

ISSN 1813-5420

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

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№1–2022

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

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія

Науковий журнал

№ 1 (67) - 2022

Виходить 4 рази на рік
Заснований у березні 2000 року

Міжгалузеві проблеми і системні дослідження в паливно-енергетичному
секторі

Енергетична ефективність та енергозбереження

Енергетичні системи та комплекси

Технології та обладнання в енергетиці

Моніторинг, діагностика та керування енергетичними процесами та
обладнанням

Київ

КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

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*), Рощан 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 № 4 від 27 червня 2022 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Комп'ютерна верстка А.Л. Кордан, О.О. Закладний
Відповідальний за випуск видання О.О. Закладний

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, 2022

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

POWER ENGINEERING

economics, technique, ecology

ENERHETYKA:

ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya

The Scientific Journal

№ 1 (67) – 2022

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Cross-branch problems and system research in the fuel and energy sector
Energy efficiency and energy saving
Energy systems and complexes
Technologies and equipment in energy
Monitoring, diagnosis and management of energy processes and equipment

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2022

Editor-in-chief Yu.I. Yakymenko

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

Deputy O.O. Zakladnyi

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

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

Technical secretary N.O. Kravchuk

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

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

The Journal was registered approved by order of MES of Ukraine № 1188 of September 24, 2020 as an occupational edition. The Journal is included in databases «Scientific Periodicals of Ukraine», Google Scholar, Index Copernicus WorldCat, BASE, OpenAIRE, Djerelo, URAN, 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 № 4 on June 27, 2022).

Proofreading V.G. Smoliar. Desktop publishing A.P. Kordan, O.O. Zakladnyi.
Responsible for the publication O.O. Zakladnyi.

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 "Politehnika", Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Publ.hous 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, 2022

ЗМІСТ

МІЖГАЛУЗЕВІ ПРОБЛЕМИ І СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНОМУ СЕКТОРІ

С.В. Бойченко, І.О. Шкільнюк, О.Б. Целіщев, І.В. Матвіїв, О.В. Тарасюк, Артур Яворські, Павел Вос. Сучасні технології генерування та акумуляції водню. Аналітичний огляд теоретичного та практичного досвіду.....7

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Г.Б. Варламов, К.О. Романова, Чжан Вейцзе, Цзян Цзяньго, У Цзунянь. Методологічні основи комплексної оцінки ефективності виробництва енергії за енерго-екологічними показниками.18

В.І. Дешко, М.М. Шовкалюк, Ю.С. Кузьміна, Оцінювання енергетичних показників для нових житлових будівель в Україні з урахуванням соціальних аспектів.....29

Д.Г. Дерев`янюк, С.В. Зайченко, Н.Г. Беспала, Методи оцінювання доцільності впровадження заходів з підвищення енергетичної ефективності будівель комунальної сфери.....38

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

В.П. Калінчик, О.В. Мейта, В.В. Калінчик, Ю.М. Чуняк Адаптивні моделі прогнозування електричного навантаження виробничих споживачів.....46

В.Ю. Лободзинський, М.П. Бурик, О.В. Петрученко, О.О. Ілліна. Вплив системи Smart Grid на національну енергетичну мережу.....57

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

В.Ю. Ліщишин, М.М. Вознюк, М.В. Воробйов, Є.М. Письменний, О.І. Руденко. Контактний термічний опір між оребренням та трубою-основою для композиційних поверхонь теплообміну.....65

К.О. Братковська, Ю.Б. Ліуш, О.А. Шрам. Дослідження режимних характеристик конденсатора енергоблока АЕС.....72

В.В. Філонов, Ю.С. Філонова, О.В. Коваленко, В.А. Кондратюк. Опис радіаційного модулю мультифізичного коду для аналізу деградації геометрії вигородки.....81

І.І. Пуховий, А.М. Постоленко, А.Л. Петречук. Про конструктивні особливості пристроїв для отримання льоду в бурульках та їх вплив на продуктивність.....90

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

О.О. Закладний. Визначення аварійних режимів електродвигунів засобами сучасних систем діагностування їх стану96

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ.....106

CONTENTS

CROSS-BRANCH PROBLEMS AND SYSTEM RESEARCH IN THE FUEL AND ENERGY SECTOR

S.Boichenko, I. Shkilniuk, O. Tselishchev, I. Matviyiv, O. Tarasiuk, Artur. Jaworski, Pawel Wos. Modern technologies of hydrogen generation and accumulation. Analytic overview of theoretical and practical experience7

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

G. Varlamov, K. Romanova, Z. Weijie, J. Jianguo, W. Zongyan. Methodological basis for a comprehensive assessment of the efficiency of energy production by energy-environmental indicators.....18

V. Deshko, M. Shovkaliuk, Y. Kuzmyna, Valuation of energy indicators for new residential buildings in Ukraine taking into account social aspects.....29

D. Derevinko, S. Zaichenko, N. Bepala. Methods of the feasibility evaluation of energy efficiency measures in communal buildings.38

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

V P. Kalinchyk, O.Meita, V.V. Kalinchyk, Yu.M. Chunyak. Adaptive models of electric load forecasting of production consumers.....46

V. Lobodzinskiy, M. Buryk, O. Petruchenko, O. Illina. Impact of the Smart Grid system on the national energy network.....57

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

V. Lishchyshyn, M. Vozniuk, M. Vorobyov, E. Pismennyi, A. Rudenko. Contact thermal resistance between the fin and pipe base for composite heat transfer surfaces.....65

K. Bratkovska, Yu. Liush, A. Shram K.. Study of the condenser's operating characteristics of the NPP unit.....72

V. Filonov, Y. Filonova, O. Kovalenko, V. Kondratyuk. Description of the escriptio of the radiation module of multiphysical code for analysis of the baffle geometry degradation.....81

I. Pukhovoy, A. Postolenko, A. Petrechuk. About constructive features of devises for producing ice in icicils and their influence on productivity.....90

MONITORING, DIAGNOSIS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

O. Zakladnyi. Determination of emergency regimes of electric motors by means of modern systems of diagnosing their condition96

REQUIREMENTS FOR THE DESIGN OF ARTICLES.....106

МІЖГАЛУЗЕВІ ПРОБЛЕМИ І СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ПАЛИВНО- ЕНЕРГЕТИЧНОМУ СЕКТОРІ CROSS-BRANCH PROBLEMS AND SYSTEM RESEARCH IN THE FUEL AND ENERGY SECTOR

УДК: 661.96:66.074.36(082)

DOI

С.Ю. Бойченко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-2489-4980

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

І.О. Шкільнюк, д-р техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-8808-3570

Національний авіаційний університет

О.Б. Целіщев, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-8808-3570

Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля

І.В. Матвійв, ORCID 0000-0003-3989-2651

Національний авіаційний університет

О.В. Тарасюк, ORCID 0000-0001-6697-1078

Інститут циркулярної та водневої економіки

Артур Яворскі, ORCID 0000-0001-6697-1078

Павел Вос, ORCID 0000-0003-2730-3258

Ряшівська політехніка ім. Ігнатія Лукасевича, Ряшев, Польща

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ГЕНЕРУВАННЯ ТА АКУМУЛЯЦІЇ ВОДНЮ. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНОГО ТА ПРАКТИЧНОГО ДОСВІДУ

У статті розглянуті питання конкурентоспроможності альтернативних палив і технологій у швидко зростаючому сегменті легкового автотранспорту та авіації, який в глобальному масштабі споживає більше 70% палива, що витрачається на пасажирські перевезення і близько 45% в цілому по транспорту. Поява нових технологій в персональному автотранспорті (електромобілі, водневі авто з паливним елементом, біопалива, природний газ і ін.) змушує по-новому поглянути на перспективи розвитку цього сегмента. На підставі такого підходу проведена оцінка способів виробництва водню. Порівняно виробництво водню паровою конверсією метану, електролізом води та біохімічним виробництвом.

Водень - не джерело енергії, це засіб перетворення інших джерел енергії в хімічну енергію в формі накопичувального чистого водню, яку можна використовувати згодом при його окисненні. По суті, резервуар або інший накопичувач водню в технічному сенсі подібний до акумуляторної батареї або бензобаку, і тому порівнювати треба не тільки коефіцієнт корисної дії, а й інші параметри. Водень потрібно виробити і перетворити для отримання кінцевої енергії, і те й інше вимагає енергії.

Переваги водню як універсального енергоносія визначається екологічною чистотою, гнучкістю і ефективністю процесів перетворення енергії з його участю. Технології різномасштабного виробництва водню досить добре освоєні і мають практично необмежену сировинну базу.

Важливість технологій отримання водню визначається високою теплою згорання водню та можливостями зниження викиду парникових газів, оскільки продуктом згорання є звичайна вода.

У статті наведений порівняльний аналіз способів зберігання водню в рідкому та газоподібному станах, вуглецевих структурах і гідридах металів

Ключові слова: водень, моторне паливо, воднева енергетика, потенціал водню, паливний елемент, виробництво водню, способи зберігання водню, водневий двигун.

Вступ. Транспорт є найважливішим елементом світової економічної системи. В основі розвитку транспортної системи лежить принцип мобільності – людей, товарів, інформації, ідей. Мобільність – одна з найбільш фундаментальних і важливих характеристик економічної або соціальної діяльності людства,

оскільки вона задовольняє основну потребу суспільства в переміщенні себе та інших об'єктів. Ефективність мобільності визначається концентраціями переміщення потоків, швидкостями їх проходження по каналах зв'язку, надійністю зв'язків і зручностями переміщення в ланцюзі від джерела до споживача. Практична реалізація мобільності здійснюється через системи транспортних зв'язків, що включають технічні засоби і відповідні об'єкти транспортної інфраструктури. Низька ефективність транспортних систем перешкоджає розвитку економічних і соціальних систем через низку факторів, зокрема використовувані технології транспортних засобів. Таким чином, ефективна транспортна система забезпечує функціонування транспортної інфраструктури та стає важливим каталізатором економічного розвитку країни та суспільства.

З іншого боку, на розвиток транспортної галузі впливають дві глобальні проблеми: світовий дефіцит нафти та забруднення навколишнього середовища викидами шкідливих речовин з відпрацьованими газами (ВГ) різних видів техніки. Суттєво вирішити ці проблеми можна використанням альтернативних моторних палив. Раціональний вибір альтернативних палив дозволяє вирішити відразу два завдання: підвищити екологічну безпеку транспортних засобів та зменшити використання нафти на потреби транспорту.

Одним з основних світових трендів "палива майбутнього" стала так звана декарбонізація транспортних систем. Декарбонізація – це поступова відмова від традиційних джерел енергії (випонних вуглецевих сполучень, нафти, вугілля, природного газу, торфу та інших) і все більш активний перехід на відновлювальні енергоносії, наприклад, водень.

Відмова світу від випонних джерел енергії, перехід на відновлювальні типи джерела енергії, боротьба з шкідливими викидами в атмосферу, зменшення залежності від вуглеводнів визначають водень і паливні елементи на його базі як ключові фактори подальшого розвитку енергетики, транспорту і інших галузей промисловості.

Виходячи з привабливих умов для генерації відновлюваної енергетики в Україні, водень може бути каталізатором економічного зростання і підвищення енергетичної безпеки країни, забезпечуючи скорочення викидів вихлопних газів. Використання «зеленого» водню в якості палива для транспортної галузі відповідає цілям безвуглецевого розвитку, заявленим у міжнародних зобов'язаннях багатьох держав, в тому числі й України, та відповідає цілям Організації об'єднаних Націй (ООН) щодо сталого розвитку. Головним завданням для їх реалізації є знання реального потенціалу країни щодо виробництва та застосування водню.

У 2018 році Україна прийняла «Національну транспортну стратегію України» до 2030 року. Одним із пріоритетів, визначених цією Транспортною стратегією, є зменшення негативного впливу транспорту на навколишнє середовище. Також цілями Транспортної стратегії є підвищення якості та безпеки транспортних послуг, а також покращення транспортної інфраструктури за європейськими стандартами. Відповідно до Національної транспортної стратегії очікується, що до 2030 року рівень використання альтернативних видів палива (біоетанолу, біодизеля) та електроенергії зросте до 50%. «Національна транспортна стратегія», «Стратегія розвитку енергетики» та «Дорожня карта широкого впровадження водневої енергетики в Україні» є міцною стратегічною основою політики, спрямованої на збільшення частки відновлюваних джерел енергії в транспорті на основі біопалива, електроенергії та водню. Проект Закону України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо розвитку виробництва рідкого біопалива», який наразі перебуває у політичній дискусії, внесе зміни до законів та законодавчих актів щодо обов'язкових квот на біокомпонентну частку в обсязі реалізованого моторного палива, включаючи відповідальність за недотримання квот, а також за критерії сталого розвитку. Також буде введена термінологія в області рідкого біопалива, що відповідає RED II (переглянутій Директиві ЄС з відновлювальної енергетики).

Мета роботи і завдання дослідження.

Метою роботи є дослідження методів виробництва та зберігання водню.

Об'єкт дослідження – процес генерування та акумуляції водню на транспортних засобах.

Предмет дослідження – методологічні основи використання водню як моторного палива в засобах технологічного транспорту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Встановлено, що водень перетворюється в електроенергію в електрохімічних генераторах (паливних елементах – ПЕ). ПЕ більш ефективні, ніж звичайні двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ), і не утворюють викиди вихідних газів, так як вони тільки виділяють водяний пар. Найбільш поширеним типом паливного елемента для застосування в транспортних засобах є паливний елемент з полімерним електролітом. Електроенергія надходить на електродвигуни, які приводять в рух автомобіль. В цьому відношенні водневий автомобіль з ПЕ, як і електромобіль, використовують в якості кінцевого енергоносія електроенергію. Однак, в електромобілі ця електроенергія виробляється за межами автомобіля і зберігається в електроакумуляторі, а в автомобілі з ПЕ вона генерується безпосередньо на борту автомобіля з водню, який проводиться за його межами по одному з відомих методів і зберігається всередині автомобіля в спеціальних ємностях в стисненому або зрідженому

виді. Так як і електромобіль автомобіль з ПЕ в міських умовах є практично чистим паливом, які не мають викидів в атмосферу.

Використання ПЕ було винайдене більше 160 років тому (1837 г.). Ця технологія старша двигуна внутрішнього згорання або електричної батареї. Однак активний розвиток технологій використання ПЕ почалося після Другої світової війни в зв'язку з розвитком космічної техніки.

Водень є майже ідеальним електропаливом і довгий час вважався основним енергоносієм майбутніх енергетичних систем (див., наприклад, [18]). Хоча водень має найвищу гравіметричну щільність енергії серед всіх видів палива, однак він має дуже низьку об'ємну щільність енергії і високий коефіцієнт дифузії, що ускладнює його зберігання [19].

На даний момент, на ринку є всього кілька прототипів автомобілів з ПЕ (Honda FCX Clarity, Hyundai Tucson Fuel Cell, Toyota Mirai, Hyundai Nexa). Багато компаній мають просунуті концепції і прототипи, які можуть з'явитися у продажу в найближчі роки.

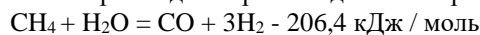
В автомобілі з ПЕ найбільш проблемними чинниками залишаються:

- 1) вартість водню і пов'язана з ним інфраструктура виробництва, доставки і зберігання;
- 2) ступінь досконалості ПЕ як енергетичної машини;
- 3) зберігання водню на борту автомобіля.

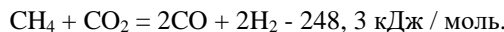
Основна частина. Водень практично не зустрічається в природі в чистій формі і повинен вилучатись з інших з'єднань за допомогою різних хімічних методів. Важливість технологій визначається високою теплою згорання водню та можливостями зниження викиду парникових газів, оскільки продуктом згорання є звичайна вода. Стосовно технології одержання водню необхідно відзначити, що він є вторинним енергоносієм і в природі зустрічається тільки у виді різних сполук.

Парова конверсія метану. У процесі конверсії метану водяною парою, діоксидом вуглецю, киснем та оксиду вуглецю водяною парою протікають наступні каталітичні реакції. Розглянемо процес отримання водню конверсією природного газу (метану).

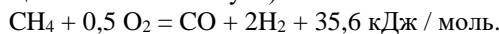
Отримання водню здійснюється в три стадії. Перша стадія - конверсія метану в трубчастій печі:



або



Друга стадія пов'язана з доконверсією залишкового метану першої стадії киснем повітря і введенням в газову суміш азоту, якщо водень використовується для синтезу аміаку. (Якщо виходить чистий водень, другої стадії принципово може і не бути).



І, нарешті, третя стадія - конверсія оксиду вуглецю водяною парою:

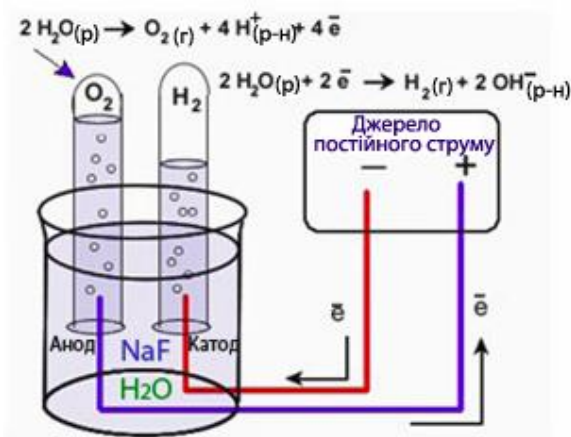
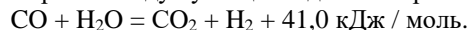


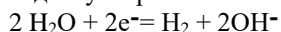
Рисунок 1 - Схема електролізу води

Для всіх зазначених стадій потрібно водяна пара, а для першої стадії - багато тепла, тому процес в енерго-технологічному плані проводиться таким чином, щоб трубчасті печі зовні обігрівалися спалюється в печах метаном, а залишкове тепло димових використовувалося для отримання водяної пари.

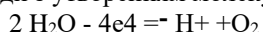
Електроліз води. Як відомо, при проходженні електричного струму через розчини електролітів на електродах відбувається розряд іонів і протікають пов'язані з цим хімічні реакції. Протікання процесу

електролізу визначається переносом електричного струму в рідині та умовами розряду присутніх у розчині іонів електроліту (рис.1).[13]

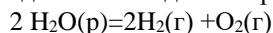
На катоді відбувається відновлення води з утворенням іонів OH^- з молекул H_2 :



На аноді здійснюється окиснення води з утворенням молекул O_2 і іонів H^+ :



Дія електричного струму призводить до окисно-відновної реакції:



Електроліз води один з найбільш відомих і добре досліджених методів отримання водню. Він забезпечує одержання чистого продукту (99,6-99,9% H_2) [13].

Економіка процесу в основному залежить від вартості електроенергії. У виробничих витратах на отримання водню вартість електричної енергії становить приблизно 85%.

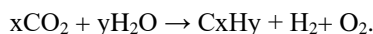
Цей метод отримав застосування в ряді країн, що володіють значними ресурсами гідроенергії. Найбільш великі електрохімічні комплекси перебувають у Канаді, Індії, Єгипті, Норвегії, але створені і працюють більше тисячі дрібних установок у багатьох країнах. Важливий цей метод і тому, що він є найбільш універсальним щодо використання первинних джерел енергії. У зв'язку з розвитком атомної енергетики можливий новий розквіт електролізу води на базі дешевої енергії атомних електростанцій.

Електрохімічний метод отримання водню з води володіє такими позитивними якостями [13]:

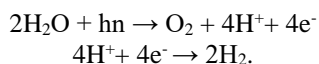
- 1) висока чистота одержуваного водню - до 99,9%;
- 2) простота технологічного процесу, його безперервність, можливість найбільш повної автоматизації, відсутність рухомих частин в електролітичному середовищі;
- 3) можливість отримання найцінніших побічних продуктів - важкої води та кисню;
- 4) загально доступна сировина - вода;
- 5) гнучкість процесу і можливість отримання водню безпосередньо під тиском;
- 6) фізичний поділ водню і кисню в самому процесі електролізу.

Біохімічне виробництво водню. Багатообіцяючою і перспективною альтернативою промисловим процесам отримання водню є розкладання води з використанням сонячної енергії в процесах фотосинтезу і біоконверсії [12].

Протягом фотосинтезу зелені рослини і морські водорості (мікроскопічні одноклітинні рослини) перетворюють вуглекислий газ, воду і сонячне світло (зелене світло з довжиною хвилі 500 нм) у вуглеводи, воду і кисень.



Сонячне світло поглинається світлочутливим пігментом, наприклад білком хлорофілу. За допомогою активних центрів цього білка енергія передається електронам, джерелом яких служить деяка донорна речовина. Потім, як і при фотосинтезі, електрони через проміжний зв'язок ферродоксін доставляються до іонів водню, відновлення яких до молекулярного стану відбувається під дією каталізатора біологічної природи:



Дослідження в галузі біологічних методів отримання водню носять поки пошуковий характер. Вчені Каліфорнійського університету в Берклі 1999 р. виявили, що якщо водоростям не вистачає кисню і сірки, то процеси фотосинтезу у них різко слабшають, і починається бурхливе вироблення водню [12].

Водень може виробляти група зелених водоростей, наприклад *Chlamydomonas reinhardtii*. Водорості можуть виробляти водень із морської води або каналізаційних стоків.

Фахівці, проводячи експерименти з синьо-зеленими водоростями, прийшли до висновку, що для забезпечення теплових потреб міста з населенням 1 млн людей і витратою 10 кВт на душу населення потрібна плантація площею 17,5 км². Така оцінка надмірно оптимістична, хоча майбутнє біохімічного виробництва водню обіцяє бути блискучим.

При вирощуванні морських водоростей як «енергетичного врожаю» необхідно підтримувати високу температуру. Непотрібне тепло від градирень ядерного реактора на 100 МВт підтримає 4047 гектар водойми з морськими водоростями. Ця водойма призведе до 4,5 кг органічної речовини на квадратний метр. Поставка додаткового вуглекислого газу збільшує норму на 50%, 22680 кг морських водоростей можуть бути розумно перетворені в 10 кВт·год метану [12].

Фотохімічні процеси, засновані на використанні енергії сонячного світла, дають найбільш довговічне рішення проблеми постачання нашої планети вторинною формою енергії в найбільш екологічно прийнятному вигляді і практично без обмежень за масштабом, і тому заслуговують найпильнішої уваги.

Силові установки на основі водневих паливних елементів. В основі принципу роботи паливних елементів є фізико-хімічні реакції. По суті, це ті ж свинцеві акумуляторні батареї, коефіцієнт корисної дії паливного елемента становить близько 45% (іноді більше).

У корпус воднево-кисневого паливного елемента (рис.2) поміщена мембрана (проводить тільки протони), що розділяє камеру з анодом і камеру з катодом. У камеру з анодом надходить водень, а в камеру катода - кисень. Кожен електрод заздалегідь покривають шаром каталізатора, в ролі якого нерідко виступає платина. При його впливі молекулярний водень починає втрачати електрони. У цей же час протони проходять через мембрану до катода і під впливом того ж каталізатора з'єднуються з електронами, що надходять зовні. У результаті реакції утворюється вода, а електрони з камери анода переміщуються в електроланцюг, з'єднаний з мотором. Простіше кажучи, ми отримуємо електричний струм, що і живить двигун.

