate Inductance. Back-EMF is equally relevant, but seldom listed (it is straightforward to measure with an oscilloscope). These figures can be helpful for more in-depth

electronics design, when deviating from standard supply voltages, adapting third party driver electronics, or gaining insight when choosing between motor models with otherwise similar size, voltage, and torque specifications.

A stepper's low-speed torque will vary directly with current. How quickly the torque falls off at faster speeds depends on the winding inductance and the drive circuitry it is attached to, especially the driving voltage.

Steppers should be sized according to published torque curve, which is specified by the manufacturer at particular drive voltages or using their own drive circuitry. Dips in the torque curve suggest possible resonances, whose impact on the application should be understood by designers.

Step motors adapted to harsh environments are often referred to as IP65 rated.

The US National Electrical Manufacturers Association (NEMA) standardises various aspects of stepper motors. They are typically referred with NEMA DD, where DD is the diameter of the faceplate in inches multiplied by 10 (e.g., NEMA 17 has a diameter of 1.7 inches). There are further specifiers to describe stepper motors, and such details may be found in the ICS 16-2001 standard (section 4.3.1.1).

Classification of stepper motors for CNC.

Soviet step motors models.

In machine tools, inductor-type stepper motors made in the USSR are often used. We are talking about the DSHI-200-2 and DSHI-200-3 models. They have the following characteristics which shown in table 1.

Table 1 Characteristics of common soviet models stepper motors

Parameters	DSHI-200-2	DSHI-200-3
Power consumption	11.8 watts	16.7 watts
Step processing error	3%	3%
Maximum static moment	0.46 nt	0.84 nt
Maximum pickup purity	1,000 Hz	1,000 Hz
Supply voltage	30 in	30 in
Supply current in phase	1.5 A	1.5 A
Single step	1.8 hail	1.8 hail
Weight	0.54 kg	0.91 kg

When choosing, you should pay attention to the presence of an OS index. This is a special edition with military approval. Has a higher quality of workmanship than conventional models.

Chinese step motors models.

Examples of Chinese CNC stepper motors and their characteristics are presented below in table 2.

Table 2 Examples of Chinese CNC stepper motors

Parameter	Model		
	JKM Nema 17 42mm Hybrid Stepper Motor	JK42HS48-2504	JK42HS40-1704
Length mm	48	40	34
Phase supply current, A	2.5	1.7	1.33
Single step (angular movement), deg	1.8	1.8	1.8
Weight, kg	0.34	0.32	0.22

The main advantage of Chinese-made motors are their price and competitive parameters and characteristics. Other examples bipolar stepper motors for CNC are shown in table 3.

Table 3 Other examples bipolar stepper motors for CNC

Parameters	Model		
	86HS156-5004	57HS76-3004	42HS48-1704A
Phase supply current, A	5	3	1.7
Single step (angular movement), deg	1.8	1.8	1.8
Inductance, mH	6	3.5	2.8
Shaft diameter	14	8	5

These are the best and most promising options for using power stepper motors in low-power three-dimensional printing systems.

Conclusions.

Based on the results of the work performed, the following conclusions were made:

- 1) A literature search showed that there are three main types of electric motors used in electromechanical complexes for three-dimensional printing: synchronous with permanent magnets; direct current motors of classical design; stepper motors;
- 2) Comparative analysis of stepper motors showed that for inexpensive systems the most appropriate for use are bipolar stepper motors. This significantly reduces the cost of the control system and power part (driver);
- 3) DC motors provide the highest values of the overload capacity in terms of power and torque;
- 4) Synchronous motors with permanent magnets (BLDC) should be used as a powerful electric drive of industrial systems and in the case of high requirements for positioning accuracy.