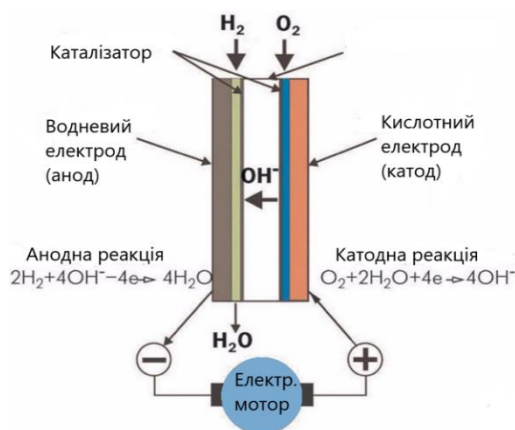


Рисунок 2 - Схема воднево-кисневого паливного елемента

Воднева система енергозабезпечення. Воднева система енергозабезпечення включає в себе поновлювані джерела енергії, наприклад сонячну батарею, що буде служити тільки для запуску електролізера. Генератор водню, то є електролізер генерує водень. «Далі водень надходить в ємність для зберігання водню, в нашому випадку металогідридний накопичувач водню. Наступним елементом даної системи є паливний елементи, що перетворюють хімічну енергію окислення водню в електричну. Паливні елементи виробляють електричну енергію до тих пір, поки на анод подається водень, а на катод – повітря. Енергоємність такої системи забезпечується обсягом запасені водню, а потужність – кількістю паливних елементів в батареї».

Зберігання водню. При великомасштабному використанні водню потрібні безпечні і ефективні системи його централізованого зберігання [14]. Стиснення і зрідження є основними способами ефективного зберігання водню, але стиснення водню споживає 15,5% внутрішньої енергії водню та зрідження – до 45% [19]. Використання водню в двигуні внутрішнього згорання або його окислення в паливному елементі ("холодне горіння") у даний час дає ефективність від 40% (горіння) до 55% (паливний елемент).

Водень може зберігатися в рідкому вигляді при його охолодженні до мінус 253 °С. Для охолодження водню до цієї температури потрібно затратити близько однієї третини енергії, що міститься в ньому (11 кВт·год / кг H₂), а для створення криогенних пристроїв необхідні спеціальні матеріали і технології. Наприклад, у своїй роботі Дж.І. Аллен [20.] демонструє, що буде потрібна велика реструктуризація та редизайн аеропортів. За його оцінками, для установки криогенного виробничо-складського приміщення зрідженого водню в типовому аеропорту приблизно у 700 рейсів на день буде потрібно побудувати об'єкт, що займатиме приблизно 70 акрів землі, і потребуватиме електропостачання близько 3,3 ГВт. Оскільки більшість електричної енергії в усьому світі виробляється вугільними електростанціями, що виділяють вуглець [21, 22], використання зрідженого водню повинно супроводжуватися масово прискореним використанням поновлюваних джерел енергії або переходом на більшу кількість ядерної енергії з усіма її потенційними недоліками [23]. Це особливо важливо розуміти, враховуючи, що електроенергія, вироблена з відновлюваних джерел енергії або ядерної енергії, навряд чи буде дешевою [24.].

Водень може також бути в запасі у вигляді газу. Цей процес вимагає для стиснення водню менше енергії, ніж для його зрідження. Водень в газовій фазі може бути накопичений в підземних порожнинах, родовищах природного газу. Так, при випробуваннях для зберігання використовувалися підземні ємності, водень в них утримувався під тиском 90 атм.

Відповідно до класифікації департаменту енергетики США, методи зберігання водневого палива можна розділити на 2 групи.

Перша група включає фізичні методи, які використовують фізичні процеси (головним чином, компресування або зрідження) для переведення газоподібного водню в компактний стан. Водень, який зберігається за допомогою фізичних методів, складається з молекул H₂, слабо взаємодіючих з середовищем зберігання. На сьогодні реалізовані наступні фізичні методи зберігання водню [15]:

Стиснений газоподібний водень:

- газові балони;
- стаціонарні масивні системи зберігання, включаючи підземні резервуари;
- зберігання в трубопроводах;
- скляні мікросфери.

Рідкий водень: стаціонарні і транспортні криогенні контейнери.

Друга група включає хімічні методи, в яких зберігання водню забезпечується фізичними або хімічними процесами його взаємодії з деякими матеріалами. Дані методи характеризуються сильною взаємодією молекулярного або атомарного водню з матеріалом середовища зберігання і є наступними: [15]

Адсорбційний водень:

- цеоліти і споріднені сполуки;
- активоване вугілля;
- вуглеводневі наноматеріали.

Абсорбція в обсязі матеріалу (металогідриди).

Хімічна взаємодія:

- алонати;
- фулерени і органічні гідриди;
- аміак;
- губчасте залізо;
- водореагуючі сплави на основі алюмінію і кремнію.

Порівняльна оцінка способів зберігання водню і їх переваги і недоліки, а також сучасні вимоги до них і показники різних методів зберігання водню в порівнянні з показниками зберігання еталонних вуглеводневих горючих представлені в табл. 1

Таблиця 1 - Оцінка основних методів зберігання водню [14, 15]

Спосіб зберігання	Переваги	Недоліки
Газоподібний водень (T = 300 K, p ≤ 20 МПа)	Технологія добре відпрацьована і доступна, щодо невеликої вартості	Низький об'ємний вміст (близько 7,7 кг / м ³ при тиску 10 МПа). Густина збереженої енергії при високих тисках (до 70 МПа) у порівнянні з рідким воднем, але технологія зберігання при таких високих тисках до кінця не відпрацьована
Рідкий водень (T = 20,4 K)	Технологія доступна, висока густина (71 кг / м ³)	Високі енерговитрати на скраплення, втрати водню, на випаровування, необхідність супер ізоляції, як наслідок, висока вартість
Вуглецеві наноструктури: нанотрубки, фулерени	Технології в перспективі можуть забезпечити високу густину зберігання водню (30-100 кг / м ³)	Виробництво вуглецевих структур недостатньо відпрацьовано, результати по утриманню водню невідтворені
Гідриди металів, сплавів, інтерметалевих з'єднань і композитів	Зручність і безпека зберігання в твердій фазі(у зв'язаному стані); ряд технологій досить добре відпрацьований	Недостатня ємність, необхідність підігріву, відносно висока вартість

При зберіганні водню в гідридах у всіх випадках зберігається 244 кг. Газоподібний водень зберігається в балонах (15 МПа), при цьому маса контейнера на 1 кг водню становить 98 кг. Рідкий водень зберігається в Дьюара по 6,5 кг. Маса контейнера на 1 кг газоподібного метану в балонах при 15 МПа складає 11 кг. Маса Дьюара на 1 кг рідкого метану становить 1,3 кг.

Аналіз і перспективи використання технологій акумулювання та зберігання водню як перспективного авіаційного палива.

Водневий двигун може зіграти ключову роль у декарбонізації авіації. Прогнозується, що він буде в два-три рази ефективнішим ніж застосування синтетичних палив у питаннях пошуку шляхів зниження впливу авіації на клімат. Оцінка, такого впливу є складною та недостатньо дослідженою областю [25]. Водень повинен надходити з низьковуглецевого джерела, яке буде використовуватися для декарбонізації.

Найбільш поширеними способами отримання низьковуглецевого водню є електроліз води, який є безвуглецевим методом, якщо живиться від поновлюваних джерел енергії ("CertifHy Green H₂", також відомий як "зелений H₂"), і вуглецево-нейтральний, якщо він виробляється реформінгом природного газу в поєднанні з уловлюванням і зберіганням вуглецю ("CertifHy Low Carbon H₂", також відомий як "синій H₂"). Обидва вони є реально можливими шляхами і можуть існувати паралельно.

Після виробництва водень необхідно або стискати, або зріджувати, а вже потім розподіляти по аеропортах спеціальними вантажівками з причепами для стиснутого або зрідженого водню для невеликих аеропортів або через трубопровід для великих аеропортів. Він також може бути конвертований, наприклад, в аміак, або рідкі органічні носії водню. Якщо водень не був зріджений на виробничому комплексі, то опинившись в аеропорту, він буде зріджений, та буде зберігатися в такому вигляді і в кінцевому підсумку передаватися літакам за допомогою заправних вантажівок або альтернативного методу заправки, такого як заправні платформи.

Найбільшою перешкодою для водневої авіації є відсутність інфраструктури: безпечного та надійного зберігання, розподілу зрідженого водню та використання водню на борту літаків. Безпосереднім пріоритетом для компонентів водневого ланцюгу постачання є розробка та проектування легких танкерних систем, надійних компонентів розподілу палива, водневих двигунів з низькими викидами оксиду азоту та тривалим терміном служби, а також високопотужними системами паливних елементів. Ще одним ключем до розкриття потенціалу водневої авіації є розвиток необхідної інфраструктури дозаправки. Більшість необхідних технологій сьогодні є комерційно доступними, тому проблема полягає в основному в масштабуванні та будівництві паралельних інфраструктур під час переходу на нові авіаційні системи. Тим не менш, деякі критичні проблеми інженерного-дослідницького характеру повинні бути вирішені. Результат вирішення цих проблем може «підтримати або зламати» конкурентоспроможність водневої авіації.

Зведемо до таблиць проблеми технологій акумулювання та використання водню на борту літака та в інфраструктурі аеропортів, що є актуальними на сьогодні.

Таблиця 2 - Аналіз компонентів системи акумулювання та використання водню на борту літака [25-30]

№ з/п	Системи технологій	Технологічні параметри, існуючі на даний момент	Необхідні технологічні параметри	Пріоритет подальших інновацій
1	Бортові компоненти та система розподілу зрідженого водню	не існує єдиної розробки стандартів для комерційних літаків	Безпечна, сертифікована архітектура розподілу з мінімальною вагою та витратами на технічне обслуговування	Безпека та надійність для розподілу зрідженого водню на рівні загально вживаного палива, наприклад, керосину
2	Високопотужна система паливних елементів, включаючи концепції охолодження водню	~0,75 кВт/кг щільність потужності на системному рівні; Найбільш просунутими і придатними для авіації сьогодні є низькотемпературні протоніообмінні мембранні (ПЕМ) паливні елементи; Гібридна система водневих турбін і систем паливних елементів.	1,7 кВт/кг для регіональних літаків (<5 МВт), 2 кВт/кг для літаків малої дальності та великих літаків; Зріджений водень вимагає криогенного охолодження до 20 градусів Кельвіна. Ці температури повинні підтримуватися трубами, клапанами і компресорами; Необхідно підтримувати на низькому рівні кипіння, а також уникати витоків та тріскання матеріалу	Підтримання пріоритетності використання паливних комірок, оскільки вони мають більш високий потенціал для зменшення впливу на клімат, ніж спалювання водню.

Продовження таблиці 2

3	Легкі та безпечні баки для зрідженого водню	гравіметричний індекс складає 15-20% (для бака з менш ніж однією тонною зрідженого водню)	35% -гравіметричний показник для малої дальності (5 тонн зрідженого водню), 38%+ для літаків дальнього польоту (понад 30 тонн зрідженого водню); Оскільки зріджений водень повинен залишатися холодним, а тепловіддача повинна бути зведена до мінімуму, щоб уникнути випаровування водню, сферичні або циліндричні резервуари необхідні для підтримки низьких втрат.	Зменшення ваги баків для зрідженого водню, щоб забезпечити більш ефективний літак з водневим двигуном і покращеними економічними параметрами, що потенційно підвищує конкурентоспроможність для літаків дальнього польоту.
---	---	---	--	--

Таблиця 3 - Аналіз компонентів системи зберігання та транспортування водню в інфраструктурі аеропортів [25-30]

КОМПОНЕНТИ СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДНЮ В ІНФРАСТРУКТУРІ АЕРОПОРТІВ				
ІННОВАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТЕХНОЛОГІЙ	Ефективні системи заправки	Налаштування дозаправки аеропортів і літаків	Інфраструктура заправки гідранту зрідженого водню	Танкери для зберігання водню в рідкому аміаку та/або рідких органічних носіях
Цілі подальших інновацій	Скоротити час заправки зрідженим воднем, щоб звести до мінімуму вплив на час загального обсягу заправок	Розробити інфраструктуру дозаправки з мінімальними перебоями в поточних операціях аеропорту	Визначити, чи є інфраструктура заправки гідранта зрідженого водню економічно та технічно можливою і може забезпечити економію масштабу у великих аеропортах.	
Технології та технологічні параметри, існуючі на сьогодні	~ 500 літрів за хвилину	Модульна капсульна технологія компанії Universal Hydrogen; Заправні вантажівки призначені для міжміських перевезень	Непомірні витрати, які в 5 разів більше стандартних гідрантних систем	-зберігання під тиском -зберігання в якості рідини
Необхідні параметри	>1,000 літрів за хвилину	Концепція заправки вантажівок повністю повинна бути оптимізована для дозаправки в аеропортах до 2030 року; масштабна модульна заправка, здатна працювати паралельно з існуючою інфраструктурою заправки в аеропортах - до 2035 року	Гідрантна система заправки повинна коштувати нарівні з заправними вантажівками	

Висновки. Переваги водню як універсального енергоносія прийнято визначати екологічною чистотою, гнучкістю і ефективністю процесів перетворення енергії з його участю. Технології різномасштабного виробництва водню досить добре освоєні і мають практично необмежену сировинну базу. На даний момент найбільш відомим і добре дослідженим методом виробництва чистого водню (до 99,9%) є електроліз води.

Проаналізувавши усі можливі способи зберігання водню, можна твердо сказати, що його зберігання є цілком безпечним. Якщо зберігати водень у газоподібному стані, то даний спосіб зберігання є добре розвиненим і доступним у ціні. У випадку зберігання рідкого водню присутні високі енергозатрати на його зрідження, через це спосіб є дорогим у реалізації. Технологія зберігання в нанотрубках, вуглецевих наноструктурах та фулеренах є перспективним у майбутньому, проте зараз ще знаходиться на стадіях реалізації та вдосконалення. Гібридна система зберігання водню має значні переваги над іншими з точки зору техніки безпеки, через це висока вартість такого зберігання.

Отже, є потенціал для його розширення. До переваг використання водню як моторного палива відносяться: високий ККД, низька токсичність, безшумність; різноманіття первинних видів палива, широкий інтервал потужності.

Використання відновлюваних джерел енергії в транспорті повинно бути продовжено і посилено, підкріплене політикою, заснованою на існуючих стратегіях, які повинні бути додатково розроблені для зміцнення уваги до електроенергії та водню на транспорті. Було б вигідно розробити національну стратегію та національну програму академічного та промислового розвитку водневої енергетики та паливних елементів в Україні.

Авіаційна промисловість повинна зробити радикальні зрушення, якщо вона хоче зменшити свій вплив на клімат. Широкий спектр технологічних інновацій знаходиться в стадії розробки для підвищення паливної ефективності літаків і скорочення викидів двоокису вуглецю. Водневий двигун може значно зменшити вплив авіації на клімат. Водень усуває викиди двоокису вуглецю в польоті і може бути вироблений без вуглецю. Для масштабування літаків з таким двигуном необхідно провести кілька технологічних інновацій: підвищення загальної ефективності за допомогою більш легких паливних баків (орієнтація на 12 кВт/кг, гравіметричний індекс 35%) і систем паливних комірок (приблизно 2 кВт/кг, у т.ч. охолодження), розподілу рідкого водню всередині літака, турбін, здатних спалювати водень з низькими викидами оксиду азоту, а також розробки ефективних технологій заправки, що дозволяють розвивати швидкість потоку, порівнянну з керосином. Експерти галузі прогнозують, що ці важливі досягнення можливі протягом наступних п'яти-десяти років.

Список використаної літератури

1. Р. В. Радченко, А. С. Мокрушин, В. В. Тюльпа. Водород в энергетике: учеб. пособие / Р. В. Радченко, А.С. Мокрушин, В. В. Тюльпа. – Екатеринбург: Изд-во Урал.ун-та, 2014. –С. 20.
2. Степанов А.В., Кухарь В.П. Достижения энергетики и защита окружающей среды. — Киев: Наук.думка, 2004. — 206 с.
3. Гольцов В. Воднева цивілізація майбутнього / В. Гольцов // Науковий світ. - 2008. - № 4. - С. 2-5.
4. Дерзский В. Г. Исландский проект / В.Г. Дерзский // Энергетика и электрификация. - 2002. - № 10. - С. 45-46.
5. Н. Грінвуд, А. Ерншо. Хімія елементів: у 2-ох томах. – БІНОМ. Лабораторія знань, 2008. – Т.1. – С.11. — ISBN 978-5-94774-373-9.
6. Ковтун Г. Перспективи водневої енергетики / Г. Ковтун, Є. Полункін /Вісник Національної Академії Наук України. - 2007. - № 4. - С. 12-18.
7. Физическая энциклопедия. В 5 т. / главн. ред. А. М. Прохоров. М. : Советская энциклопедия. Главный редактор А. М. Прохоров. 1988.-С. 16.
8. Аналіз ефективності використання енергетичних ресурсів. В.С. Кудлай, Л.С.Селіверстов, 2012. - С. 4-5.
9. Атжанов Р. Разворот на водород / Р. Атжанов // Вокруг света. - 2006. - № 7.-С. 104-111.
10. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции / Л. А. Арцимович. 2 изд., М., 1963. – С. 67.
11. Ефремов И. В. На пути к термоядерному реактору / И. В. Ефремов. М. :, 1993. – С. 81.
12. Мордков В.З. Материалы Международного форума по водородным технологиям для производства энергии (6—10 февраля 2006 г.). — М.:РУСДЕМ Энергоэффект, 2006. — 122 с.
13. Электролиз, или вода вместо бензина. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.skyzone.ru/tech/meyer_h2.htm.
14. Ковтун Г. Паливний елемент - основа водневої енергетики / Г. Ковтун //Вісник Національної Академії Наук України. - 2006. - № 3. - С. 78-83
15. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: справочник. М. : Химия, 1989. – С. 112.

16. Воднева економіка та паливні комірки. //Громадська Рада України, - 2005.
17. Варшавский И.Л., Мищенко А.И. Анализ работы поршневого двигателя на водороде. Известия вузов № 10. – М.: Машиностроение, 1977. – с.110-114.
18. Crabtree, G.W.; Dresselhaus, M.S.; Buchanan, M.V. The Hydrogen Economy. Phys. Today 2004, 57, 39–45
19. Sap, K.A.; Demmers, J.A.A.; Nimit Patel, G.R. The energy efficiency of onboard hydrogen storage. Intech 2012, 6, 111–133.
20. J.E. Allen, Global energy issues affecting aeronautics: a reasoned conjecture, Progress in Aerospace Sciences 35 (5) (1999) 413–453.]
21. EIA, Official Energy Statistics from the US Government, Energy Information Administration, 2009 (accessed January 20, 2009) <http://www.eia.doe.gov>.
22. WAEG, World Energy Consumption and Production Trends, 2005, World Almanac Education Group, New York, 2008.]
23. M.M. Abu-Khader, Recent advances in nuclear power: a review, Progress in Nuclear Energy 51 (2) (2009) 225–235.]
24. K. Gregory, H.-H. Rogner, Energy resources and conversion technologies for the 21st century, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 3 (2) (1998) 171–230.]
25. Hydrogen powered aviation report 2020, Clean Sky 2 JU & FCH 2 JU, p.20
26. IATA Publications, 2018
27. Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency, ATAG Waypoint 2050 Report
28. A Study on Electrofuels in Aviation, Andreas Goldmann/Energies, MDPI
29. Aircraft Technology Roadmap to 2050, IATA
30. E- E-fuels: towards a more sustainable future for truck transport, shipping and aviation, VoltaChem whitepaper, 2020

S. Boichenko, Dr. Sc. Sciences, Prof., ORCID 0000-0002-2489-4980

National Technical University of Ukraine

"Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"

I. Shkilniuk, Dr. Sc. Sciences, ORCID 0000-0002-8808-3570

National Aviation University

O. Tselishchev, Ph.D. tech. Sciences, ORCID 0000-0002-8808-3570

East Ukrainian National University named after V. Dahl

I. Matviyi, ORCID 0000-0003-3989-2651

National Aviation University

O. Tarasiuk, ORCID 0000-0001-6697-1078

Institute for Circular and Hydrogen Economy

Artur Jaworski, ORCID 0000-0001-6697-1078

Pawel Wos, ORCID 0000-0003-2730-3258

Rzeszów University of Technology, Rzeszów, Poland

MODERN TECHNOLOGIES OF HYDROGEN GENERATION AND ACCUMULATION. ANALYTIC OVERVIEW OF THEORETICAL AND PRACTICAL EXPERIENCE

The article discusses the competitiveness of alternative fuels and technologies in the rapidly growing segment of passenger vehicles and aviation, which globally consumes more than 70% of the fuel spent on passenger transportation and about 45% in total on transport. The emergence of new technologies in personal vehicles (electric vehicles, hydrogen cars with fuel cell, biofuels, natural gas, etc.) makes us look at the prospects for the development of this segment in a new way. On the basis of this approach, an assessment of the methods of hydrogen production was carried out. Hydrogen production by steam conversion of methane, water electrolysis and biochemical production methods were compared in this article.

Hydrogen is not a source of energy, but it is a mean of converting other energy sources into chemical energy in the form of accumulative pure hydrogen, which can be used subsequently during its oxygenation. In fact, a tank or other hydrogen storage device is technically similar to a battery or gas tank, and therefore it is necessary to compare not only the efficiency, but also other parameters. Hydrogen needs to be produced and converted to produce final energy, and both require energy.

The advantages of hydrogen as a universal energy carrier are determined by environmental purity, flexibility and efficiency of energy conversion processes with its participation. Technologies of large-scale hydrogen production are quite well mastered and have an almost unlimited raw material base.

The importance of hydrogen production technologies is determined by the high calorific value of hydrogen combustion and the possibility of reducing greenhouse gas emissions, since ordinary water is the combustion product.

The article provides a comparative analysis of methods of hydrogen storage in liquid and gaseous states, carbon structures and hydride of metals

Keywords: hydrogen, motor fuel, hydrogen energy, hydrogen potential, fuel cell, hydrogen production, hydrogen storage methods, hydrogen engine.

References

1. R. V. Radchenko, A. S. Mokrushy`n, V. V. Tyul`pa. Vodorod v`energety`ke : ucheb.posoby`e / R. V. Radchenko, A.S. Mokrushy`n, V. V. Tyul`pa. —Ekateri`nburg : Y`zd-vo Ural.un-ta, 2014.-C.20.
2. Stepanov A.V., Kuxar` V.P. Dosty`zheny`ya `energety`ky` y` zashhy`ta okruzhayushhej sredy. — Ky`ev: Nauk.dumka, 2004. — 206 s.
3. Gol`czov V. Vodneva cy`vilizaciya majbutn`ogo / V. Gol`czov // Naukovy`j svit. - 2008. - # 4. - S. 2-5.
4. Derzsky`j V. G. Y`slandsky`j proekt / V.G. Derzsky`j // `Energety`ka y` `elektry`fy`kacy`ya. - 2002. - # 10. - S. 45-46.
5. N. Grinvud, A. Ernsho. Ximiya elementiv: u 2-ox tomax. – BINOM. Laboratoriya znan`, 2008. – T.1. – S.11. — ISBN 978-5-94774-373-9.
6. Kovtun G. Perspekti`vy` vodnevoyi energety`ky` / G. Kovtun, Ye. Polunkin /Visny`k Nacional`noyi Akademiyi Nauk Ukrayiny`. - 2007. - # 4. - S. 12-18.
7. Fy`zy`cheskaya `ency`klopedy`ya. V 5 t. / glav. red. A. M. Proxorov. M. : Sovetskaya `ency`klopedy`ya. Glavny`j redaktor A. M. Proxorov. 1988.-C. 16.
8. Analiz efekty`vnosti vy`kory`stannya energety`chny`x resursiv. V.S. Kudlaj, L.S.Seliverstov, 2012. - C. 4-5.
9. Atzhanov R. Razvorot na vodorod / R. Atzhanov // Vokrug sveta. - 2006. - # 7.-S. 104-111.
10. Arcy`movy`ch L. A. Upravlyаемые termoyadernye reakcy`y` / L. A. Arcy`movy`ch. 2 y`zd., M., 1963. – C. 67.
11. Efremov Y. V. Na puty` k termoyadernomu reaktoru / Y. V. Efremov. M. :, 1993. – C. 81.
12. Mordkov V.Z. Matery`aly Mezhdunarodnogo foruma po vodorodnym texnologiy`am dlya proizvodstva energy`y` (6—10 fevralya 2006 g.). — M.:RUSDEM Energoeffekt, 2006. — 122 s.
13. Elektrolyz, yly voda vmesto benzyna. [`Elektronnyj resurs]. Rezhym dostupa: http://www.skyzone.ru/tech/meyer_h2.htm.
14. Kovtun G. Paly`vny`j element - osnova vodnevoyi energety`ky` / G. Kovtun //Visny`k Nacional`noyi Akademiyi Nauk Ukrayiny. - 2006. - # 3. - S. 78-83
15. Vodorod. Svoystva, polucheny`e, xraneny`e, transporty`rovany`e, pry`meneny`e: spravochny`k. M. : Xy`my`ya, 1989. – C. 112.
16. Vodneva ekonomika ta paly`vni komirky`. //Gromads`ka Rada Ukrayiny`, - 2005.
17. Varshavsky`j Y`.L., My`shhenko A.Y`. Analiz raboty porshnevoogo dvygatelya na vodorode. Yzvesty`ya vuzov # 10. – M.: Mashynostroeny`e, 1977. – s.110-114.
18. Crabtree, G.W.; Dresselhaus, M.S.; Buchanan, M.V. The Hydrogen Economy. Phys. Today 2004, 57, 39–45
19. Sap, K.A.; Demmers, J.A.A.; Nimit Patel, G.R.The energy efficiency of onboard hydrogen storage. Intech6 2012, 6, 111–133.
20. J.E. Allen, Global energy issues affecting aeronautics: a reasoned conjecture, Progress in Aerospace Sciences 35 (5) (1999) 413–453.]
21. EIA, Official Energy Statistics from the US Government, Energy Information Administration, 2009 (accessed January 20, 2009) <http://www.eia.doe.gov.>,
22. WAEG, World Energy Consumption and Production Trends, 2005, World Almanac Education Group, New York, 2008.]
23. M.M. Abu-Khader, Recent advances in nuclear power: a review, Progress in Nuclear Energy 51 (2) (2009) 225–235.].
24. K. Gregory, H.-H. Rogner, Energy resources and conversion technologies for the 21st century, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 3 (2) (1998) 171–230.].
25. Hydrogen powered aviation report 2020, Clean Sky 2 JU & FCH 2 JU, p.20
26. IATA Publications, 2018
27. Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency, ATAG Waypoint 2050 Report
28. A Study on Electrofuels in Aviation, Andreas Goldmann/Energies, MDPI
29. Aircraft Technology Roadmap to 2050, IATA
30. E- E-fuels: towards a more sustainable future for truck transport, shipping and aviation, VoltaChem whitepaper, 2020

Надійшла 01.02.2022

Received 01.02.2022

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 621.18

DOI

G. Varlamov Dr.Sc.(Eng.), Prof. ORCID 0000-0002-4818-2603

K. Romanova, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof. ORCID 0000-0001-9738-3383

Zhang Weijie Ph.D, ORCID 0000-0001-8537-8528

Jiang Jianguo, Ph.D, ORCID 0000-0003-2559-4071

Wu Zongyan, Ph.D, ORCID 0000-0001-5160-2253

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

METHODOLOGICAL BASIS FOR A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF ENERGY PRODUCTION BY ENERGY-ENVIRONMENTAL INDICATORS

The solution to the problem of energy saving and improving environmental security can be provided only by a systematic approach, which should be based on the analysis of the efficiency and environmental friendliness of energy production.

A methodology was developed and implemented to assess the qualitative state of operation of specific thermal power facilities by energy and environmental characteristics in real time, taking into account the set of energy, environmental, passport and normalized performance of its units, facilities and devices.

The methodology in practice allows in a complex to determine simultaneously the level of energy efficiency and environmental safety with an assessment of compliance with the level of permissible values for concentrations of pollutants and hazardous substances of the working area and their hazard class. In this case, indicators and parameters of monitoring of various processes of each individual element and component of the energy production facility as a whole, which uses as a source of energy organic fuel, are used.

According to this methodology of comprehensive energy-environmental assessment of operating conditions of energy facilities can be compared different in design, thermal, environmental and other scale characteristics of thermal energy cycles, facilities, installations, units and other thermal energy equipment and optimize the choice of energy source for heat and energy production under different schemes of layout of units within the cycles.

Application of the methodology of assessment of energy-ecological efficiency of thermal energy processes allows to assess the energy-ecological feasibility of modernization or reconstruction of facilities in order to achieve the best performance of their operation in the heat and energy supply systems of various sectors of the country's economy. The use of the method is demonstrated by the example of calculating the coefficient of energy and environmental efficiency for energy boilers of different capacities.

Key words: *energy facility, methodology, objective assessment, environmental safety, energy efficiency, reliability of operation.*

1. Introduction

The desire of industrially developed countries, transnational companies, international production corporations, large enterprises, as well as the desire of private enterprises, organizations and people to create for themselves the most comfortable and convenient conditions of work, life and rest leads to an increase in the use of energy. Therefore, objectively, this steady tendency of human activity leads to an increase in energy production.

At the same time it becomes the reason of excessive technogenic impact on the environment [1].

This negative impact on the environment occurs against the background of continuous growth of energy production and consumption, which accompanies the development of civilization [2].

In recent decades, in many respects, it is these ecological changes that determine the sense of alarm of the world community and the premonition of a general pre-crisis state on Earth [3-5].

It is fundamentally important for mankind to preserve its sustainable development on Earth so as not to destroy its habitat and life environment.

Therefore, the main goal of mankind's progress in its development must be to ensure the safety, purity and reproducibility of the environment for future generations.

Now the primary program for the world economy is the ecological purity of its development.

2. Literature Analysis and Problem Statement

Parameter monitoring systems in which such point values are entered for control allow to estimate the real state of the equipment for further operation, significantly reduce the costs of maintaining the facility in working order due to timely scheduled repairs and equipment renovation, optimize technological processes, increase the reliability of energy production on the basis of implementation of optimal loading, and improve operational safety by reducing the probability of sudden uncontrolled equipment failures and emergencies, to extend the operating life of equipment, etc. [6,7].

Based on the results of these data the assessment of the real technical condition of the equipment, the suitability and operability of the facility, assesses the possibility of further operation or the need for restoration and renovation, as well as assesses the level of opportunities to improve the set of indicators through the use of modern innovative technologies and equipment with improved safety and operational capability of the energy facility [8,9].

To date, there is no comprehensive approach to solving these issues, but in accordance with the main provisions of the Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2035 "Security, Energy Efficiency, Competitiveness" energy intensity of gross domestic product (GDP) based on large-scale energy saving and energy efficiency by increasing the use of its own fuel and energy resources (FER), increasing the level of energy independence of the state, modernization and renewal of fixed assets using modern equipment and technologies with a high level of energy efficiency and environmental safety, creating conditions for the expulsion of the global system for monitoring the state of atmospheric air. However, this requires a qualitative and far-sighted assessment and analysis of the real situation in the country's fuel and energy complex [10-11].

There is an objective need for the development and implementation of such a methodology for a comprehensive energy and environmental assessment of the operation of existing and design of new heat and power facilities (feasibility study), which should reveal the possibilities of understanding and the need to address the three main goals of the country's energy policy:

- increasing the energy and environmental safety of energy production;
- reduction of harmful environmental impact on the environment due to increased efficiency and environmental cleanliness of the use of energy resources;
- increasing the competitiveness of enterprises by reducing the specific energy consumption and the cost of gross emissions of harmful substances and environmental fines for exceeding real emissions in comparison with the established environmental standards.

3. The purpose and objectives of the study

The purpose of this study is to develop the theoretical foundations for conducting a comprehensive energy and environmental assessment (EEA) of the state of operation of an energy facility to determine the possibilities and measures to improve the efficiency of energy consumption of primary energy resources, increase the potential for energy saving while increasing the level of environmental safety of energy production for the environment.

The research objectives are:

analysis of a set of indicators, parameters, quantities and characteristics, the processing of which according to a certain algorithm will allow obtaining a capacious comprehensive assessment of the state of operation of installations, units, mechanisms and other equipment and the facility as a whole, taking into account the level of energy efficiency and environmental indicators of influence on the atmospheric air;

- development of the foundations of the algorithm for the implementation of a comprehensive energy and environmental assessment of the quality of operation or design of new energy facilities for their commissioning;
- development of a methodology and mathematical description for determining the coefficient of energy-environmental assessment (CEEA) of the state of heat-and-power facilities and equipment and comparing it with exemplary values;
- conducting energy-environmental assessments of the state of its operation on the actual TPF with the determination of the CEEA values and the development of measures to improve its performance..

In order to successfully solve these problems, preliminary studies of existing methods and criteria of energy technology efficiency developed by various authors were conducted [12-15].

However, the criteria and characteristics described in these works are descriptive in nature using probabilistic estimates, which complicates their application in specific cases on specific units and in specific installations. Their use in practice is associated with the need to preliminarily establish certain relationships with various quantities, which may have different values for different units in different conditions and can change over time, are not enshrined in normative and legislative terms, and it is difficult to evaluate and apply them in working modes of operation.

Therefore, the paper presents a material and methodology that has a logical and analytical relationship, when using which it is possible to scientifically and clearly analytically obtain the numerical values of the CEEA of the state of heat power facilities and equipment and compare it with the exemplary values of high-quality operation of similar by the capacity and purpose of objects.

4. Rationale for the need and purpose of the energy-environmental assessment of the thermal power facility operation

The problem of a comprehensive assessment of the quality of energy production with high indicators of environmental safety and energy efficiency is that it is necessary to disclose the relationship of factors and indicators of the energy-environmental direction, to analytically describe their relationship and justify the development of such a characteristic, coefficient or criterion that characterizes the operating conditions of a feasibility study for complex connections.

It is necessary to take into account that the parameters, values and performance indicators used must be objective, their receipt must be confirmed by a clear parametric identification [16,17]. And the values of specific concentrations of harmful emissions of toxic and greenhouse gases must meet international standards [18, 19].

It is known that there is a close connection and proportional dependence of environmental indicators with the technical characteristics of energy processes of converting types of energy along the "chain" (chemical into thermal, thermal into electrical, etc.).

EEA is a simultaneous comprehensive examination of a heat and power facility with the establishment, using factors and indicators of environmental friendliness and efficiency of energy production and energy saving potential, taking into account the impact of this facility on the environment at the time of operation and environmental consequences after its shutdown for a long period or closing [20].

Energy and environmental monitoring is the basis for obtaining objective information on the conditions and performance of the feasibility study for a long period [21].

The implementation of systemic observations of the state of energy facilities, systems and territories, including energy and environmental control and forecasting changes and the development of sound recommendations for making managerial and organizational decisions on compliance with environmental safety requirements [22] guarantee the development and obtaining of an objective and qualitative assessment of the work of a specific feasibility study with the ability to develop recommendations to improve the performance of its operation.

The goal of energy and environmental management is the reasonable use of the results of EEA to characterize the quality of management and operation of a heat and power facility with the determination of the possibilities of permanently increasing the level of energy efficiency and environmental safety of energy production and assessing the achievement of the highest possible values.

In order for EEA to give an effective result, it is necessary to apply adequate criteria, which represent an appropriate system and interrelation of factors, parameters and indicators of the energy-ecological direction.

Among the existing indicators of environmental hazard, a special place is taken by the universal specific indicator introduced by the authors of [20] and characterizes the environmental safety g_i (kW/ mg) of a unit or a whole energy facility and shows the amount of useful energy (kW g or Gcal), which is produced per unit (mg) of harmful emissions into the environment. The use of this indicator makes it possible to objectively assess the effectiveness of the influence of various factors: thermodynamic, fuel, technological, operational [20] on the process of energy production.

Comprehensive EEA of indicators of energy and environmental conditions of operation. The feasibility study is based on the implementation of previous energy and environmental measures, namely: energy and environmental expertise and certification.

Taking into account all the heat and power equipment operating at the facility, based on the results of the examination, an energy-ecological passport of the heat power facility is drawn up [23], which includes the main indicators of TPF operation.

The introduction of an energy-ecological passport at each TPF makes it possible to create conditions for constant and high-quality control over the state of operation and the level of environmental cleanliness [24], to ensure a prompt response to emergency situations and to organize the implementation of appropriate measures to increase the level of environmental safety and energy efficiency on the basis of periodic integrated energy efficiency, environmental audit and continuous monitoring of the state of operation of the facility.

At the same time, when carrying out the EEA of a heat power facility according to this developed method, it is necessary to adhere to certain rules and principles:

- fixation of objective values and parametric identification of all main technological parameters, taking into account harmful emissions and the negative impact of the power facility on the environment and human health;
- application of a system of universal specific energy and environmental indicators to assess the state of operation of power facilities;
- application of regulatory methods to identify indicators of harmful emissions of carbon monoxide CO, nitrogen oxides NO_x, sulfur dioxide SO₂, benzapirene, vanadium oxide and other ingredients for various types of power facilities;

– application of the values of maximum permissible emissions of harmful substances, established concentrations and volumes of emissions of pollutants, technological standards of permissible emissions, hazard class of hazardous substances, normalized by the relevant legislative documents.

– EEA objects can be power facilities or systems, the operation of which is accompanied by harmful emissions, potentially capable of negatively affecting the environment and public health.

– The method and scheme of the EEA of power facilities must go through all stages in sequence to obtain the necessary objective information according to the algorithm proposed by the authors (Fig. 1), taking into account the data:

- - the type of main power equipment of a given capacity;
- - determination of the thermal characteristics of the fuel and the theoretical composition of combustion products (for example, the main technical and environmental indicators)
- - assessment of the concentration of emissions of harmful substances (particulate matter, sulfur oxides, nitrogen oxides, carbon oxides, vanadium oxide, etc.)
- - estimates of gross and specific environmental indicators;
- - comparison of the obtained data with the permissible values of the corresponding values.

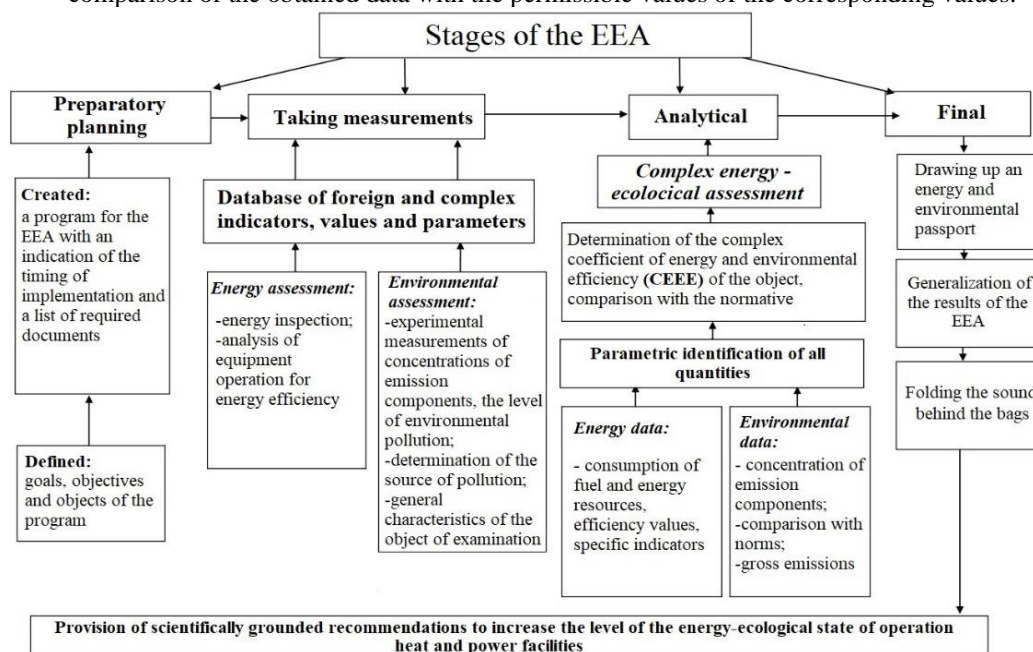


Fig. 1. General view of the algorithm for conducting an energy-ecological assessment of the operating conditions of a heat-and-power facility

The implementation of such an algorithm for conducting EEA allows you to reliably analyze the real state of the equipment and the entire power facility.

The energy-environmental assessment of the TPF ends with the calculation of the EEA factor .

The CEEA of a unit (facility) ε , based on the technological indicators of the operation of a power plant (power facility), characterizes the qualitative level of the unit's operation efficiency, while simultaneously determining the level of environmental safety:

$$\varepsilon = \frac{\eta_{\text{оп}}}{A}, \quad (1)$$

where: A is the total aggressiveness of flue gases, which is defined as:

$$A = \prod_{i=1}^n a_i; \quad (2)$$

$\prod a_i$ – is the product of specific values of aggressiveness of harmful components of harmful emissions, taking into account the general hazard level of flue gas emissions from the facility;

a_i – is the specific value of the aggressiveness of the harmful emission, which takes into account the hazard class and the maximum permissible concentration in the air of the working area, as well as the harmful emission.

The higher the value of a_i , the more dangerous this component is in the composition of flue gases. The size a_i is determined by the formula:

$$a_i = \frac{C_{i_{\alpha=1}}}{j_i} + 1, \quad (3)$$

where: $C_{i_{\alpha=1}}$ – is the mass concentration of the harmful component in the exhaust flue gases with an excess air ratio α equal to unity, which is defined as the ratio of the amount of air entering the installation to its amount required for complete combustion of the fuel ($\alpha_H = 1$) [22];

j_i – is the concentration of harmful emissions, which is determined as the product of the hazard class of the flue gas component and the maximum permissible concentration (MPC) according to the formula:

$$j_i = k_i \cdot \text{MPC}, \quad (4)$$

where k_i – component hazard class (Table 1).

Table 1. MPC value for pollutants in the working area with hazardous substances

Pollutant, formula	MPC (mg/m ³)	Hazard Class
Sulphur dioxide SO ₂	10,0	2
Carbon monoxide CO	20	4
Nitrogen dioxide NO ₂	2	3
Nitrogen oxide NO	5	3
Benzapiren	0,00015	1
Vanadium oxides	0,002	1

The hazard class of harmful emissions (k_i) is an indicator that characterizes the degree of danger to humans of substances that pollute the atmospheric air. Waste hazard class is established depending on the content of highly toxic substances in them by calculation method or according to the list of wastes given in the State Waste Classifier.

The mass concentration of a component with an air excess factor equal to one ($\alpha_H = 1$) is determined by the formula [22]

$$C_{i_{\alpha=1}} = C_i \cdot h, \quad (5)$$

where: C_i – is the mass concentration of the component, measured by the device, mg / m³; h – is the dilution factor of combustion products, determined by the formula:

$$h = \frac{\text{NO}_2^{\max}}{\text{NO}_2 + \text{CO}_2 + \text{CH}_4}, \% \quad (6)$$

where: $\text{NO}_2^{\max} = 11,8\%$ – is the maximum allowable volumetric content of triatomic gases in dry combustion products in the absence of chemical and mechanical incompleteness of combustion and $\alpha_H = 1$; NO_2 – is the volumetric content of triatomic gases in dry combustion products, measured by the last heating surface by a gas analyzer, %; CH_4 – is the methane concentration in combustion products, measured by the last heating surface with a gas analyzer, % [22]. To determine ϵ in formula (1), the value η_{gr} is introduced - the gross efficiency (%), which is determined by the inverse balance

$$\eta_{gr} = 100 - \sum q, \quad (7)$$

where: $\sum q$ – is the sum of heat losses (%), determined by the formula:

$$\sum q = q_2 + q_3 + q_5, \quad (8)$$

where: q_2 – heat loss with exhaust gases, %; q_3 – heat loss with chemical undershoot, %; q_5 – heat loss through the outer surfaces of the boiler, %.

Units of value 1 in the formula (3) introduced to prevent formation of incorrect critical value, in cases when there are no emissions of certain components and values $C_{i_{\alpha=1}} = 0$.

Thus, the following values of the main quantities characterizing energy efficiency and environmental safety have been introduced into the EEA.

The last of them includes the meaning and influence of the toxicity class, concentration and aggressiveness of the release.

The higher the value of the EEA, the higher the quality of the energy-ecological operation of the facility, the higher the level of energy efficiency (high efficiency) and environmental cleanliness (low values of specific concentrations of harmful emissions) [25].

In fact, CEEA \mathcal{E} is an indirect value that characterizes the profitability and environmental feasibility of operating equipment or a power facility in conditions of limiting its impact on the environment. The use of economic levers to solve the problem of increasing the energy and environmental efficiency of energy production is a relevant and appropriate tool [26].

In order to assess the real state of the facilities in operation and compare them with the passport values of the main energy and environmental characteristics, it is advisable to calculate the normalized CEEA \mathcal{E}^n of units and installations according to the formula:

$$\mathcal{E}^n = \frac{\eta_{\text{op}}}{A^H}. \quad (9)$$

The normalized value of the CEEA will allow real-time operation of the facility to monitor the main characteristics of the operation and compare different types of units. The higher the value of the normalized CEEA (\mathcal{E}^n), the more efficient and environmentally safe this energy facility is considered for energy production.

5. Results of a comprehensive energy and environmental assessment of real energy facilities

At the initial stage of the EEA of real power plants and facilities, it is advisable to determine the normalized value of the EEA coefficient \mathcal{E}^n .

For this purpose, we use the concentrations and aggressiveness of emissions established in Ukraine by the relevant regulatory document (Table 2).