References

1. Vaskovsky Y.M. Mathematical simulation of electric machines with permanent magnets. Kiev, National Technical University of Ukraine., 2017. 193 p.
2. Kovalenko M.A., Matsyuk D.S. Autonomous experimental stand for testing a unipolar stepper motor based on a microcontroller. *Electrical engineering and electric power*, - 2016, no. 2, pp. 31-40.
3. Kovalenko M.A., Chumak V.V., Tkachuk I.V. Mathematical simulation of a linear induction motor for color metals separation. *Energy: economics, technology, ecology*, 2019, no. 2, pp. 99-109.
4. Kovalenko M.A., Timoshchuk O.L., Samoilenko O.O. Development of an device for small power direct current motors testing with electromagnetic excitation. *Energy: economics, technology, ecology*, 2019, no. 3, pp. 87-93.
5. Chumak V.V., Kovalenko M.A., Tsyvinsky S.S., Ponomarev O.I., Tkachuk I.V. Mathematical modeling of a Synchronous generator with combined excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, no. 1/5(103), pp. 30-36.

М.О. Реуцький, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-1870-2222

М.А. Коваленко, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-5602-2001

О.Л. Тимошук, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-1863-3095

Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

ВИБІР ТА РОЗРАХУНОК КРОКОВИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ЧПУ

Сьогодні сучасні технології мають тенденцію до швидкого розвитку. Застосування передових винаходів, принципів, систем і підходів дозволяє спростити виробничий процес, знизити собівартість виготовлення готової продукції, замінити монотонну ручну роботу автоматизованими системами та пристроями. Основою силового приводу таких систем є електродвигуни: з постійними магнітами, постійного струму, крокові і т. д. При розробці будь-якої електромеханічної системи ставиться завдання вибору типу приводного двигуна, його параметрів і характеристик. Ця стаття присвячена вибору такого електродвигуна для електромеханічної системи для тривимірного друку на пластику. В результаті порівняльного аналізу параметрів і характеристик двигунів різних типів встановлено, що біполярні крокові двигуни є оптимальними для використання в малопотужних і малогабаритних системах тривимірного друку. Це пояснюється простотою їх конструкції, надійністю і низькими вимогами до номінального і максимального крутного моменту.

Ключові слова: крокові двигуни, ЧПУ, біполярний, однополюсний кроковий двигун, однокроковий, тип двигуна.

Надійшла 05.09.2021

Received 05.09.2021

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для подання рукопису до журналу автори повинні дотримуватись всіх встановлених вимог, які вказані нижче.

У разі невідповідності поданих матеріалів статті пунктам цих вимог, а також якщо вони не відповідають тематиці наукового журналу, редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання!

Обсяг статті

Загальний обсяг статті – від 6 до 10 сторінок формату А4. Сторінки повністю заповнені текстом. Схеми, рисунки, таблиці й формули повинні бути пронумеровані та розміщені в тексті після посилань на них. Матеріал має бути викладений стисло, без повторювань даних таблиць і рисунків у тексті. Неприпустимо використовувати елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонититули.

Стаття має бути ретельно перевірена авторами та відповідати всім пунктам вимог до оформлення!!!!

Текстовий редактор

Стаття набирається в текстовому редакторі **Microsoft Word (версії 2007 та вище)** і зберігається з розширенням *.doc або *.docx.

Обов'язково надсилається стаття, збережена у форматі *.pdf !!!

Загальне оформлення:

1) Мова. Статті приймаються до друку двома мовами: українською та англійською.

2) Параметри сторінки:

- Поля: зліва, справа, зверху, знизу – **2,5 см.**
- Вирівнювання основного тексту – **за шириною.**
- Перші рядки всіх абзаців – **з відступом 1,0 см!!!**
- Шрифт – **Times New Roman, кегль 10, міжрядковий інтервал 1.**
- Назва статті друкується великими (Caps Lock) напівжирними літерами (Ж) – **кегль 14.**
- Заголовки елементів основного тексту (Вступ, Мета та завдання тощо) виділяються напівжирним шрифтом (Ж).

3) Структура статті:

- **номер УДК** (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом кегль 10)
- **прізвища авторів** (приклад: **І.І. Петренко** (укр.), **I. Petrenko** (англ)) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання); **індекс ORCID – обов'язково;**
- **(Порядок оформлення наукових ступенів та вчених звань описано нижче в цьому ж документі в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і наукових ступенів»).**
- **повна назва організації** (навчального закладу, установи) – **вирівнювання за правим краєм;**
- **реферат обсягом від 1000 до 1100 знаків** повинен відображати короткий зміст статті, не повторювати назву, не містити загальних фраз та бути структурованим (мета дослідження, методика реалізації, результати дослідження, висновки). В англійській версії статті наводяться реферат **обсягом 1700-2000 знаків,**
- **ключові слова:** (6–8 слів), словосполучення «Ключові слова» – напівжирним + курсив.