Table 2. Established concentrations and volumes of pollutant emissions discharged from the gaseous fuel boiler [27]

Source of education name, brand, type of fuel	Pollutant (name)	Maximum mass concentration of pollutants substances, mg / m ³	Technological standard of permissible emissions in accordance with the legislation of different countries, mg/m ³		Approved maximum permissible emission, mg/m ³	
			Ukraine	EU	Ukraine	EU
Gas fired boiler	Nitrogen oxides (in terms of nitrogen dioxide NO _x)	700	150	150	500	
	Carbon monoxide CO	200	250	100	200	

According to the passport data, the efficiency value for power boilers KVGM-100, KVGM-10, PTVM-180 are equal respectively 93%, 92%, 88,8%.

The determination of the permitted concentration of hazardous emissions is carried out according to the formula (4) using the values of the Table 2:

$$j_{\text{NO}_x} = 2 \cdot 3 = 6 \text{ mg} / \text{m}^3,$$

$$j_{CO} = 4 \cdot 20 = 80 \text{ mg / m}^3 .$$

Determination of the specific standardized value of the aggressiveness of harmful emissions is carried out using the data in Table 2 and formula 3

$$a_{NO_x}^H = \frac{500}{6} + 1 = 84,3,$$

$$a_{CO}^H = \frac{200}{80} + 1 = 3,5.$$

The general standardized aggressiveness of flue gas emission according to the formula (4) is:

$$A^H = 84,3 \cdot 3,5 = 295,16.$$

To determine the normalized value of the CEEA for boiler units of various types, we use the formula (9):

$$\varepsilon_{KVGM-10}^n = \frac{92}{295,16} = 0,311,$$

$$\varepsilon_{KVGM-100}^n = \frac{93}{295,16} = 0,315,$$

$$\varepsilon_{PTVM-180}^n = \frac{88,8}{295,16} = 0,30.$$

From Table 3, it can be seen that the normalized value of the CEEA ε^n for various types of boilers is almost the same, since for all of them the same MPC values for the emission components are set. Minor differences in the CEEA values of different boilers are influenced by different values of the efficiency rating data.

The results of determining the CEEA for boilers of various types are presented in Table 3.

Table 3. Standardized CEEA values for power boilers of various types

№	Boiler type	Permitted concentration of harmful emissions, j_i , mg/m^3		MPC, mg/m^3		Specific value of emission aggressiveness, a		Boiler efficiency rating, %	General aggressiveness, A	Normalized CEEA value ε^n
		NO _x	CO	NO _x	CO	NO _x	CO			
1	KVGM-10	6	80	500	200	84,33	3,5	92	295,16	0,311
2	KVGM-100	6	80	500	200	84,33	3,5	93	295,16	0,315
3	PTVM-180	6	80	500	200	84,33	3,5	88,8	295,16	0,3
4	BKZ-160-100PT	6	80	700	250	116,7	3,13	91,8	364,6	0,218
5	BKZ -220-100GZ	6	80	700	250	116,7	3,13	91,15	364,6	0,250
6	BKZ -210-140PT	6	80	700	250	116,7	3,13	91,5	364,6	0,251

Conclusions. The methodology proposed by the authors for conducting a comprehensive EEA of heat and power facilities allows for systemic surveys of the operating conditions of existing power facilities and those that are being designed.

The developed algorithm for the implementation of EEA makes it possible to determine the CEEA \mathcal{E} of real units and objects with an analysis of the possibility of implementing measures to increase their efficiency and environmental safety through the introduction of new methods and technologies during their reconstruction or modernization.

The proposed method is also universal from the point of view of international application, since it allows you to research, analyze and recommend the best ways to implement measures to improve the energy and environmental performance of any heat and power facilities. At these facilities, heat and power equipment of various thermal and electrical capacities of any origin and technology is used, such as steam turbine units of thermal power plants, combined heat and power plants, boiler houses, gas turbine and combined cycle plants, cycles using renewable energy sources, and the like.

In the work on the developed methodology, the normalized CEEA was determined with the definition of the following features:

- the lower the concentration of harmful components in the flue gases and the higher the efficiency, the higher the value of the complex CEEA (\mathcal{E})

-the normalized value of the complex CEEA \mathcal{E}^n for boilers of the type KVGM-10, KVGM-100, PTVM-180 are equal to $\mathcal{E}_{KVGM-10}^n=0,311$; $\mathcal{E}_{KVGM-100}^n=0,315$; $\mathcal{E}_{PTVM-180}^n=0,30$, characterizing the general possibility of improving the indicators of energy-ecological efficiency of energy production.

The implementation of a comprehensive EEA at energy facilities allows to objectively assess the energy efficiency of TPF use, determine the environmental aspects of the impact of energy systems and develop an optimal development strategy for the facility.

The results obtained lay the foundation for the transition to a new level of energy conservation management at energy facilities. This approach creates conditions for improving the quality of equipment operation, ensuring the implementation of objective monitoring of a set of parameters and technical and economic indicators of the operation of energy production facilities, their real state and optimization of overhaul periods with lengthening the motor resource of facilities [26].

References

1. Anser, M.K., Iqbal, W., Ahmad, U.S. *et al.* (2020) Environmental efficiency and the role of energy innovation in emissions reduction. *Environ Sci Pollut Res*, 27, 29451–29463. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09129-w>.
2. Srivastava, R.K. (2020) Impacts of Sustainable Energy Resource Use on the Health of the Environment. In: Gothandam K., Ranjan S., Dasgupta N., Lichtfouse E. (eds) *Environmental Biotechnology*, 1, 145-180. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38192-9_6.
3. Abdeen, M. O. (2009) Energy use and environmental impacts: A general review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 1, 53-101. <https://doi.org/10.1063/1.3220701>.
4. Balat, M. (2005). Usage of Energy Sources and Environmental Problems. *Energy exploration & exploitation*, 23 (2), 141–168. <https://doi.org/10.1260/0144598054530011>.
5. Varlamov G.B., Lyubchik G.N. *Ispolzovanie metodov tehnologicheskogo predvideniya dlya analiza resursnyh i ekologicheskikh problem energopotrebleniya. / V kn. "Innovacionnoe razvitie toplivno-energeticheskogo kompleksa: problemy i vozmozhnosti."* Pod obshej redakciej Voronovskogo G.K., Nedina I.V. K.: Znaniya Ukrainy. – 2004. – S.55-63.
6. Denisyuk, S.P., Vasilenko, V.I. (2016) Energetichni, ekonomichni ta ekologichni pokazniki energoefektivnosti. *Energetika: ekonomika, tehnologiyi, ekologiya*, 1, 33-44. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/16591>.
7. Paul Breeze (2018). Chapter 9 - The Environmental Impact of Energy Storage Technologies, *Power System Energy Storage Technologies*, 79-84. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812902-9.00009-2>.
8. Varlamov, G., Romanova, K., Nazarova, I., Dashchenko, O., Kapustiansky, A. (2017). Improvement of energy efficiency and environmental safety of thermal energy through the implementation of contact energy exchange processes. *Archives of Thermodynamics*, 38 (4), 127-137. doi: <https://doi.org/10.1515/aoter-2017-0028>.
9. Varlamov, G., Romanova, K., Daschenko, O., Ocheretyanko, M., Kasyanchuk, S. (2016). The use of contact heat generators of the new generation for heat production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (84)), 52–58. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.86088>
10. *Rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukrayini «Pro shvalennya Energetichnoyi strategiyi Ukrayini na period do 2035 roku Bezpeka, energoefektivnist, konkurentospromozhnist»*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/605-2017-%D1%80>.

11. Kapustyanskyi A., Varlamov G. Analysis of the fuel and energy complex of Ukraine/ Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, 2016, № 3 (83)p.144-153. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/18476>
12. Aparicio, J., Kapelko, M., Zoffio J. (2020). The measurement of environmental economic inefficiency with pollution-generating technologies. Resource and energy economics, 62, 101185 doi: <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2020.101185>.
13. Labandeira, X., Labeaga, J.M., Linares, P.López-Otero X. (2020) The impacts of energy efficiency policies: Meta-analysis, *Energy Policy*, 147, 111790. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111790>.
14. Emre Gençer, Sarah Torkamani, Ian Miller, Tony Wenzhao Wu, Francis O'Sullivan Sustainable energy system analysis modeling environment: Analyzing life cycle emissions of the energy transition. *Applied Energy*, 277 (1), 115550. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115550>.
15. Belyaev Yu.M. Kriterii ekologo-ekonomicheskoy effektivnosti energeticheskikh tehnologij // Promyshlennaya energetika.–2003.–№ 8.–S.39–44.
16. Varlamov G., Pryimak K. Technology of comprehensive parametric diagnostics of power facility operating condition // *Innovations and Technologies News*, 2014. – №1. – С. 3-9.
17. Pryimak K.O., Varlamov G.B., Dashchenko O.P. Increasing energy and environmental efficiency and reliability of power equipment by comprehensive monitoring its actual state // *Electromechanical and energy saving systems*, 2015. – №2/2015 (30). – pp. 138 - 146.
18. Directive 2008/50/eU of the European Parliament and of the Council on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe. URL: <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2008/50/contents>.
19. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council on Industrial Emissions of 24 November 2010 (integrated pollution prevention and control - IED). URL: <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2010/75/contents>.
20. Lyubchik G.N., Varlamov G.B. Faktory, parametry i pokazateli ekobezopasnosti energeticheskikh obektov // *Ekotehnologii i resursoberezhenie*.–2001. – №2 – S. 53-59.
21. Varlamov G.B. Ocinka negativnogo vplivu ta koncepciya energo-ekologichnogo monitoringu palivospalyvalnih energoob'yektiv // *Ekotehnologii i resursoberezhenie*.–2001.–№ 4.–S.66-70.
22. Galuzevij kerivnij dokument 34.02.305—2002. «Metodika viznachennya vikidiv zabrudnyuvalnih rehovin u atmosferu vid energetichnih ustanovok». URL: <http://eco.com.ua/content/vikidi-zabrudnyuvalnih-rehovin-u-atmosferu-vid-energetichnih-ustanovok-metodika>.
23. Varlamov G.B., Lyubchik G.M., Gorbunov O.V., Martinenko M.P. Metodika ekologichnoyi ekspertizi energoob'yektiv // *Regionalnye problemy energosberezheniya v decentralizovannoy teploenergetike*.– Kiev.–2000.–S. 173-175.
24. Lyubchik G.N., Varlamov G.B., Serdyuk S.D. Analiz vliyaniya ekspluatacionnyh faktorov na emissiyu NOh i SO v produktah sgoraniya stehiometricheskikh gorelok // *Energetika i elektrifikaciya*.–2001.–№ 11.– S. 43-48.
25. Varlamov, G., Priymak, E., Olinevich, N., Ocheretyanko, M. (2015). Features of integrated energy assessment of the actual environmental performance of energy facilities. *Electromechanical and energy saving systems*, 4 (32), 75-81. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/emezs_2015_4_11.
26. Varlamov G.B., Romanova K.O., Czyan Czyanguo, Chzhan Vejce Ekonomichni vazheli yak osnova pidvishennya energo-ekologichnoyi effektivnosti energovirobnictva / Stalij rozvitok — NHI stolittya. Diskusiyi 2020: kolektivna monografiya / Nacionalnij universitet “Kiyev-Mogilyanska akademiya” / za red. prof. Hlobistova Ye.V. — Kiyiv, 2020. — S.264-272. ISBN: 978-617-7668-22-9. URL: https://9922dac3-967f-46d7-a171-70a3fd248a04.filesusr.com/ugd/b93fb2_957a0f54aad147918141fadac941e1da.pdf
27. Order of the Ministry of Environmental Protection of Ukraine N 309 27.06.2006 «Pro zatverdzhennya normativiv granichnodopustimih vikidiv zabrudnyuyuchih rehovin iz stacionarnih dzherel» URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0912-06#Text>

Г.Б. Варламов, д-р. техн. наук, проф. ORCID 000-0002-4818-2603

К.О. Романова, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-9738-3383

Чжан Вейцзе, асп., ORCID 0000-0001-8537-8528

Цзян Цзяньго, асп., ORCID 0000-0003-2559-4071

У Цзунянь, асп., ORCID 0000-0001-5160-2253

**Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА
ЕНЕРГІЇ ЗА ЕНЕРГО-ЕКОЛОГІЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ**

Авторами запропонована універсальна загальна методика здійснення комплексного енерго-екологічного аналізу із визначенням реального стану експлуатації теплоенергетичних об'єктів та обладнання енерговиробництва з використанням ємного універсального коефіцієнту енерго-екологічної ефективності, який дозволяє у комплексі визначати одночасно рівень енергетичної ефективності і

екологічної безпеки виробництва теплової і електричної енергії за показниками та характеристиками роботи устаткування.

Оцінка якісного стану експлуатації конкретних теплоенергетичних об'єктів визначається порівнянням даного коефіцієнту із його нормованим значенням, яке розраховується у відповідності до паспортних даних агрегатів енергоперетворення, нормованих величин емісії шкідливих викидів в атмосферу для конкретного типу теплоенергетичних агрегатів, значень гранично-допустимих концентрацій забруднюючих речовин робочої зони та класу небезпеки цих шкідливих речовин.

За даною методикою проведення комплексного енерго-екологічного аналізу енергетичних об'єктів можливо порівнювати різні за конструктивними, тепловими, екологічними і іншими масштабними характеристиками теплоенергетичні цикли, об'єкти, установки, агрегати та інше теплоенергетичне обладнання.

Використання методики продемонстровано на прикладі розрахунку коефіцієнту енерго-екологічної ефективності для енергетичних котлів різної потужності.

Ключові слова: енергетичний об'єкт, методологія, комплексна оцінка, екологічна безпека, енергоефективність, надійність експлуатації.

Список літературних джерел

1. Anser, M.K., Iqbal, W., Ahmad, U.S. *et al.* (2020) Environmental efficiency and the role of energy innovation in emissions reduction. *Environ Sci Pollut Res*, 27, 29451–29463. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09129-w>.
2. Srivastava, R.K. (2020) Impacts of Sustainable Energy Resource Use on the Health of the Environment. In: Gothandam K., Ranjan S., Dasgupta N., Lichtfouse E. (eds) *Environmental Biotechnology*, 1, 145-180 doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-38192-9_6.
3. Abdeen, M. O. (2009) Energy use and environmental impacts: A general review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 1, 53-101. <https://doi.org/10.1063/1.3220701>.
4. Balat, M. (2005). Usage of Energy Sources and Environmental Problems. *Energy exploration & exploitation*, 23 (2), 141–168. <https://doi.org/10.1260/0144598054530011>.
5. Варламов Г.Б., Любчик Г.Н. Использование методов технологического предвидения для анализа ресурсных и экологических проблем энергопотребления. / В кн. “Инновационное развитие топливно-энергетического комплекса: проблемы и возможности.” Под общей редакцией Вороновского Г.К., Недина И.В. К.: Знання України. – 2004. – С.55-63
6. Денисюк, С.П., Василенко, В.І. (2016) Енергетичні, економічні та екологічні показники енергоефективності. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 1, 33-44 URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/16591>.
7. Paul Breeze (2018). Chapter 9 - The Environmental Impact of Energy Storage Technologies, *Power System Energy Storage Technologies*, 79-84. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812902-9.00009-2>.
8. Varlamov, G., Romanova, K., Nazarova, I., Dashchenko, O., Kapustiansky, A. (2017). Improvement of energy efficiency and environmental safety of thermal energy through the implementation of contact energy exchange processes. *Archives of Thermodynamics*, 38 (4), 127-137. doi: <https://doi.org/10.1515/aoter-2017-0028>.
9. Varlamov, G., Romanova, K., Daschenko, O., Ocheretyanko, M., Kasyanchuk, S. (2016). The use of contact heat generators of the new generation for heat production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (84)), 52–58. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.86088>
10. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність” : Розпорядження Кабінету Міністрів України; Стратегія від 18.08.2017 № 605-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/605-2017-%D1%80> (дата звернення: 10.03.2021).
11. Kapustyanskyi A., Varlamov G. Analysis of the fuel and energy complex of Ukraine/ *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, 2016, № 3 (83)p.144-153. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/18476>
12. Aparicio, J., Kapelko, M., Zofio J. (2020). The measurement of environmental economic inefficiency with pollution-generating technologies. *Resource and energy economics*, 62, 101185 doi: <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2020.101185>.
13. Labandeira, X., Labeaga, J.M., Linares, P.López-Otero X. (2020) The impacts of energy efficiency policies: Meta-analysis, *Energy Policy*, 147, 111790. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111790>.
14. Emre Gençer, Sarah Torkamani, Ian Miller, Tony Wenzhao Wu , Francis O'Sullivan Sustainable energy system analysis modeling environment: Analyzing life cycle emissions of the energy transition. *Applied Energy*, 277 (1), 115550. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115550>.
15. Беляев Ю.М. Критерии эколого-экономической эффективности энергетических технологий // *Промышленная энергетика*.–2003.–№ 8.–С.39–44.

16. Varlamov G., Pryimak K. Technology of comprehensive parametric diagnostics of power facility operating condition // *Innovations and Technologies News*, 2014. – №1. – С. 3-9.
17. Pryimak K.O., Varlamov G.B, Dashchenko O.P. Increasing energy and environmental efficiency and reliability of power equipment by comprehensive monitoring its actual state // *Електромеханічні та енергозберігаючі системи*, 2015. – №2/2015 (30). – pp. 138 - 146.
18. DIRECTIVE 2008/50/EU of the European parliament and of the council on ambient air quality and cleaner air for Europe. URL: <https://www.legislation.gov.uk/eudur/2008/50/contents>.
19. Directive 2010/75/EU of the european parliament and of the council on industrial emissions of 24 November 2010 (integrated pollution prevention and control - IED). URL: <https://www.legislation.gov.uk/eudur/2010/75/contents>.
20. Любчик Г.Н., Варламов Г.Б. Факторы, параметры и показатели экобезопасности энергетических объектов // *Экотехнологии и ресурсосбережение*.–2001. – №2 – С. 53-59.
21. Варламов Г.Б. Оцінка негативного впливу та концепція енерго-екологічного моніторингу паливоспалювальних енергооб'єктів // *Экотехнологии и ресурсосбережение*.–2001.–№ 4.–С.66-70.
22. Галузевий керівний документ 34.02.305—2002. «Методика визначення викидів забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок». URL: <http://eco.com.ua/content/vikidi-zabrudnyuvalnih-rechovin-u-atmosferu-vid-energetichnih-ustanovok-metodika>.
23. Варламов Г.Б., Любчик Г.М., Горбунов О.В., Мартиненко М.П. Методика екологічної експертизи енергооб'єктів // *Региональные проблемы энергосбережения в децентрализованной теплоэнергетике*.– Киев.–2000.–С. 173-175.
24. Lyubchik G.N., Varlamov G.B., Serdyuk S.D. Analiz vliyaniya ekspluatacionnyh faktorov na emissiyu NOh i SO v produktah sgoraniya stehiometricheskih gorelok // *Energetika i elektrifikaciya*.–2001.–№ 11.– S. 43-48.
25. Varlamov, G., Priymak, E., Olinevich, N., Ocheretyanko, M. (2015). Features of integrated energy assessment of the actual environmental performance of energy facilities. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 4 (32), 75-81. URL: es.kdu.edu.ua/wp-content/uploads/2016/02/011_75-81_Varlamov_Priymak_Olinevich_Ocheretyanko.pdf
26. Варламов Г.Б., Романова К.О., Цзян Цзянгуо, Чжан Вейце. Економічні важелі як основа підвищення енерго-екологічної ефективності енерговиробництва Сталій розвиток — ХХІ століття. Дискусії 2020: колективна монографія / Національний університет “Києво-Могилянська академія” / за ред. проф. Хлобистова Є.В. — Київ, 2020. — С.264-272. ISBN: 978-617-7668-22-9. URL:https://9922dac3-967f-46d7-a171-70a3fd248a04.filesusr.com/ugd/b93fb2_957a0f54aad147918141fadac941e1da.pdf.
27. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України N 309 від 27.06.2006 «Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел» URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0912-06#Text>

Надійшла 16.02.2022
Received 16.02.2022

ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЛЯ НОВИХ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ В УКРАЇНІ З УРАХУВАННЯМ СОЦІАЛЬНИХ АСПЕКТІВ

Однією з найгостріших проблем житлово-комунального господарства є неефективне використання енергетичних ресурсів. Це пов'язано із незадовільним станом огорожувальних конструкцій будівель, що не відповідають діючим стандартам, а також застарілими внутрішніми інженерними мережами. Одним із напрямків реформування будівельного сектору є впровадження нових вимог з енергоефективності у нормативну базу, а також введення обов'язкової енергетичної сертифікації будівель із визначенням класу енергоефективності. Разом з тим має місце підвищення рівня якості житла та комфорту. Метою дослідження є аналіз питомого енергоспоживання нових житлових будівель (починаючи з 2019 року) та порівняльна оцінка енергоспоживання у перерахунку на 1 особу для різних міст України та інших країн. Дослідження проводилося на основі даних енергетичних сертифікатів будівель у Єдиній державній системі у сфері будівництва, а також статистичних даних. Енергосертифікат містить клас енергетичної ефективності, визначений з урахуванням європейських підходів до розрахунків енергоспоживання на різні потреби будівель. Також увага присвячена соціальним аспектам, зокрема, наведено результати оцінювання здатності населення України сплачувати комунальні послуги та рівня якості житлових умов домогосподарств.

Ключові слова: житлова багатоквартирна будівля, енергоефективність, енергетична сертифікація, питоме споживання енергії, клас енергоефективності

Вступ. Побутовий сектор займає велику частину енергоспоживання країни, тому за останні роки пріоритетним напрямом для енергоефективності в Україні є саме житлові будинки. Зокрема, впровадження Законів України [1,2] має метою виконання комплексної термомодернізації існуючих будівель, чому передують виконання енергетичного аудиту та розробка енергетичного сертифікату за національною методикою розрахунку [3-5] і встановленою формою [6]. Існуючі будівлі, що експлуатуються, не відповідають сучасним вимогам енергоефективності в Україні [7,8]. За підрахунками Міністерства розвитку громад і територій України, потенціал скорочення споживання енергії житловими будинками є значним і може складати близько 4 млрд. дол. щорічно. Невпинне зростання вартості комунальних послуг призводить до кризи неплатежів, внаслідок чого підвищення енергоефективності будівельного фонду визначається соціальною необхідністю і є актуальною проблемою держави.

Крім впровадження енергозберігаючих заходів в існуючих будівлях, одним із напрямків реформування житлово-комунального господарства є гармонізація з вимогами ЄС та удосконалення діючої нормативної бази з підвищенням вимог щодо енергоефективності для нових будівель [1].

Дана стаття присвячена аналізу споживання енергії новими будівлями, сертифікати яких внесено у відкриту базу даних [9]. Енергосертифікат містить клас енергетичної ефективності, визначений розрахунковим шляхом за методикою національного стандарту, що розроблено з урахуванням європейських підходів до розрахунків енергоспоживання. Узагальнений аналіз даних з наявних сертифікатів становить значний інтерес для оцінювання характеристик огорожень, інженерних систем та фактичного і розрахункового питомого енергоспоживання. Урахування соціальних аспектів під час виконання аналізу енергетичних показників є недостатньо вивченим питанням для України і потребує більшої уваги дослідників.

Існують різні напрямки досліджень енергетичних характеристик будівель:

- енергетичне моделювання будівель із поглибленим аналізом споживання енергії [10-12], що дозволяє розглядати різні варіанти проектування та експлуатації, в тому числі за допомогою спеціалізованих програмних продуктів [13];
- аналіз впливу різних експлуатаційних факторів на енергоспоживання будівель [14], а також енергозберігаючі заходи для огорожень та вид джерела теплоти [15,16];
- урахування соціальних аспектів під час експлуатації будівель при аналізі енергоспоживання [17,18];
- аналіз життєвого циклу будівлі [19];
- поєднання розрахункових моделей та експериментальних досліджень [20].

Аналіз питомих енергетичних характеристик з урахуванням не тільки геометричних характеристик будівель, а й приведених витрат енергії на різні потреби на одну особу [21], є актуальним напрямком досліджень.

У енергетичних сертифікатах що розробляються для нових житлових будівель при проектуванні та для будівель, що підлягають термомодернізації із залученням бюджетних коштів [1], наводяться геометричні, теплотехнічні, енергетичні показники, питомі викиди CO₂. На даний момент сертифіковано 8,5 тисяч будівель, основну частку з яких (близько 50%) складають житлові будівлі. У дослідженні увага авторів була зосереджена на показниках енергоефективності житлових будівель нового будівництва в Україні (починаючи з 2019 року) з виконанням порівняльного аналізу витрат енергії на одну особу. За останні рік у нормативній базі України відбулися зміни, зокрема змінилися підходи до розрахунків контрольних показників енергоспоживання. Для можливості здійснення порівняльних оцінок до уваги бралися сертифікати, розроблені за вимогами, які діяли до моменту вступу в дію нових граничних показників [22].

Аналіз нормативних вимог для житлових будівель

Житловий фонд України становить 6,74 млн. будинків загальною площею 1086 млн. м², а саме [23]:

- житловий фонд індивідуальної забудови – 6,5 млн. будинків загальною площею 622 млн. м²;
- житловий фонд багатоквартирної забудови – 240 тис. будинків загальною площею 464 млн. м².

Технічні характеристики більшості житлових будинків в Україні не відповідають сучасним вимогам до приведеного опору теплопередачі огорожень [7], показників споживання енергоресурсів та умов комфорту. В основному найнижчий клас енергоефективності G серед усіх сертифікованих будівель мають житлові будівлі (47,2%), навчальні заклади (59,7%) та заклади охорони здоров'я (46,2%). Як показано на рисунку 1, переважна кількість житлових будівель, для яких розроблено енергетичний сертифікат, мають клас енергоефективності G (розраховано за встановленою методикою розрахунку [3-5]). За вимогами [1,7] клас енергоефективності нових житлових будівель має бути не нижче, ніж C.

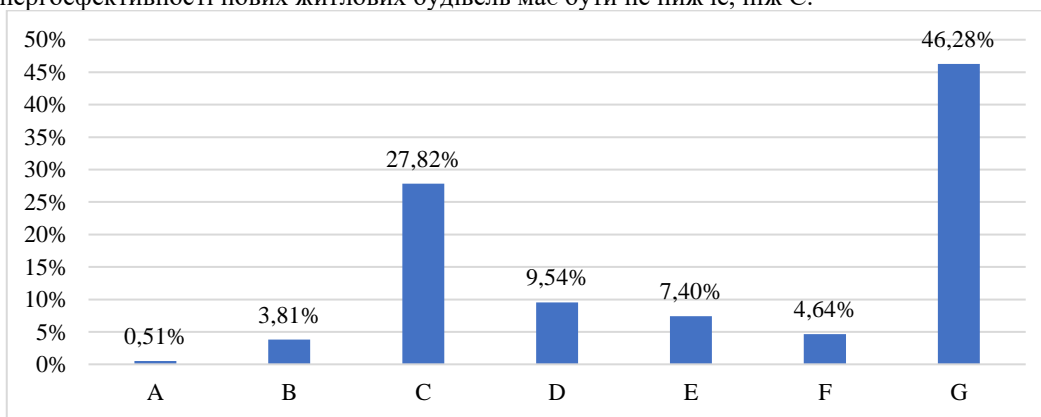


Рисунок 1 – Розподіл сертифікованих житлових будівель в Україні за класами енергоефективності

Проведене дослідження сертифікатів, внесених у базу даних [9] дозволило встановити, що середнє питоме споживання енергії для будівель житлового сектору, сертифікація для яких здійснювалося починаючи з 2019 року (вид будівництва – нове будівництво або реконструкція), знаходиться на рівні 100,8кВт·год/м². Середній показник питомого енергоспоживання для Європи знаходиться у діапазоні від 50 до 80кВт·год/м², тобто Україна має значний потенціал енергозбереження, зважаючи також на середнє значення 183 кВт·год/м² для усіх житлових будівель, представлених у відкритій базі енергетичних сертифікатів [9, 30].

Подальші дослідження будуть направлені на аналіз споживання енергії житловими будівлями із розрахунку на одну людину. Існуюча норма житлової площі в Україні складає 13,65 м² на одну особу [24]. Зважаючи, що фактичне значення щодо використання площі на одну особу для новобудов визначити складно, для подальших досліджень будемо використовувати саме цей показник, а надалі уточнимо його виходячи із даних [28].

Житлове приміщення може використовуватися із перевищенням норми жилої площі, передбачені випадки надання житла понад норму для окремих категорій громадян [24]. Крім того, приватні власники можуть мати і більшу житлову площу. У таблиці 1 наведено значення норм споживання паливно-енергетичних ресурсів.

Площа підлоги на одного мешканця є одним із ключових показників комфортності проживання. Це результат співвідношення розміру помешкання (м² площі підлоги) та кількості осіб, які проживають у помешканні. Середня площа підлоги на одну особу в ЄС становить 42,56 м² на людину. Різниця між найвищим значенням показника (на Кіпрі) та найнижчим (у Румунії) досить велика - близько 45 м² на

людину. Також у країнах з досить великим населенням, таких як Нідерланди, Франція та Німеччина, значення середньої площі підлоги на одну людину перевищують середні показники для ЄС.

Таблиця 1 – Норми надання послуг у комунальному господарстві [24]

Послуга	Норма
Споживання природного газу	
На опалення	4,0 м³ природного газу на 1 м ² опалюваної площі *коригувальний коефіцієнт (в опалювальний період)
На газову плиту (приготування їжі)	3,3 м³ (на особу)
На газову плиту за відсутності гарячого водопостачання (приготування їжі і підігрів води)	5,4 м³ (на особу)
На газову плиту і водонагрівач	10,5 м³ (на особу)
Споживання теплової енергії	
На опалення	0,0383 Гкал/м² опалюваної площі на місяць в опалювальний період*коригувальний коефіцієнт
Централізоване водопостачання та водовідведення	
Постачання холодної води	2,0 м³ холодної води на одну особу на місяць (за наявності послуги з постачання гарячої води)
	3,6 м³ холодної води на одну особу на місяць (за відсутності послуги з постачання гарячої води)
Постачання гарячої води	1,6 м³ (на особу)
Водовідведення	3,6 м³ (на особу)
Споживання електричної енергії	
На опалення	30 кВт·год на 1м² опалювальної площі * коригувальний коефіцієнт (в опалювальний період)
У будинках, обладнаних стаціонарними електроплитами (централізоване постачання холодної та гарячої води)	70 кВт·год на місяць на сім'ю (домогосподарство) з однієї особи і додатково 30 кВт·год на місяць на кожного іншого члена сім'ї (домогосподарства), але не більш як 190 кВт·год на місяць
У будинках, не обладнаних стаціонарними електроплитами (централізоване постачання холодної та гарячої води)	100 кВт·год на місяць на сім'ю (домогосподарство) з однієї особи і додатково 30 кВт·год на місяць на кожного іншого члена сім'ї (домогосподарства) на житлове приміщення (будинок), але не більш як 220кВт·год на місяць
У будинках, обладнаних стаціонарними електроплитами (централізоване постачання гарячої води)	110 кВт·год на місяць на сім'ю (домогосподарство) з однієї особи і додатково 30 кВт·год на місяць на кожного іншого члена сім'ї (домогосподарства) на житлове приміщення (будинок), але не більш як 230кВт·год на місяць
У будинках обладнаних стаціонарними електроплитами (без централізованого постачання гарячої води)	130 кВт·год на місяць на сім'ю (домогосподарство) з однієї особи і додатково 30 кВт·год на місяць на кожного іншого члена сім'ї (домогосподарства) на житлове приміщення (будинок), але не більш як 250кВт·год на місяць

На рисунку 2 показано аналіз питомого споживання енергії на потреби опалення, охолодження та гарячого водопостачання, яку отримує 1 особа, для житлових будівель нового будівництва (2019-2020 років) в Україні, наведених у [9], з урахуванням норм для утримання житла. До вибірки, що аналізувалася, потрапило 1305 будівель.

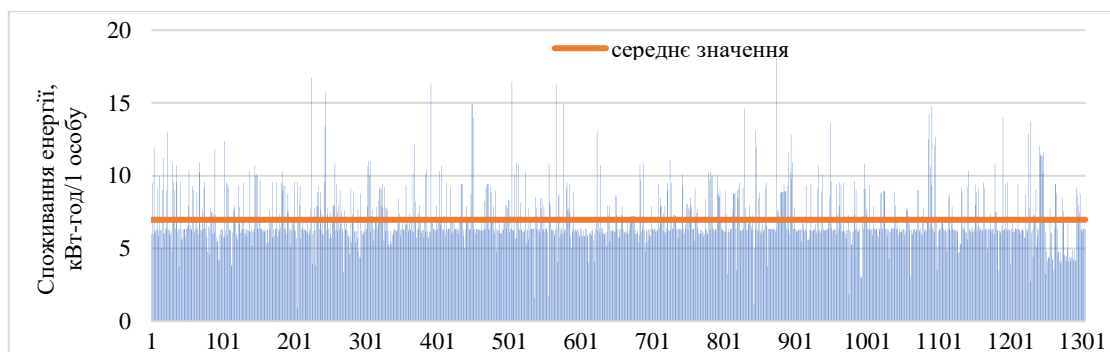


Рисунок 2 – Питоме споживання енергії на 1 особу для житлових будівель нового будівництва

Аналіз показав, що середнє значення споживання енергії на потреби опалення, охолодження та гарячого водопостачання становить 6,97 кВт·год/людину за рік. Під час виконання подібного аналізу лише для нових будівель з класом енергоефективності А-С (849 будівель) було отримано значення 6,07 кВт·год/людину за рік, що на 15% менше. У таблиці 2 наведено середнє питоме споживання енергії, кВт·год/людину для кожного міста (тільки будівлі нового будівництва).

Таблиця 2 – Споживання енергії для різних міст України

Населений пункт	Середнє питоме споживання енергії на потреби опалення, охолодження та гарячого водопостачання, кВт·год/людину
Київ	5,72
Вінниця	6,02
Дніпро	6,07
Житомир	5,91
Івано-Франківськ	6,02
Кам'янець-Подільський	6,18
Кременчук	6,01
Луцьк	6,01
Львів	6,02
Миколаїв	6,13
Одеса	5,42
Полтава	5,86
Рівне	6,55
Суми	6,24
Тернопіль	6,24
Ужгород	6,25
Харків	6,00
Херсон	6,36
Хмельницький	6,21
Черкаси	6,60
Чернівці	6,61
Чернігів	5,93

Споживання енергії на комунальні послуги з опалення, охолодження та гарячого водопостачання та ін. корелює з валовим національним продуктом та кліматом, але існує велика різниця навіть між найбільш високорозвиненими країнами, такими як Японія та Німеччина з 6 кВт·год на людину та США з 11,4 кВт·год на людину (включно з освітленням) [25]. У країнах, що розвиваються, особливо субтропічних або тропічних, таких як Індія, споживання енергії на людину становить близько 0,7 кВт·год/людину. Найнижче споживання має Бангладеш - 0,2 кВт·год/людину [26].

США споживають 25% світової енергії при частці світового ВВП 22% та частці світового населення 4,59%. В даний час найбільш значне зростання споживання енергії відбувається в Китаї, яке протягом останніх 25 років зросло на 5,5% на рік [26].

Дублінським університетом була створена модель споживання енергії, приведеної до 1 людини (пересічного громадянина Ірландії), на основі введених користувачем характеристик [21]. Було встановлено, що середньостатистичний ірландець споживає 69,943 кВт·год за рік (в тому числі включаючи енергію, яку споживають житлові і громадські будівлі, де він проживає та працює, транспорт та інші послуги). Також дослідниками було проаналізовано [21] споживання енергії по різних регіонах Ірландії. Як показали опитування, споживання електроенергії було відносно постійним по всій країні, тоді як частка газу та твердого паливо різко змінилося в залежності від регіону. На одну особу споживання енергії по всій країні було на 13% менше, ніж у середньому в Дубліні, тоді як у Мідленді споживання на людину було на 20% більше, ніж у середньому по країні. Аналогічні відхилення між ми спостерігаємо під час аналізу енергоспоживання для житлових будівель у різних населених пунктах України. В Ірландії середнє енергоспоживання для житлових будівель на 1 особу складає 8,284 кВт·год/рік. Це значення у 1,2 рази вище за середнє питоме споживання нових будівель, що проєктуються в Україні і у 1,34 рази вище за показник для Києва (для нових житлових будівель класів А, В та С), адже питомий показник використання житлової площі на одну людину в Ірландії та Україні різняться. Діапазон річних коливань зовнішніх температур в Києві більше, ніж в Дубліні, відповідно витрати на енергозабезпечення мають бути більшими. Проте потрібно зазначити, що для аналізу враховувалося лише споживання на опалення, охолодження та гаряче водопостачання, а в [21] враховано усі витрати на життєзабезпечення будівель, в тому числі освітлення, причому розрахунки проведено для стандартного будинку.

Витрати домогосподарств на житлово-комунальні послуги.

У таблиці 3 наведено структуру сукупних витрат, які домогосподарство (власні будинки та багатоквартирні будівлі) в Україні витрачає на різні види товарів, в тому числі оплату житлово-комунальних послуг, за даними Державної служби статистики України [27].

Таблиця 3 - Структура сукупних витрат на одне домогосподарство в Україні¹

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
В цілому оплата житла, комунальних продуктів та послуг	8,7	9,7	9,8	10,2	10,7	11,4	14,4	17,2	16,6	16,2	15,6

¹З 2014 по 2020 роки - без урахування частини тимчасово окупованих територій у Донецькій та Луганській областях, Автономної республіки Крим та м.Севастополя

Частка витрат на оплату комунальних послуг невинно зростає і досягає близько 16 %, при цьому зростання витрат не пов'язано з підвищенням комфортності у житлових приміщеннях. Таблиця 4 ілюструє відсоток домогосподарств в Україні, які потерпають від відсутності необхідних умов проживання та спроможності сплачувати комунальні послуги за даними Державної служби статистики України [28].

Велика частина населення потерпає від відсутності комфортних житлових умов у зв'язку з недостатністю коштів (близько 7% міського населення та більше 10% сільського населення). Не мають можливості підтримувати достатню температуру у своєму житлі протягом опалювального сезону більше 17% міського населення та більше 30% населення сіл, що є третиною всіх домогосподарств (причому частка жінок, незадоволених умовами мікроклімату, більша, ніж частка чоловіків).

У багатоповерхових будівлях причиною незадовільних параметрів мікроклімату і низької температури у приміщенні квартир часто стає розбалансування системи опалення, відсутність регулювання джерела системи опалення, а також якісного індивідуального обліку спожитої енергії. У той час, як частина будинку може потерпати від підвищення температури у квартирі, інша частина будинку може мати низькі значення внутрішньої температури, але сплачувати однакову вартість опалення. У сільській місцевості низькі температури в будівлях під час опалювального сезону пов'язані в першу чергу із рівнем доходів населення.

Таблиця 4 - Рівень якості житлових умов домогосподарств (сільське та міське населення)

Показник	Міське населення, %						Сільське населення, %					
	чоловіки			жінки			чоловіки			жінки		
	18-29 років	30-59 років	60 років і старші	18-29 років	30-58 років	59 років і старші	18-29 років	30-59 років	60 років і старші	18-29 років	30-58 років	59 років і старші
Відсутність у зв'язку з недостатністю коштів житла у нормальному стані (протікає дах, вологі стіни/ фундамент або гнилі віконні рами чи підлога)	7,4	6,9	6,5	6,2	4,7	8,2	9,7	8,7	11,6	9,7	9,8	12,5
недостатність коштів для:												
- своєчасної та в повному обсязі оплати рахунків за житло та необхідні послуги з його утримання або оплати газу для приготування їжі	16,9	14,6	15,3	18,3	22,2	27,8	17,9	12,6	15,7	16,7	22,4	23,9
- підтримування достатньо теплої температури у своєму житлі (на придбання палива, обігрівача тощо) протягом опалювального сезону	15,5	12,7	15,4	16,6	20,3	24,2	26,4	27,0	28,6	29,1	35,6	34,8

Висновки. Дане дослідження містить порівняльний аналіз питомого енергоспоживання житлових будівель нового будівництва, починаючи з 2019 року, енергетичні сертифікати яких розроблено за національною методикою розрахунку класу енергоефективності та внесено до порталу державної електронної системи у сфері будівництва України. Проаналізовано нормативні вимоги щодо споживання енергоресурсів на різні потреби в житлових будівлях, питома енергоспоживання із розрахунку на 1 м² опалювальної площі та на одну особу для умов України та країн ЄС. Висвітлено також соціальні аспекти, що впливають на рівень ефективності енергоспоживання: здатність населення України сплачувати комунальні послуги, оцінка рівня якості житлових умов домогосподарств згідно із опитуваннями, а також інші показники комфортності проживання. Відмінності у споживанні можуть пояснюватися різним станом житлових будівель у різних країнах, адже більшість будівель України було збудовано до 2000-х років. До того ж, для розрахунку було взято нормативні значення будівельних норм та взято максимальну кількість мешканців, які могли б проживати у будинку. Як видно з дослідження, рівень споживання на 1 особу в Україні майже дорівнює споживанню в країнах Європи, але при цьому велика частина населення потерпає від відсутності комфортних житлових умов, пов'язаних з мікрокліматом у приміщенні. Також важливим фактором у процесі сертифікації в країнах Європи та США є показник комфортності проживання, у той час як система сертифікації в Україні передбачає лише оцінку кількості споживаної будівлею енергії на м² або м³ площі або об'єму. Зважаючи на обмежений характер та невизначеність стандартних/нормативних та фактичних даних по Україні, для подальших досліджень впливу соціальних і експлуатаційних факторів на енергоефективність житлових будівель доцільним буде створення імітаційних моделей, які враховують сукупність усіх характеристик енергетичного стану будівлі та соціальні аспекти.

Список використаної літератури

1. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» №2118-VIII від 22.06.2017. Голос України. 22.07.2017. №134.
2. Закон України «Про Фонд енергоефективності» № 2095-VIII від 01.12.2020. Відомості Верховної Ради, 2017, № 32, с. 344.
3. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. К. Мінрегіонбуд України, 2016. 205 с.

4. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. №169. Офіційний вісник України. 2018, № 55. С. 301.
5. Про затвердження Змін до Методики визначення енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.10.2020. № 261. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1254-20>.
6. Про затвердження Порядку проведення сертифікації енергетичної ефективності та форми енергетичного сертифіката: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. № 172. Офіційний вісник України. 2018, № 55. С. 334.
7. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. К.: Мінбуд України, 2017. 37 с.
8. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.10.2020. №260. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
9. Портал державної електронної системи у сфері будівництва. Режим доступу: <https://e-construction.gov.ua/>
10. Borodinecs, A., Zemitis, J., Sorokins, J., Baranova, D.V., Sovetnikov, D.O. Renovation need for apartment buildings in Latvia. Magazine of Civil Engineering. 2016. 68. Pp. 58–64. DOI:10.5862/MCE.68.6.
11. Kostenko, V.A., Gafiyatullina, N.M., Semchuk, A.A., Kukolev, M.I. Geothermal heat pump in the passive house concept. Magazine of Civil Engineering. 2016. 68. Pp. 18–25. DOI:10.5862/MCE.68.2.
12. Bilous, I.Yu., Deshko, V.I., Sukhodub, I.O. (2020). Building energy modeling using hourly infiltration rate. Magazine of Civil Engineering, 96(4), 27-41.
13. Efficiency of using energy in the housing sector / under the general editorship of A.M. Pavlenko. Politechnika Świętokrzyska. Kielce, 2020, Pp. 155.
14. Bilous, I., Deshko, V., Sukhodub, I. (2018). Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non - linear multivariate regression models. Journal of Building Engineering, 20, 327-336.
15. Bayramukov, S.H., Dolaeva, Z.N. Dynamic programming in optimization of comprehensive housing stock modernization. Magazine of Civil Engineering. 2017. 76. Pp. 3–19. DOI:10.18720/MCE.76.1.
16. Deshko, V., Buyak, N., Bilous, I., Voloshchuk, V. (2020). Reference state and exergy based dynamics analysis of energy performance of the “heat source – human – building envelope” system”. Energy, 200.
17. Deshko Valeriy, Bilous Inna, Shovkaliuk Maryna, Hurieiev Maksym. Evaluation of differentiated impact of apartment building occupants’ behavior on energy consumption. 2020 IEEE 7th international conference on energy smart systems. Kyiv, Ukraine, May 12-14, 2020. P.196-200.
18. V.I. Deshko, O.M. Shevchenko, M.M. Shovkaliyk. Approach to the energy evaluation of the social facilities of Ukraine at the time of the energy efficiency measures implementation / Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES), 2019. Vol.2. P. 55-75.
19. Chau C.K., Leung T.M. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment, Life Cycle Carbon Emission Assessment on buildings. Applied energy, 2015. V.143. P. 395–413.
20. Integrated Approaches to Determination of CO2 Concentration and Air Rate Exchange in Educational Institution" Deshko Valerii, Bilous Inna, Vynogradov-Saltykov Volodimer, Shovkaliuk Maryna, Hetmanchuk Hanna. Rocznik Ochrona Środowiska, Volume 22, no.1. 2020. P.82-204.
21. Interactive, bottom-up model to audit the true per-person energy consumption (direct and embedded) of Irish citizens per annum. Barry Brophy, Eoin McCormack, William Smith, David Timoney. Energy Reports 7(2021). P.1025-1045.
22. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.10.2020. №260. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
23. Більовський О.А. Державна житлова політика України: проблема соціально-економічної ефективності. Аналітична доповідь. Державний інститут стратегічних досліджень, 2012. 60 с. Режим доступу: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2012-10/1016_dop-2ae1c.pdf
24. Житловий кодекс. Документ № 5464-X, поточна редакція від 01.08.2021. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5464-10#Text>.
25. An official website of the European Union. URL: <https://ec.europa.eu/energy/>
26. Advanced Renewable Energy Systems, edited By S. C. Bhatia. New York, 2014. P.775.
27. Доходи та умови життя: структура загальних витрат / Державна служба статистики України. Режим доступу: http://od.ukrstat.gov.ua/stat_info/domogosp/domogosp2.htm
28. Самооцінка домогосподарств щодо наявності певних товарів та послуг (за даними вибіркового опитування домогосподарств). Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua/>
29. База даних енергетичних сертифікатів. Режим доступу: <https://sae.gov.ua/>

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

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

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

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

VALUATION OF ENERGY INDICATORS FOR NEW RESIDENTIAL BUILDINGS IN UKRAINE TAKING INTO ACCOUNT SOCIAL ASPECTS

One of the most serious problems of the housing and communal state is the inefficient use of energy resources. The condition of the enclosing structures of buildings does not meet current standards, and internal engineering networks are outdated and in need of modernization. The cost of maintaining the construction fund in Ukraine is several times higher than in European countries. Given Ukraine's energy dependence, increasing the energy efficiency of housing is an extremely important issue. One of the direct reforms in construction is the introduction of new energy efficiency standards in the regulatory framework, as well as the introduction of mandatory energy certification of buildings with the specified energy efficiency class. At the same time, the requirements for the level of housing quality and comfort in buildings are growing. The purpose of the study is to analyze the specific energy consumption of new residential buildings (starting in 2019) and a comparative assessment of energy consumption per capita for different cities in Ukraine and other countries. The study was conducted on the basis of statistical data and data from energy certificates for residential buildings provided in the Unified State System in the field of construction. The class of energy efficiency in the energy certificate is determined by certified energy auditors, taking into account European approaches to the calculation of energy consumption for different needs of buildings. With the entry into force of the Law of Ukraine "On Energy Certification of Buildings", the development of an energy certificate has become mandatory for new buildings, state-owned buildings, local government buildings and in case of attracting public funds for thermal modernization of buildings. The study also examined other social aspects, in particular, the results of assessing the ability of the population of Ukraine to pay for utilities and the level of quality of housing conditions in households.