Відповідно до постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003р. до друку приймаються наукові статті, що мають такі елементи:

Основний текст статті

Вступ (постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується зазначена стаття);

Мета та завдання (формулювання цілей статті, постановка завдання);

Матеріал і результати досліджень (виклад основного матеріалу дослідження, з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, з можливим поділом на частини з відповідними назвами);

Рисунки (діаграми, фото тощо) подаються у **чорно-білому зображенні** разом із текстом, після посилань на них. **Вимога до графічних матеріалів:** будь-яка ілюстрація повинна бути єдиним нерозривним графічним об'єктом. Рекомендується застосування растрових форматів з роздільною здатністю **не менше 300 dpi**. Рисунок має бути розташований у **центрі, без обтікання текстом**. Підписи до рисунків повинні містити нумерацію в порядку розміщення в тексті та пояснювальний підпис. Неприпустимо включати підписи до самого рисунка. **Рисунок не повинен займати всю площу аркуша!!!**

Крапки після назви структурних частин статті не ставити.

Графіки повинні містити підписи **усіх осей на самому рисунку**. Будь-який інший вигляд підпису розглядатись та виправлятись не буде!

Таблиці. При заповненні слід користуватись шрифтом 10 кеглю. Кожна таблиця повинна мати порядковий номер та назву і розташовуватись після посилання на неї у тексті статті. Якщо таблиця не вміщується на сторінці або виходить на іншу, слід використати позначення «**Продовження табл.**».

Формули повинні бути набрані за допомогою редактора формул **Math Type (версія 6.8 і вище)** або внутрішній редактор формул у Microsoft Word з **розмірами: звичайного символу – 11, великого індексу – 10, малого індексу – 9**. Кириличні та грецькі символи мають бути набрані прямим шрифтом, латинські літери – похилим. Виняток становлять символи операторів і стандартних функцій, які набираються прямим шрифтом. Нумерація формул, на які є посилання в тексті, – справа в дужках. Цілі частини від десяткових відокремлюються комою **Одиниці розмірності можна набирати окремо від формул, або у формулах, з обов'язковим використанням проміжку**.

Висновки:(навести основні висновки з дослідження та перспективи його подальшого розвитку в цьому напрямку).

Список використаної літератури наводиться в порядку посилань у тексті, відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках.

Список використаних літературних джерел подається **двічі**: мовою оригіналу відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) і англійською, відповідно до вимог IEEE style

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

Для надання відомостей про авторів англійською слід використовувати загальноприйнятну лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

Англійська анотація за обсягом рекомендується більшою за українську 1700-2000 знаків, оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:

(Анкети подаються **2 мовами (укр., англ.)**. Вказується повна назва організації або установки, вказати місце де працює автор. Якщо всі автори статті працюють або навчаються в одній установі, можна не вказувати місце роботи кожного автора окремо.)

Прізвище, ім'я, по-батькові автора (повністю, без скорочень)	
Вчений ступінь, вчене звання, посада	
Місце роботи кожного автора в називному відмінку (повна назва без скорочень)	
Поштова адреса місця роботи, з поштовим індексом	
Контактний телефон	
Електронна адреса	
ORCID	

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку статей.

Редакція журналу здійснює перевірку на плагіат за допомогою спеціального програмного забезпечення!!!

Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" та не пройшли перевірку на плагіат, будуть повернуті на доопрацювання.

Увага!!! На електронну адресу журналу надсилається:

- стаття версія в форматі *.doc або *.docx;
- стаття версія в форматі *.pdf (**ОБОВ'ЯЗКОВО**);
- анкета відомостей про авторів;
- акт експертизи про можливість оприлюднення матеріалів у засобах масової інформації.

Контакти:

- тел.: **+38(044) 204-82-37;**
- сайт: [http://energy.kpi.ua;](http://energy.kpi.ua)
- e-mail: kravkpi@ukr.net