Keywords: *residential apartment building, energy efficiency, energy certification, specific energy consumption, energy efficiency class.*

References

1. On the energy efficiency of buildings: Law of Ukraine № 2118-VIII, 22.06.2017. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19>.
2. About the Energy Efficiency Fund: Law of Ukraine №2095-VIII, 08.06.2017. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2095-19>.
3. DSTU B A.2.2-12: 2015. Energy efficiency of buildings. Method of calculating energy consumption for heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply. K. Ministry of Regional Development of Ukraine, 2016. 205 p.
4. On approval of the Methodology for determining the energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine dated 11.07.2018 №169. Official Gazette of Ukraine. 2018, № 55. S. 301.
5. On approval of Amendments to the Methodology for determining the energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine dated 27.10.2020. №261. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1254-20>.
6. On approval of the Procedure for certification of energy efficiency and forms of energy certificate: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine dated 11.07.2018 № 172. Official Gazette of Ukraine. 2018, № 55. S. 334.
7. DBN B.2.6-31:2016. Thermal insulation of buildings. K.: Ministry of Construction of Ukraine, 2017. 37p
8. On approval of the Minimum requirements for energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine dated 27.10.2020. №260. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
9. Portal of the state electronic system in the field of construction. Access mode: <https://e-construction.gov.ua/>
10. Borodinecs, A., Zemitis, J., Sorokins, J., Baranova, D.V., Sovetnikov, D.O. Renovation need for apartment buildings in Latvia. Magazine of Civil Engineering. 2016. 68. Pp. 58–64. DOI:10.5862/MCE.68.6.
11. Kostenko, V.A., Gafiyatullina, N.M., Semchuk, A.A., Kukolev, M.I. Geothermal heat pump in the passive house concept. Magazine of Civil Engineering. 2016. 68. Pp. 18–25. DOI:10.5862/MCE.68.2.
12. Bilous, I.Yu., Deshko, V.I., Sukhodub, I.O. (2020). Building energy modeling using hourly infiltration rate. Magazine of Civil Engineering, 96(4), 27-41.
13. Efficiency of using energy in the housing sector / under the general editorship of A.M. Pavlenko. Politechnika Świętokrzyska. Kielce, 2020, Pp. 155.

14. Bilous, I., Deshko, V., Sukhodub, I. (2018). Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non - linear multivariate regression models. *Journal of Building Engineering*, 20, 327-336.
15. Bayramukov, S.H., Dolaeva, Z.N. Dynamic programming in optimization of comprehensive housing stock modernization. *Magazine of Civil Engineering*. 2017. 76. Pp. 3–19. DOI:10.18720/MCE.76.1.
16. Deshko, V., Buyak, N., Bilous, I., Voloshchuk, V. (2020). Reference state and exergy based dynamics analysis of energy performance of the “heat source – human – building envelope” system”. *Energy*, 200.
17. Deshko Valeriy, Bilous Inna, Shovkaliuk Maryna, Hurieiev Maksym. Evaluation of differentiated impact of apartment building occupants’ behavior on energy consumption. 2020 IEEE 7th international conference on energy smart systems. Kyiv, Ukraine, May 12-14, 2020. P.196-200.
18. V.I. Deshko, O.M. Shevchenko, M.M. Shovkaliyk. Approach to the energy evaluation of the social facilities of Ukraine at the time of the energy efficiency measures implementation / *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*, 2019. Vol.2. P. 55-75.
19. Chau C.K., Leung T.M. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment, Life Cycle Carbon Emission Assessment on buildings. *Applied energy*, 2015. V.143. P. 395–413.
20. Integrated Approaches to Determination of CO2 Concentration and Air Rate Exchange in Educational Institution" Deshko Valerii, Bilous Inna, Vynogradov-Saltykov Volodimer, Shovkaliuk Maryna, Hetmanchuk Hanna. *Rocznik Ochrona Środowiska*, Volume 22, no.1. 2020. P.82-204.
21. Interactive, bottom-up model to audit the true per-person energy consumption (direct and embedded) of Irish citizens per annum. Barry Brophy, Eoin McCormack, William Smith, David Timoney. *Energy Reports* 7(2021). P.1025-1045.
22. On approval of the Minimum requirements for energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine dated 27.10.2020. №260. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
23. O.A. Bilyovsky. State housing policy of Ukraine: the problem of socio-economic efficiency: an analytical report Kyiv: National Institute for Strategic Studies, 2012. 60 p. Access mode: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2012-10/1016_dop-2a1c.pdf
24. Housing Code of Ukraine. Document № 5464-X, edition dated 01.08.2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5464-10#Text>.
25. An official website of the European Union. URL: <https://ec.europa.eu/energy/>
26. *Advanced Renewable Energy Systems*, edited By S. C. Bhatia. New York, 2014. P.775.
27. Income and living conditions: the structure of total costs / State Statistics Service of Ukraine. Access mode: http://od.ukrstat.gov.ua/stat_info/domogosp/domogosp2.htm
28. Household self-assessment of the availability of certain goods and services (according to a sample household survey) Access mode: <http://www.ukrstat.gov.ua/>
30. Database of energy certificates URL: <https://sae.gov.ua/>

Надійшла 18.04.2022

Received 18.04.2022

МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ КОМУНАЛЬНОЇ СФЕРИ

Роботу присвячено аналізу особливостей визначення доцільності впровадження заходів з підвищення енергетичної ефективності будівель комунальної сфери за допомогою економічних та технічних показників. Розглянуті динамічні методи оцінки доцільності впровадження заходів з підвищення енергетичної ефективності у будівлях комунальної сфери дають змогу більш точно оцінити фінансові показники за час життєвого циклу будівлі. Визначено, що на розрахунковій моделі впливають внутрішні та зовнішні фактори та складність точного визначення майбутніх грошових надходжень від кожного окремого заходу.

Запропоновано алгоритм оцінювання доцільності впровадження заходів з підвищення енергетичної ефективності у будівлях комунальної сфери. Даний алгоритм дає змогу комплексно оцінити технічні та економічні показники при аналізі окремих заходів. Даний алгоритм ґрунтується на застосуванні графічних моделей комплексного представлення технічних та економічних показників. Його використання сприяє прийняттю рішення щодо впровадження саме таких заходів з підвищення енергетичної ефективності, які дозволять не лише зекономити кошти, окупити інвестиції, але й підвищити рівень комфорту перебування в будівлях та досягти рівня мінімальних вимог чинних нормативно-правових актів.

Ключові слова: енергетична ефективність будівель, енергозбереження, комплекс заходів з підвищення енергетичної ефективності, енергетичні ресурси, будівлі, статичні та динамічні показники.

Вступ

Зростання тарифів на енергоресурси разом з постійним зростанням термінів експлуатації будівель комунальної сфери робить не вигідним їх використання у порівнянні з сучасними новобудовами. Разом з тим, відсутність фінансування та можливості вивільнення додаткових площ для побудови нових будівель на заміну старим в урбаністичному просторі змушує шукати технічні рішення з модернізації існуючого фонду. Використання сучасних матеріалів та технологій дає змогу зекономити значні кошти при експлуатації будівель. Більше того, це дає змогу покращити комфортність перебування в будівлях та привести їх характеристики до чинних вимог. Існуючі енергоефективні технології використовуються для будівель найрізноманітніших сфер. Такі заходи, як термічна санація, реконструкція, модернізація інженерних мереж, використання альтернативних джерел енергії, все частіше застосовуються для будівель, а також з кожним роком виходять на новий рівень енергетичної ефективності.[1,3,5]

Через надзвичайну різноманітність пропонованих сьогодні технологій та ефекту від їх впровадження вибір необхідного комплексу заходів з підвищення енергоефективності будівель комунальної сфери є досить відповідальним рішенням. Ефекти від впровадження таких заходів можуть бути як позитивними так і негативними, як з технічної, так і з економічної точки зору. Отже, оцінювання доцільності впровадження заходів з підвищення рівня енергоефективності має бути здійснено з урахуванням усіх показників доцільності та їх залежності один від одного.

Мета дослідження

Метою дослідження є підвищення енергетичної ефективності будівель комунальної сфери шляхом впровадження удосконалених методів оцінювання рівня доцільності впровадження заходів з підвищення енергетичної ефективності.

У Будівлях, зниження витрати енергоносіїв на опалення будівель може досягатися шляхом використання [2]: сучасних теплоізоляційних матеріалів та технологій на стадіях проектування та експлуатації; нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії (НВДЕ) та систем розосередженої генерації (РГ); засобів автоматичного керування системами тепlopостачання будівель; різноманітних програм управління поведінкою користувачів.

При розробці енергоефективних заходів, будівлі слід розглядати, як складні теплоенергетичні системи, котрі включають внутрішній мікроклімат, оболонку будівлі, інженерні мережі, зовнішній клімат. Даний підхід дає змогу проводити комплексний аналіз енергетичних характеристик будівель та впроваджувати обґрунтоване ефективне використання енергетичних ресурсів. Для оцінювання

енергоефективності можуть використовуватись математичні моделі на різних етапах життєвого циклу будівлі. Тривалий час енергетичні характеристики будівель визначалися для річних/сезонних інтервалів розрахунку (стаціонарний розрахунок) [2]. Сучасні тенденції розвитку моделей для визначення енергетичного стану будівлі спрямовані на зменшення часових інтервалів та в напрямку локалізації характеристик системи і впливу окремих факторів [2].

Для оцінки енергоефективності будівель використовують різні моделі в залежності від задач, що вирішуються. В основу рекомендацій щодо розрахунку ефектів від проведення заходів з підвищення енергетичної ефективності будівель повинні бути закладені наступні принципи:

- максимального спрощення розрахунків з метою отримання інтегральних оцінок передбачуваних ефектів;
- використання реального досвіду (розрахунково-експериментального методу) впроваджених проєктів та заходів з енергозбереження в будівлях різного призначення і різних регіонів України;
- консервативного підходу до оцінки невизначеності, спотворень вихідних даних.

Відповідно, алгоритм визначення та оцінки енергетичних ефектів від реалізації заходів з підвищення енергетичної ефективності будівель складається з наступних основних етапів (див. Рис. 1):



Рисунок 1 – Алгоритм визначення та оцінки енергетичних ефектів від реалізації заходів з підвищення енергетичної ефективності будівель

На першому етапі здійснюється аналіз вихідного стану об'єкта (будівлі) з точки зору попереднього підбору комплексу заходів підвищення енергетичної ефективності. Для більшості бюджетних об'єктів доцільно починати аналіз саме з можливостей "пасивного" енергозбереження. Основні складності точного розрахунку економії енергоресурсів складаються в необхідності мати адекватні вихідні дані і точні показники енергоспоживання. Ці складності різного типу і не переборні ніяким універсальним методом. Тому для розуміння особливостей спотворень вихідних даних споживання енергоресурсів до впровадження заходів (щодо клімату, інженерних систем об'єкта, типу будівлі і т.ін.) доцільно використовувати різні джерела інформації:

- покази приладів комерційного та технічного обліку енергоресурсів за останні роки;
- статистичні дані по схожим об'єктам (дані систем моніторингу, проєктні дані, нормативи споживання ресурсів);
- результати енергетичних обстежень та енергетичний паспорт об'єкту.

При визначенні ключового фактору перевитрати, а саме питомого споживання теплової енергії на опалення будівлі, необхідно порівнювати термічні опори огорожень з нормативними для даного клімату, або складати спрощений тепловий баланс будівлі.

Відповідно, якщо будівля має недостатній тепловий захист, його потрібно посилити, тобто провести роботи з утеплення фасадів, модернізації або заміни вікон. Якщо будівля має достатню теплову інерцію і тепловий захист, то необхідно звернути увагу на стан інженерних систем подачі тепла: тепловий ввід, стан розподільних стояків, опалювальних приладів, систем регулювання обсягів споживання теплової енергії та енергетичну потребу будівлі. Найчастіше буває достатньо налагодити існуюче обладнання, замінивши найбільш зношені його елементи, щоб знизити втрати води, теплової енергії та підвищити енергетичну ефективність будівлі.

Види отримуваних енергетичних ефектів при впровадженні енергоефективних заходів [6]:

- 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 питома) 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 парникових газів у атмосферу, забруднення стічних вод, джерела шуму та відходів);

-*Фінансові*. Зниження платежів за енергоресурси, економія і вивільнення бюджетних коштів (на оплату енергоресурсів), зниження сум оплати за ресурси, окупність заходів.

Після вибору комплексу необхідних заходів необхідно ідентифікувати їх в тому числі по типу отримуваних енергетичних ефектів [5,7]:

- модернізація обладнання, елементів, інженерних систем будівель (що призводить до скорочення непродуктивних втрат енергоресурсів);

- використання відходів, вторинних і побічних енергоресурсів;

- способи зниження потреб в енергоресурсах, управління попитом, стимулювання енерго- і ресурсозбереження.

Також, важливим є оцінювання вихідних умов, визначення факторів, котрі впливають на споживання енергоресурсів будівлею. Необхідно проводити оцінку вихідних умов, ідентифікацію та облік факторів, що впливають: незалежних змінних і (або) статичних чинників. На даному етапі (2 етап) проводиться загальний аналіз енергоспоживання будівлею за останні роки, з точки зору виокремлення базового тренду, можливих флуктуацій, а також відбувається оцінка факторів, котрі впливають на рівень енергоспоживання.

Для формування базового тренду використовуються показники приладів обліку теплової енергії, води, електричної енергії. Наявність істотних флуктуацій електро-, тепло або водоспоживання (Табл. 1) свідчить про наявність впливових факторів, котрі слід визначити при побудові розрахункових моделей. На сумарне річне споживання різних видів енергії будівлею впливають як безпосередня потужність енергоустановок, так і тривалість їх роботи. При цьому флуктуації (і економія енергоресурсів) можуть бути отримані як за рахунок зміни потужних параметрів, так і шляхом скорочення (збільшення) тривалості їх роботи протягом року.

Таблиця 1 – Аналіз енергоспоживання будівлі

Кроки та етапи робіт	Зміст робіт
Складання графіків споживання тепла, води, електроенергії будівлею за останні три роки	Формування базових трендів споживання основних енергоресурсів на основі первинних даних
Виявлення флуктуацій теплоспоживання будівлею	Статичні фактори: висновок або додавання опалювальних елементів, ремонтні роботи та реконструкція. Динамічні чинники: варіації градусодіб опалювального періоду
Виявлення флуктуацій електроспоживання будівлею	Статичні фактори: заміна, знос обладнання. Динамічні чинники: зміна чисельності відвідувачів, продуктивності об'єкта
Виявлення флуктуацій водоспоживання будівлею	Статичні фактори: заміна, знос обладнання. Динамічні чинники: зміна чисельності відвідувачів, продуктивності об'єкта

Після формування переліку заходів з підвищення енергетичної ефективності на перших етапах, постає задача відбору найбільш доцільних із них враховуючи стан будівлі та інші аспекти впровадження окремих заходів. При цьому, економія енергоресурсів може бути отримана як за рахунок зміни параметрів, які мають сильний вплив на зниження використання енергетичних ресурсів, так і шляхом зміни тривалості роботи обладнання протягом року [8]. Окрім того, аналіз та розрахунок кожного технічного рішення повинен проводитися за увесь життєвий цикл від початку вкладення коштів в проектні роботи до утилізації обладнання.

Такий аналіз проводиться з розбивкою розрахункового періоду на етапи, в межах яких здійснюються розрахунки, в тому числі поточних витрат та досягнутого економічного ефекту, а саме економії енергоресурсів у грошовому еквіваленті. За замовчуванням етапи приймаються рівними по тривалості, для зручності - по одному року тим самим спрощуючи їх порівняння. При порівнянні декількох заходів початковий момент для них вибирається один і той же.

Проводиться моделювання грошових потоків на кожному етапі проекту. Реалізований захід або технічне рішення на кожному етапі свого життєвого циклу породжує грошові потоки в складі доходів і витрат грошових коштів. Щоб розрахувати грошовий потік заходів в цілому, необхідно знати величину грошового потоку на кожному з етапів життєвого циклу

Кроки та етапи аналізу енергоспоживання будівлі:

- Складання графіків споживання енергоресурсів будівлею за останні роки;

- Виявлення флуктуацій споживання теплової енергії будівлею;
- Виявлення флуктуацій електроспоживання будівлею.

Для формування оцінки доцільності впровадження енергозберігаючих заходів, такі заходи в першу чергу слід поділити на певні групи, наприклад: заходи направлені на підвищення ККД індивідуального теплового пункту, збільшення термічного опору огорожувальних конструкцій, зменшення споживання гарячої води, підвищення кратності повітрообміну.

Для кожної з груп проводиться розрахунок початкових енергетичних характеристик (до впровадження заходів) та характеристик після впровадження заходів. Відповідно, розраховуються економічні та фінансові показники (*NPV*, *NPVQ*).

Наступним кроком знаходяться відношення початкових та кінцевих технічних показників для кожного заходу з підвищення енергоефективності у кожній групі, відповідно (див. Табл. 2).

Таблиця 2 – Параметри оцінювання заходів з енергозбереження будівлі [7,8].

Розрахункова формула	Зміст показника
$K_{m.e.} = \frac{R_1}{R_2}$	Визначення доцільності впровадження заходів що являє собою відношення технічних параметрів до впровадження заходів та після. В даному випадку, відношення початкового та кінцевого термічних опорів.
$K_{m.e.Q} = \frac{Q_2}{Q_1}$	Ефект від впровадження заходу, порівнявши фактичне споживання теплової енергії та прогнозоване після впровадження заходу
$NPV = -Inv + \sum_{i=1}^n \frac{(E_i - C_i)}{(1+r)^i}$	<i>NPV (Net Present Value)</i> – найбільш універсальний і найбільш поширений з фінансово-економічних показників оцінки інвестиційних проектів. На відміну від витрат за термін служби, враховує не тільки витрати протягом життєвого циклу, а й ефект від реалізації заходів (що досягається економією). При заданій нормі дисконту, витрати і доходи в майбутніх періодах <i>NPV</i> (формула показує, який грошовий потік принесе проект за конкретний період). Являє собою суму чистої економії за весь розрахунковий період з урахуванням зміни вартості грошей.
$NPVQ = \frac{NPV}{Inv}$	Для порівняння проектів зі схожими показниками <i>NPV</i> застосовується індекс рентабельності (<i>NPVQ</i>) (формула (2.2), що відображає дохід у розрахунку на одиницю інвестицій і являє собою відношення дисконтованих доходів до дисконтованих витрат по реалізації проекту. (де <i>n</i> – кількість років в періоді; <i>i</i> – поточний рік; <i>Inv</i> – інвестиції в проект; <i>E_i</i> – економія за період; <i>C_i</i> – поточні витрати за період; <i>r</i> – норма дисконту)
$Inv = \sum_{i=1}^n \frac{(E_i - C_i)}{(1 + IRR)^i}$	Завдяки цій формулі, що відображають інвестиції в проект, можна знайти важливий показник внутрішню норму прибутковості <i>IRR (Internal Rate of Return)</i> , яка дорівнює нормі дисконту, при якій сума дисконтованих притоків грошових коштів дорівнює величині дисконтованих відтоків грошових коштів за розрахунковий період, тобто <i>NPV = 0</i> . По суті цей показник характеризує рентабельність проекту з урахуванням різночасності доходів і витрат, зростання цін, виплати податків і т.д. <i>IRR</i> – це значення норми дисконтування.
$DPP = \sum_{i=1}^n \frac{Inv}{(1+r)^i}$	<i>DPP</i> визначає той період, коли сума наведеної чистої приведенної економії перевищить інвестиції, настане дисконтований термін окупності проекту. Величину перевищення ефекту над інвестиціями (або від'ємне значення недосягнення суми економії початкових витрат) в конкретному майбутньому періоді показує <i>NPV</i> проекту в цьому періоді.

Оцінювання доцільності впровадження того чи іншого заходу з підвищення енергетичної ефективності здійснюється графічним способом на основі двох показників – відношення початкових та кінцевих технічних параметрів та індексу рентабельності $NPVQ$.

На основі отриманих значень будується діаграма залежності $NPVQ$ від значення співвідношення технічних показників (рис. 2).

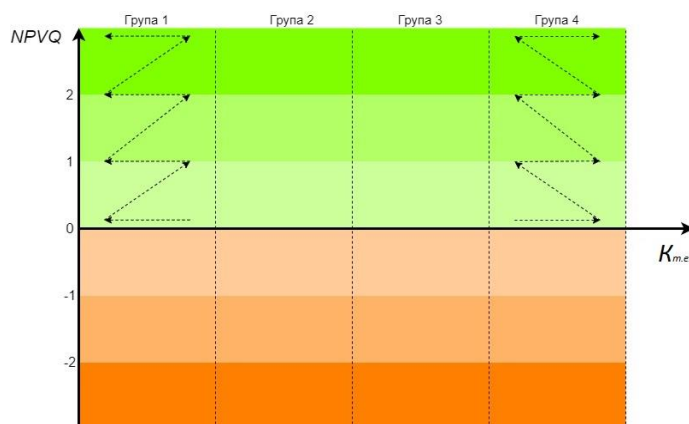


Рисунок 2 – Діаграма залежності $NPVQ$ та коефіцієнта технічної ефективності

Після нанесення точок, що відповідають значенням $NPVQ$ та відношенням технічних показників утворюється матриця точок, які відповідають конкретним енергозберігаючим заходам у певній групі. Порівнюючи положення точок, що відповідають заходам, відносно осей координат, враховуючи специфіку впровадження заходів та значення технічних показників, серед декількох заходів однієї групи обирається той, який є найбільш ефективним, і, відповідно, найбільш доцільним.

У випадку, якщо два чи більше заходів потрапляють в зону найбільшої ефективності і між ними потрібно зробити вибір, до критеріїв вибору запропоновано додати залежність NPV від дисконтованого терміну окупності DPP . Вибір між двома такими заходами також зручно здійснювати, оцінивши їх параметри графічним способом, використовуючи діаграму, зображену на рисунку 3.

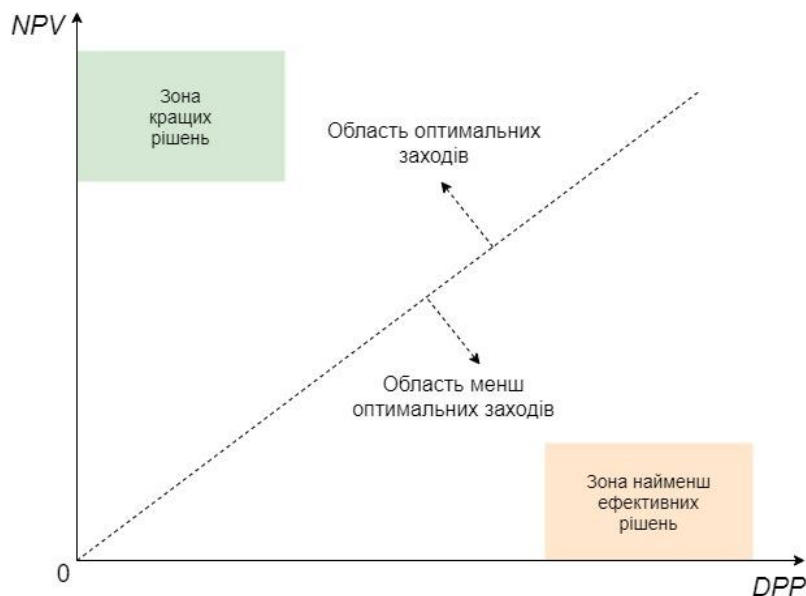


Рисунок 3 – Діаграма для порівняння ефективності заходів однієї групи

Як видно із діаграми, множину потенційних заходів можна графічно розподілити на дві частини – область найбільш оптимальних заходів та область менш оптимальних заходів, і в залежності від області, в яку потрапляє захід згідно його розрахункових параметрів, можна зробити висновок про доцільність впровадження того чи іншого заходу.

Так ми отримуємо наведені (дисконтовані) суми грошового потоку в кожному з майбутніх періодів протягом життєвого циклу проєкту. Потім обчислюємо їх накопичувальну суму по роках і порівнюємо з

початковими інвестиціями. До числа пріоритетних проєктів з точки зору фінансового аналізу необхідно віднести ті, у яких максимальний чистий дисконтований дохід (*NPV*) або індекс прибутковості інвестицій (*IRR*) поєднується з мінімальним дисконтованим терміном окупності (*DPP*).

Однак для об'єктивного оцінювання доцільності та ефективності впровадження заходів з підвищення енергоефективності необхідно розглядати технічні та фінансові показники комплексно.

Для коректного порівняння різних варіантів вони наводяться в зіставних умовах. Приведемо приклад розрахунку економічних показників для заходів, розглянутих в таблиці 3. Нарівні з розрахунком кількісних ефектів необхідно експертно враховувати і якісні (поліпшення мікроклімату, підвищення комфорту і т.п.).

На основі результатів енергетичних аудитів в будівлях комунальної сфери приведемо приклади розрахунку значення економії енергоносіїв та зміни технічних характеристик огорожувальних конструкцій, інженерних систем, кліматичних умов до та після впровадження ряду заходів з підвищення енергетичної ефективності.

За основу взято будівлю з термічним опором зовнішніх стін $R_0=1,38(\text{м}^2\cdot\text{К})/\text{Вт}$. В подальшому саме значення термічного опору використовуватиметься для комплексного оцінювання доцільності впровадження заходів.

Розрахунок та аналіз всіх параметрів оцінювання заходів з енергозбереження будівлі наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Параметри оцінювання заходів з енергозбереження будівлі [6,7,9].

Група заходів	Захід	$K_{т.е.}$	NPVQ	NPV, грн	DPP, років, місяців
Підвищення термічного опору	1. Утеплення зовнішніх стін	0,34	0,12	57 162,63	11,7
	2. Заміна вікон	0,84	0,07	4 560,12	12,3
Підвищення ККД системи опалення	3. Модернізація ІТП	0,067	3,10	1 726 455,7	2,7
	4. Промивка системи опалення	0,91	2,7	416 546,1	2,10

Наступним кроком знаходяться відношення початкових та кінцевих технічних показників для кожного заходу з підвищення енергоефективності у кожній групі, відповідно.

Наприклад, для групи заходів, що збільшують термічний опір огорожувальних конструкцій, знаходиться відношення початкового значення термічного опору та термічного опору після впровадження енергозберігаючих заходів. В групу заходів може входити, наприклад, теплова ізоляція зовнішніх стін та заміна вікон, які і будуть порівнюватися за своєю доцільністю та ефективністю впровадження.

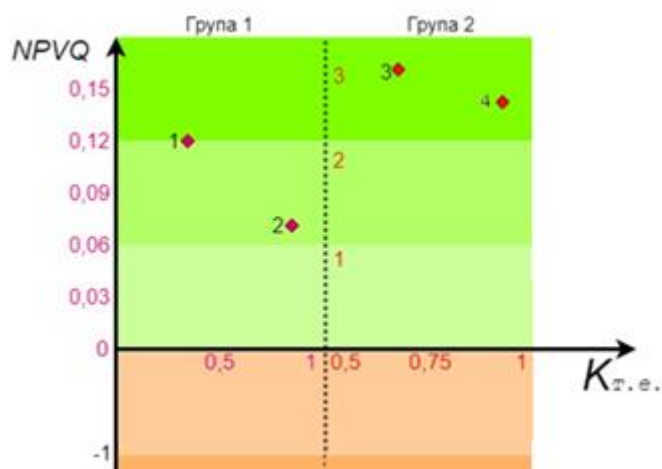


Рисунок 4 – Діаграма розподілу заходів за рівнем доцільності їх впровадження

На діаграмі (рим. 4) графічно зображено розташування точок, що відповідають заходам із таблиці 3. Виходячи із положення точок, можна зробити висновок, що найдоцільнішими для впровадження будуть заходи під номером 1 та 3 у першій та другій групах, відповідно.

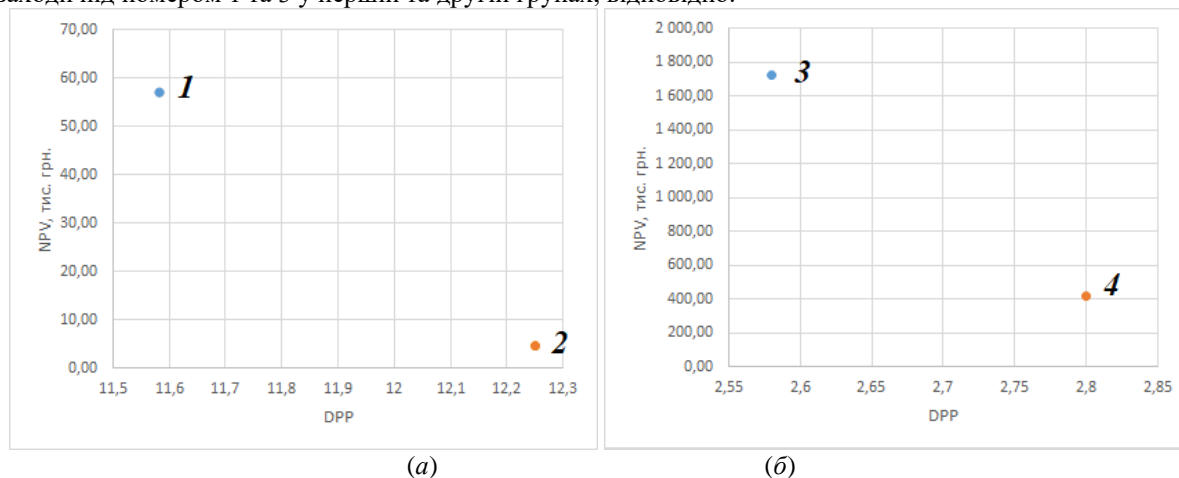


Рисунок 5 – Порівняння заходів (а) групи підвищення термічного опору; (б) групи підвищення ККД системи опалення.

Однак, бувають випадки, зробити чіткий висновок доволі складно, як у випадку із заходами другої групи. В таких випадках варто застосувати метод оцінювання за допомогою відношення NPV до дисконтованого терміну окупності DPP , побудувавши діаграму рисунку 5.

Оцінювання доцільності впровадження того чи іншого заходу з підвищення енергетичної ефективності здійснюється графічним способом на основі двох показників – відношення початкових та кінцевих технічних параметрів та індексу рентабельності $NPVQ$. Тому, проаналізувавши показники наведених заходів найефективнішим в даному випадку є модернізація ТП.

Висновки

Розглянуті динамічні методи оцінки доцільності впровадження заходів з підвищення енергетичної ефективності у будівлях комунальної сфери дають змогу більш точно оцінити фінансові показники за час життєвого циклу будівлі. Визначено, що на розрахунковій моделі впливають внутрішні та зовнішні фактори та складність точного визначення майбутніх грошових надходжень від кожного окремого заходу.

У той же час, разом з економічними факторами також слід враховувати і технічні. Запропонований у даній роботі алгоритм оцінювання доцільності впровадження заходів з підвищення енергетичної ефективності у будівлях комунальної сфери дає змогу комплексно оцінити технічні та економічні показники при аналізі окремих заходів. Даний алгоритм ґрунтується на застосуванні графічних моделей комплексного представлення технічних та економічних показників. Тому його використання допоможе прийняти рішення щодо впровадження саме таких заходів з підвищення енергетичної ефективності, які дозволять не лише зекономити кошти, окупити інвестиції, але й підвищити рівень комфорту перебування в будівлях та досягти рівня мінімальних вимог чинних нормативно-правових актів.

Список використаної літератури

1. Про енергетичну ефективність: Закон України від 17 груд. 2020 р. №4507. URL: http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=70687 (дата звернення: 21.10.2021).
2. Додонов Б. Моніторинг енергоефективності України 2015. URL: https://www.ua.undp.org/content/ukraine/uk/home/library/environment_energy/energy_efficiency_ukraine2015.html
3. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, «НЕК «Укренерго», Науково-технічний центр електроенергетики. Аналіз ефективності використання енергоресурсів у розвинених зарубіжних країнах і залежність від їх імпорту. URL: https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/1.-Efektyvnist_eng_resursiv.pdf
4. Указ президента України Про стратегію сталого розвитку “Україна – 2020”. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5/2015#Text>
5. ДИРЕКТИВА ЄВРОПЕЙСЬКОГО ПАРЛАМЕНТУ І РАДИ 2009/125/ЄС від 21 жовтня 2009 року про рамки для встановлення вимог до екодизайну для пов’язаних з енергоспоживанням продуктів (нова редакція). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011-09#Text

6. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 25 листопада 2015 р. № 1228-р Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2020 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1228-2015-%D1%80#Text>

7. Навчальний посібник для посадових осіб місцевого самоврядування. Енергоефективність в муніципальному секторі. URL: <https://enecities.org.ua/upload/files/3energoefweb%281%29.pdf>

8. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України «НЕК «Укренерго» Науково-технічний центр електроенергетики. Законодавче та нормативно-правове стимулювання підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів у провідних зарубіжних країнах. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2017/05/1.Zakonodavche-stymulyuvannya-energoefektyvnosti.pdf>

9. Закон України Про енергозбереження. Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1994, № 30, ст.283. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80#Text>

D. Derevinko^{1,2}, Ph. D, Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-4877-5601

S. Zaichenko¹, Doctor of Technical Science, Prof., ORCID 0000-0002-8446-5408

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

N. Bospala², ORCID 0000-0002-4466-6491

²Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

METHODS OF THE FEASIBILITY EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY MEASURES IN COMMUNAL BUILDINGS

The paper is devoted to the peculiarities of determining the feasibility of analyses of the energy efficiency improvement measures for communal buildings with the help of economic and technical indicators. The considered dynamic methods of estimation of aforementioned measures for energy efficiency increase in buildings of municipal sphere allow to receive more exact financial indicators during a life cycle of the building. It is determined that the calculation models are influenced by internal and external factors and the difficulty of accurately determining future cash flows from each individual event is noted.

An algorithm for assessing the feasibility of implementing the measures to improve energy efficiency in communal buildings is proposed. This algorithm allows to comprehensively assess the technical and economic indicators in the analysis of individual measures of the energy efficiency improvement. This algorithm is based on the use of graphical models of the complex representation of technical and economic indicators. Its use helps the procedure of the analyses before the implementation of energy efficiency measures, which allows not only to save investment, but also to increase the level of comfort in buildings and reach the level of minimum requirements of current regulations.

Key words: energy efficiency of buildings, energy saving, a set of measures to improve energy efficiency, energy resources, buildings, static and dynamic indicators.

References

1. On energy efficiency: Law of Ukraine of 17 December. 2020 №4507. URL: http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=70687 (access date: 21.10.2021).

2. Dodonov B. Energy Efficiency Monitoring of Ukraine 2015. URL: https://www.ua.undp.org/content/ukraine/uk/home/library/environment_energy/energy_efficiency_ukraine2015.html

3. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine, NEC Ukrenenergo, Scientific and Technical Center of Electric Power Industry. Analysis of energy efficiency in developed foreign countries and dependence on their imports. URL: https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/1.-Efektyvnist_energ_resursiv.pdf

4. Decree of the President of Ukraine on the Sustainable Development Strategy "Ukraine - 2020". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5/2015#Text>

5. DIRECTIVE 2009/125 / EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 October 2009 on a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-using products (new version). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011-09#Text

6. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of November 25, 2015 № 1228-r On the National Action Plan on Energy Efficiency until 2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1228-2015-%D1%80#Text>

7. Training manual for local government officials. Energy efficiency in the municipal sector. URL: <https://enecities.org.ua/upload/files/3energoefweb%281%29.pdf>

8. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine NEC Ukrenenergo Scientific and Technical Center of Electric Power Industry. Legislative and regulatory incentives to increase the efficiency of energy use in leading foreign countries. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2017/05/1.Zakonodavche-stymulyuvannya-energoefektyvnosti.pdf>

9. Law of Ukraine on Energy Conservation. Information of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR), 1994, № 30, p.283. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80#Text>

Надійшла 18.01.2022

Received 18.01.2022

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.311.153

DOI

Калінчик В.П., канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000 - 0003- 4028- 0185

Мейга О. В., канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-4132-5202

Калінчик В.В., канд. техн. наук, ORCID 0000 - 0003- 3931- 646X

Чуняк Ю.М., ORCID 0000 - 0002- 4506 – 912X

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АДАПТИВНІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВИРОБНИЧИХ СПОЖИВАЧІВ

В статті досліджуються моделі та методи прогнозування електричного навантаження. Показано, що на даний час відомі наступні методи управління електроспоживанням: по миттєвій нормі; по ідеальній нормі; управління по прогнозній величині; управління з використанням усередненої потужності на рухомому інтервалі часу (метод «рухомого вікна»). Показано, що кращою представляється орієнтація на ті методи, які засновані на дослідженні прогнозних оцінок, що складають вихідну інформацію для прийняття рішень з управління. Основною вимогою, що пред'являються до систем реального часу є: достатньо висока точність оперативного прогнозування та простота алгоритмів, що забезпечує мінімальний час рішення; робота в умовах невизначеної і недостатньої інформації, забезпечення стійкості управління. Проведено аналіз робіт, присвячених питанням прогнозування процесів систем управління електроспоживанням промислових підприємств. Показано, що автоматизовані системи управління пред'являють специфічні вимоги до математичних методів прогнозу через малу вивченості природи прогнозованого параметра, малого обсягу звітної статистики та недостатньої достовірності вихідної інформації і найбільш точно відповідає таким вимогам, адаптивний підхід до конструювання методів. Адаптивний підхід дозволяє вирішувати проблему адекватності методу об'єкту прогнозування і з точки зору простоти реалізації і часу розрахунків на перше місце слід поставити адаптивні методи прогнозування і, в першу чергу, метод експоненціального згладжування. Експоненціальне згладжування, розглянуте у даній роботі в якості прогнозної моделі, дозволяє виявити неадекватність моделі реальному процесу і наблизити оцінку детермінованої основи процесу до дійсної, тобто зменшити помилку прогнозу. Однак для цього необхідний час, який збільшується із зростанням зміни коефіцієнтів моделі. У зв'язку з цим виникає завдання регулювання швидкості реакції прогнозованої моделі на зміну її коефіцієнтів. Розглянуто і проаналізовано ряд методів автоматичного регулювання параметра згладжування: еволюційний метод адаптації, методи з використанням слідкуючого сигналу, методи адаптації параметра шляхом, оптимізація з використанням градієнтного згладжування. Показано, що метод адаптації використанням слідкуючого сигналу простий і особливо цінний для моделювання рядів з короткою історією. З причини своєї простоти, цей метод особливо зручний там, де прогнози робляться за допомогою засобів обчислювальної техніки. Дослідження даної моделі прогнозування на статистичних даних, отриманих на різних підприємствах показали, що модель адаптується до реальних даних вже на 4-6 кроці прогнозування і далі помилка прогнозу не перевищує 2%. Аналіз адаптивних моделей прогнозування на основі методу експоненціального згладжування показав їх високу ефективність і хорошу пристосованість до змін процесу електроспоживання. Найбільшу складність при прогнозуванні представляють випадки стрибкоподібних змін у розвитку процесу. Стрибкоподібні зміни процесу можуть призвести до порушення існуючих раніше якісних співвідношень параметрів прогнозованої системи. При наявності стрибка дуже важливо оцінити чи викликано дане відхилення перешкодою чи воно сталося внаслідок зміни прогнозованого процесу. Якщо зміни викликані перешкодою, то необхідно її відфільтрувати. Якщо ж відхилення викликані зміною моделі, то поточні дані про процес представляють найбільшу цінність. З точки зору швидкого відпрацювання стрибкоподібної зміни досить ефективною є модель експоненціального згладжування з високим значенням параметра згладжування. Однак ця модель сильно схильна до впливу перешкод. Для усунення зазначеної обставини запропонована модифікована процедура корекції параметрів моделі прогнозування. Процедура основана на введенні логічного оператора, який заснований на аналізі суперечливості прогнозів і накладає додаткові обмеження на зміну параметра згладжування і на величини вихідної статистики. Проведені експериментальні дослідження розглянутих моделей.

Ключові слова: електричне навантаження, управління, прогноз, адаптивні моделі, експоненціальне згладжування.

Вступ. Управління електричним навантаженням промислових об'єктів за рахунок виділених споживачів-регуляторів стає важливим у вирівнюванні графіків навантажень енергосистем і відповідно підвищення техніко-економічних показників.

На промислових підприємствах, як правило, можливе дискретне відключення виділених навантажень споживачів-регуляторів. Можливість плавної зміни потужності навантажень зустрічається досить рідко. Диспетчерське або автоматичне управління електроспоживанням підприємства передбачає відключення певної величини навантаження при загрозі перевищення заданого максимуму і відновлення навантаження при зникненні такої загрози. Встановлено три черги відключення: першу становлять найменш потрібні з технологічної та іншої точок зору споживачі; другу - навантаження, що відключають із найменшим збитком для підприємства, і третю - навантаження допустимі для відключення з погляду технологічного процесу. Можуть бути й інші варіанти, які допустимі індивідуально для кожного підприємства.

На даний час відомі наступні методи управління електроспоживанням: по миттєвій нормі; по ідеальній нормі; управління по прогнозній величині; управління з використанням усередненої потужності на рухомому інтервалі часу (метод "рухомого вікна").

Системи управління із прогнозом вважаються найкращими, так як вони забезпечують найбільш повне використання заданого максимуму потужності та енергії.

Метою роботи є аналіз та вибір із відомих методів прогнозування електричного навантаження найбільш підходящого для вирішення задачі управління електроспоживанням.

Аналіз методів прогнозування електроспоживання. Будь-який метод управління містить два основних етапи: етап визначення можливих величин і етап вироблення і реалізації керуючих впливів. Кращою представляється орієнтація на ті методи, які засновані на дослідженні прогнозних оцінок, що складають вихідну інформацію для прийняття рішень з управління.

Принцип управління по прогнозу показаний на рисунку 1.

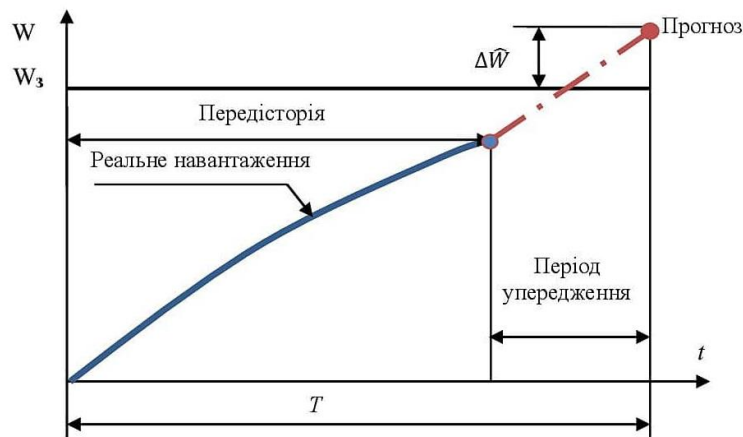


Рисунок 1 – Управління електроспоживанням по прогнозу

Основною вимогою, що пред'являються до систем реального часу є: достатньо висока точність оперативного прогнозування та простота алгоритмів, що забезпечує мінімальний час рішення; робота в умовах невизначеної і недостатньої інформації, забезпечення стійкості управління.

У вітчизняній та зарубіжній літературі є значний обсяг робіт, присвячених питанням прогнозування процесів систем управління електроспоживанням промислових підприємств. В аналізованих літературних джерелах використовуються різні математичні методи прогнозування.

Так, в роботі [1-4] при прогнозуванні процесів застосований статистичний метод з використанням лінійної множинної регресії. У роботі [5] прогнозування випадкового процесу здійснено на основі розкладання його в гармонійний ряд і застосування фільтра Калмана з урахуванням кореляції між шумами в моделі.

Імовірнісні методи моделювання при прогнозуванні застосовані в [6,7]. В роботі [8] при прогнозуванні використаний метод спектрального аналізу. Для 10 хвилинного короткострокового прогнозування з інтервалом попередження 5хвилин в роботах [9-12] використовуються авторегресійних і динамічні моделі з застосуванням фільтра Калмана.

Метод рухомої середньої для короткострокового прогнозування застосований в [10].

Для прогнозування часових рядів у роботі [13] використовується метод Бокса-Дженкінса. При цьому довжина передісторії становить більше 70 рівнів часового ряду, для модифікованого методу - до 25

значень. Потрібно відзначити, що і модифікований метод досить складний і вимагає великого обсягу обчислень при його реалізації.

У роботі [14] застосовано метод селекції для прогнозування часових рядів. Визначено клас у складі 58 моделей, що найбільш повно відображають динаміку зміни параметра. Даний метод забезпечує високу точність прогнозування. Однак він не може задовольняти системам реального часу за швидкістю, обсягом пам'яті та складності.

Алгоритми прогнозування на базі байєсівських процедур розглядаються в [15]. Для зниження викидів використовуються окремі процедури і алгоритм управління ними базується на методах прогнозування в темпі процесу.

Процедура розпізнавання образів використовується для прогнозу в [16]. Принцип складання прогнозу полягає в тому, що знаходиться середнє арифметичне значення з тих значень, які увійшли до результуючий клас. Зазначена процедура ефективна тільки для здійснення прогнозів з глибокої передісторією з використанням потужних засобів обчислювальної техніки.

У роботах [3,9,17] прогнозування ведеться з урахуванням метеорологічних і виробничих факторів, враховуються сезонні зміни параметрів. При цьому, використовуються методи гармонічного аналізу, рухомої середньої, експоненціального згладжування, авторегресійних моделі.

Для короткострокового прогнозу в роботі [18] застосовано поліноміальні моделі. Застосуванню методу експоненціального згладжування присвячені роботи [19-25].

Якість прогнозу за методом експоненціального згладжування істотно залежить від вибору постійної згладжування. З одного боку, для збільшення ваги найбільш пізніх спостережень необхідно підвищувати величину постійної згладжування. З іншого боку, для зменшення впливу перешкод постійна згладжування повинна бути малою. Видно, що ці дві вимоги знаходяться у протиріччі. Це протиріччя усувається при використанні адаптивних методів короткострокового прогнозування.

Як показано в [26-28], автоматизовані системи управління пред'являють специфічні вимоги до математичних методів прогнозу внаслідок малої вивченості природи прогнозованого параметра, малого обсягу звітної статистики та недостатньою достовірності вихідної інформації.

Найбільш точно відповідає вимогам, які пред'являються до оперативних систем прогнозу, адаптивний підхід до конструювання методів. Адаптивний підхід дозволяє вирішувати проблему адекватності методу об'єкту прогнозування [28].

Метод екстраполяції звичайних регресійних кривих вже містить певний елемент адаптивності, коли з кожним новим отриманням даних параметри регресійних кривих перераховуються. Через досить великий проміжок часу може бути замінений навіть тип кривої. Однак у таких моделях ступінь адаптації незначна. Швидкість адаптація можна збільшити за допомогою вагових коефіцієнтів, що зменшуються геометрично. Однак громіздкий перерахунок параметрів регресійних кривих з отриманням кожної нової точки вимагає повторного залучення у процедуру обчислень всього обсягу інформації, що веде до значного збільшення обсягу оперативної пам'яті обчислювального пристрою.

Застосування динамічних моделей для вирішення завдань поставлених у цій роботі важко в силу їх великої складності і необхідності досить значних статистичних даних.

Застосування оптимальних фільтрів для прогнозування (фільтри Вінера-Хопфа, Калмана) пов'язане з громіздкими обчислювальними операціями і необхідністю зберігання значного обсягу статистичних даних.

Прогнозування з використанням поліномів певної міри не може адекватно відобразити досліджуванний процес. У зв'язку з цим необхідно, щоб обрана модель дозволяла, як можна точніше описувати поточні дані про процес і могла бути перебудована при зміні процесу в часі, тобто модель прогнозу повинна адаптуватися по ходу зміни процесу.

При оперативному прогнозі необхідна ступінь чутливості методу до різного роду змін прогнозованого показника.

Переваги тих чи інших методів прогнозування [29] визначаються в основному часовими характеристиками програм і точністю прогнозів. При цьому можна показати [30], що адаптивний метод фільтра Калмана, експоненціальне згладжування, метод авторегресії для одновимірних процесів зводяться один до одного, і можна знайти відповідні співвідношення між дисперсією шуму динаміки в марківській моделі і в моделі авторегресії та параметром згладжування в методі експоненціального згладжування. Тому точність названих методів навряд чи буде істотно відрізнятися [30]. Тим часом з точки зору простоти реалізації і часу розрахунків на перше місце слід поставити адаптивні методи прогнозування і, в першу чергу, метод експоненціального згладжування, що узгоджується з дослідженнями проведеними в роботах [19-25].

Використання експоненціального згладжування для прогнозування електроспоживання. Експоненціальне згладжування засноване на тому, що прогнозоване значення функції може бути виражено рядом Тейлора [31]:

$$x_{t+\tau} = \sum_{k=0}^n \frac{\tau^k \cdot x_t^{(k)}}{k!} = \sum_{k=0}^n \frac{\tau^k \cdot a_{k+1}}{k!}. \quad (1)$$

Експоненціальна середня довільного p -го порядку визначається як

$$S_t^{[p]} = \alpha \cdot S_t^{[p-1]} + \beta \cdot S_{t-1}^{[p]}, \quad (2)$$

де $\beta = 1 - \alpha$, $p = 1, 2, \dots, n$, $S_0^{[1]}, S_0^{[2]}, \dots, S_0^{[n]}$ – початкові значення експоненціальних середніх.

Виходячи з фундаментальної теореми експоненціального згладжування і прогнозування, доведеною Р. Брауном і Р. Майером [20], коефіцієнти a_0, a_1, \dots, a_{n+1} прогнозуючого полінома пов'язані з експоненціальними середніми співвідношенням

$$\tilde{S}_t = M \cdot \tilde{a}_t \quad (3)$$

де \tilde{S}_t – вектор-стовпець розміром $(p \times 1)$ згладжених значень параметра, \tilde{a}_t – вектор-стовпець розміром $[(n+1) \times 1]$ коефіцієнтів в розкладанні Тейлора, M – матриця розміром $[p \times (n+1)]$.

Вектор невідомих коефіцієнтів з урахуванням (3) знаходиться за формулою

$$\tilde{a}_t = M^{-1} \cdot \tilde{S}_t \quad (4)$$

де M^{-1} – матриця, зворотна матриці M .

При прогнозуванні процесів системи управління охороною праці передбачається, що тренд представляється поліномом і спостерігається при наявності шуму, тобто

$$x_t = \hat{x}_\tau(t) + \varepsilon_t \quad (5)$$

де ε_t – білий шум, а прогнозна модель має вигляд

$$\hat{x}_\tau(t) = \sum_{i=0}^n \hat{a}_i t^i \quad (6)$$

Оцінки невідомих коефіцієнтів \hat{a}_i поліноміальної моделі знаходять з виразу (6).

Якість прогнозуємої моделі в значній мірі визначається її точністю, яка є мірою адекватності майбутнього процесу з його оцінкою. Враховуючи, що спостереження за реальним процесом проводиться в умовах перешкод, вірогідність отримання абсолютного точного прогнозу дуже мала. У зв'язку з цим вводиться область прогнозованих значень процесу

$$\hat{W}_j - t_q \sqrt{D(\delta)} \leq W_j \leq \hat{W}_j + t_q \sqrt{D(\delta)}, \quad (7)$$

де $D(\delta)$ – дисперсія помилки прогнозу.

Адаптація параметра згладжування. При правильно обраній прогнозній моделі, що відповідає детермінованій основі процесу, математичне очікування помилок прогнозу при нульовому математичному очікуванні перешкоди дорівнює нулю. Проте вигляд апріорно обраної моделі не завжди відповідає дійсному. Крім того, можливі такі зміни коефіцієнтів моделі, при яких може виникнути ситуація, коли за час, поки система забезпечить оцінку новій основі процесу з необхідною точністю, з'являється неприпустимо великі помилки прогнозу [32].

Експоненціальне згладжування, розглянуте у даній роботі в якості прогнозної моделі, дозволяє виявити неадекватність моделі реальному процесу і наблизити оцінку детермінованої основи процесу до дійсної, тобто зменшити помилку прогнозу. Однак для цього необхідний час, який збільшується із зростанням зміни коефіцієнтів моделі. У зв'язку з цим виникає завдання регулювання швидкості реакції прогнозованої моделі на зміну її коефіцієнтів.

Відомо ряд методів автоматичного регулювання параметра згладжування: методи з використанням слідкуючого сигналу, методи адаптації параметра шляхом еволюції [31], оптимізація з використанням градієнтного згладжування [33].

Суть еволюційного методу адаптації, запропонованого У. Чоу, полягає в тому, що використовується три значення параметра: високе, нормальне, низьке, тобто:

$$0,05 \leq \alpha - h, \quad \alpha, \quad \alpha + h \leq 0,95, \quad (8)$$

де $h=0,05$ – крок еволюції параметра; α – нормальне значення параметра; $(\alpha - h)$ – низьке значення параметра; $(\alpha + h)$ – високе значення параметру.

Ці значення спочатку вибираються довільно, а потім модифікуються в міру просування моделі у часі. Недоліком методу У. Чоу є те, що на кожному кроці обчислюються три прогнози, в результаті кількість даних оброблюваних системою значно збільшується. При цьому швидкість адаптації незначна.

Метод градієнтного експоненціального згладжування заснований на градієнтному пошуку мінімального середньоквадратичного відхилення (СКВ). Якщо СКВ $E[e^2(t)]$ представлено як функція від α , то можна обчислити градієнт

$$\nabla = \frac{\partial E[e^2(t)]}{\partial \alpha}, \quad (9)$$

де $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ – помилка прогнозу.

Постійну згладжування $\hat{\alpha}$ можна модернізувати як

$$\hat{\alpha}(t+1) = \hat{\alpha}(t) - \mu \nabla, \quad (10)$$

де $\mu > 0$ – постійна згладжування.

Формула (10) і представляє собою метод градієнтного пошуку.

Умова (9) визначає вибір α , при цьому передбачається, що якщо $|\alpha|$ близько до 1, то значення $\mu \leq 0$, а конвергенція - повільна.

До недоліків даного методу варто віднести досить громіздкий обсяг обчислень.

Метод прогнозування з використанням слідкуючого контрольного сигналу для адаптації параметра згладжування, запропонований Д. Трігом і А. Лічом [34,35].

Вироблення керуючого впливу засновано на розрахунку слідкуючого сигналу помилки згладжування. $Q(t)/\Delta(t)$. Згладжені помилки прогнозу $Q(t)$ і абсолютне відхилення $\Delta(t)$ визначаються з виразів:

$$Q(t) = \gamma \cdot e(t) + (1 - \gamma) \cdot Q(t - 1), \quad (11)$$

$$\Delta(t) = \gamma|e(t)| + (1 - \gamma)\Delta(t - 1), \quad (12)$$

де $e(t)$ – помилка прогнозу; γ – згладжуюча константа.

Очевидно, що слідкуючий сигнал $Q(t)/\Delta(t)$ укладений між -1 і $+1$.

Для введення "автоматичного" зворотного зв'язку пропонується в якості постійної згладжування використовувати модуль слідкуючого сигналу, тобто

$$\alpha(t) = \left| \frac{Q(t)}{\Delta(t)} \right|. \quad (13)$$

Стратегія такої адаптації заснована на тому, що збільшення постійної згладжування здійснюється, коли слідкуючий сигнал, збільшуючись, підвищує значення останнього, з часового ряду параметра, що дозволяє системі швидко реагувати на зміну процесу і стежити за новим сигналом. Таким чином, має місце негативна зворотній зв'язок.

Розглянутий метод адаптації простий і особливо цінний для моделювання рядів з короткою історією. З причини своєї простоти, цей метод особливо зручний там, де прогнози робляться за допомогою засобів обчислювальної техніки. Дослідження даної моделі прогнозування на статистичних даних, отриманих на різних підприємствах [35] показали, що модель адаптується до реальних даних вже на 4-6 кроці прогнозування і далі помилка прогнозу не перевищує 2%. Тому інтервал випередження на один крок повинен бути $\Delta t = (T - \theta)/4 \div 6$.

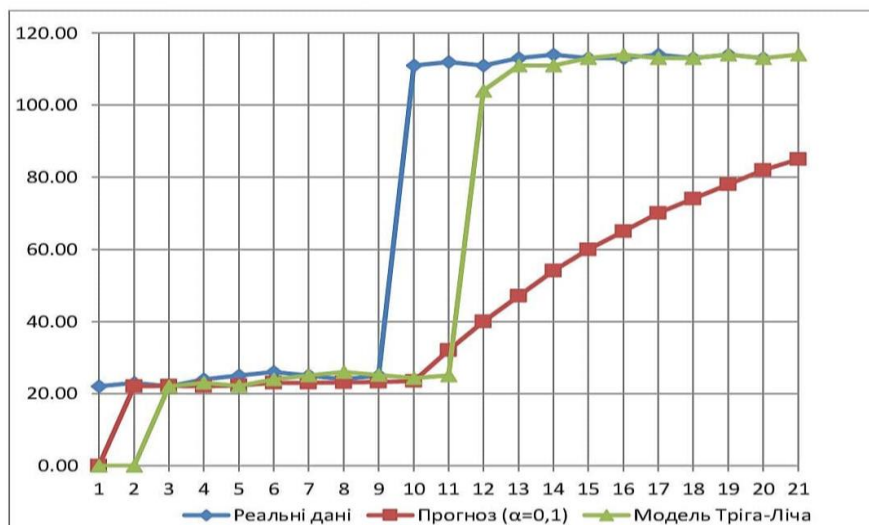


Рисунок 2 – Результати прогнозування електричного навантаження за моделями експоненціального згладжування без адаптації α і з адаптацією α (модель Тріга-Ліча)

На рисунку 2 показані результати прогнозування електричного навантаження. Дослідження показали, що середньоквадратична помилка (СКП) прогнозування із застосуванням моделі без адаптації для $\alpha=0,1$ становить $e^2 = 42$ тоді як СКП із застосуванням моделі з адаптацією α становить $e^2 = 18$, що підтверджує перевагу останньої.

Модифікована процедура адаптації параметрів моделі прогнозування. Аналіз адаптивних моделей прогнозування на основі методу експоненціального згладжування показав їх високу ефективність і хорошу пристосованість до змін процесу електроспоживання.

Найбільшу складність при прогнозуванні представляють випадки стрибкоподібних змін у розвитку процесу. Стрибкоподібні зміни процесу можуть призвести до порушення існуючих раніше якісних співвідношень параметрів прогнозованої системи. При наявності стрибка дуже важливо оцінити викликано дане відхилення перешкодою чи воно сталося внаслідок зміни прогнозованого процесу. Якщо

зміни викликані перешкодою, то необхідно її відфільтрувати. Якщо ж відхилення викликані зміною моделі, то поточні дані про процес представляють найбільшу цінність.

З точки зору швидкого відпрацювання стрибкоподібної зміни досить ефективною є модель експоненціального згладжування з високим значенням параметра α . Однак ця модель сильно схильна до впливу перешкод.

Якщо стрибок представляє собою перехід прогнозованої системи з одного стійкого стану в інший, то модель експоненціального згладжування з корекцією параметра α має найкращу пристосованість до такого роду змін. У той же час зміни типу "імпульс" відпрацьовуються моделлю з певною затримкою, що призводить до збільшення середньоквадратичної помилки прогнозу.

Поява стрибка призводить до великих помилок (позитивних) прогнозу, що в свою чергу веде до збільшення $Q(t)$ і $\Delta(t)$ і, як наслідок, до збільшення параметра $\alpha(t)$. Проте при появі великих негативних помилок, згладжена помилка прогнозу $Q(t)$ за абсолютною величиною зменшується і в результаті визначений параметр $\alpha(t)$ може виявитися навіть менше попереднього. Тому реакція моделі на зміну $\alpha(t)$ сповільнюється. Вказана обставина може бути усунена шляхом використання адаптивних моделей для сезонних даних [36]. Однак такі моделі прийнятні лише для даних з відомим параметром циклу.

Для усунення зазначеної обставини запропонована модифікована процедура корекції параметрів моделі прогнозування.

Процедура основана на введенні логічного оператора $\nabla(t)$, який накладає додаткові обмеження на зміну параметра $\alpha(t)$ і на величини вихідної статистики, тобто на величини $Q(t)$ і $\Delta(t)$.

Для нормального закону розподілу розкид прогнозованих параметрів визначається відповідно до вираження (10). Дані далеко віддалені від середнього значення вважаються абсолютно випадковими або вказують на зміну характеру розвитку процесу.

Відповідно до [32] суперечливим вважається прогноз, для якого виконується нерівність

$$|x(t) - \hat{x}(t)| > \beta \sqrt{\bar{e}^2(t)}, \quad (14)$$

де β – табличний коефіцієнт, $\bar{e}^2(t)$ – середньоквадратична помилка прогнозу.

Проте критерій (31) при визначенні суперечливості прогнозу не завжди може дати позитивний результат особливо при прогнозуванні стрибків. Наявність стрибків представляє собою перехід системи з одного стійкого стану в інше. Причому вихідну інформацію для прогнозування таких процесів слід отримувати з систем більш низького рівня. Це означає, що на окремих ділянках при наявності стрибків допускається зміна параметрів моделі прогнозування у відповідних межах.

Відповідно до [32] на початку вихідної статистики слід використовувати функції з запізнілих аргументом, тобто критерій суперечливості прогнозів набуде вигляду.

$$|x(t) - \hat{x}(t)| > \beta \sqrt{\bar{e}^2(t-1)}. \quad (15)$$

Стрибок в параметрах прогнозуючої системи розглядається як втрата стійкості системи і перехід її до нового стійкого стану.

Показником стійкості прогнозуючої системи слід вважати отримання несуперечливих прогнозів. Індикатором суперечливості прогнозу, його якості є середньоквадратична помилка.

В адаптивних моделях прогнозу середньоквадратична помилка є основою для переходу прогнозуючої системи з одного стійкого стану в інше. Однак як статистику показник $\bar{e}^2(t)$ для нестійких станів системи слід виключити. Тобто для всіх k суперечливих прогнозів в якості статистики слід приймати $\bar{e}^2(t-k)$.

Суть розглянутої процедури модифікації параметра згладжування α полягає в наступному. Для визначення згладженої помилки прогнозу $Q(t)$ і згладженого абсолютного відхилення $\Delta(t)$ вводиться додатковий вираз доповнений логічним оператором $\nabla(t)$.

$$\nabla(t) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } |e(t)| \leq \beta \sqrt{\bar{e}^2(t-1)}, \\ 0, \text{ якщо } |e(t)| > \beta \sqrt{\bar{e}^2(t-1)}. \end{cases} \quad (16)$$

Причому в процесі адаптації моделей параметри $Q(t)$ і $\Delta(t)$ обчислюються з урахуванням логічного оператора $\nabla(t)$. Після отримання $k+1$ -го несуперечливого прогнозу оператор $\nabla(t)$ виключається з розрахунків.

На рисунку 3 показані результати прогнозування електричного навантаження за моделями Тріга – Ліча і модифікованою моделлю адаптації α . Дослідження показали, що модель Тріга – Ліча адаптується до реальних даних на 4-5 кроці прогнозування, модифікована модель адаптується до реальних даних вже на 2 кроці, причому середньоквадратична помилка (СКП) прогнозування із застосуванням моделі Тріга – Ліча $e^2 = 28$ тоді як СКП із застосуванням модифікованої моделі становить $e^2 = 17$.

Ефективність адаптивної моделі прогнозування електричного навантаження за модифікованою моделлю адаптації α підтверджена дослідженнями проведеними в роботах [37,38].

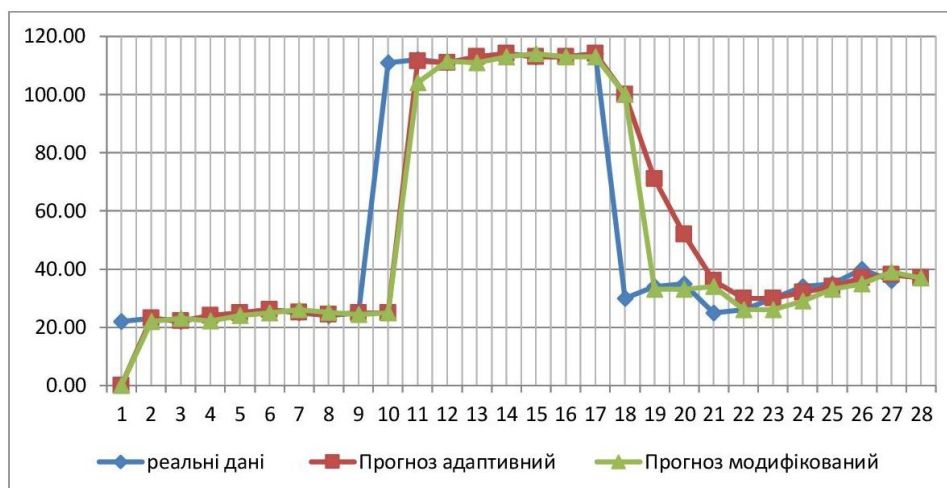


Рисунок 3 – Результати прогнозування електричного навантаження за моделями Тріга-Ліча і модифікованою моделлю адаптації α

Висновки.

На підставі проведеного аналізу показано, що будь-який метод управління містить два основних етапи: етап визначення можливих величин і етап вироблення і реалізації керуючих впливів. Кращою представляється орієнтація на ті методи, які засновані на дослідженні прогнозних оцінок, що складають вихідну інформацію для прийняття рішень із управління. Показано, що автоматизовані системи управління пред'являють специфічні вимоги до математичних методів прогнозу через малу вивченості природи прогнозованого параметра, малого обсягу звітної статистики та недостатньої достовірності вихідної інформації і найбільш точно відповідає таким вимогам, адаптивний підхід до конструювання методів прогнозування. Адаптивний підхід дозволяє вирішувати проблему адекватності методу об'єкту прогнозування і, з точки зору простоти реалізації і часу розрахунків, на перше місце слід поставити адаптивні методи прогнозування і, в першу чергу, метод експоненціального згладжування.

Список використаної літератури

1. Винославский В.Н. Прогнозирование электропотребления производственных объектов / В.Н. Винославский, А.В. Праховник, А.Ф. Бондаренко // Энергетика и электрификация. – 1974. - № 5. - С. 30-31.
2. Лапинский Г.С. Однофакторные регрессионные модели прогнозирования электропотребления промышленных предприятий / Г.С. Лапинский, З.Р. Майрансаев // Известия ЮФУ. -2013. - № 5. – с. 241-246
3. Freire R. Z. Development of regression equations for predicting energy and hygrothermal performance of buildings/ Roberto Z. Freire, Gustavo H.C. Oliveira, Nathan Mendes // Energy and Buildings. – 2008. - № 40. – p. 810–820.
4. Валь, П.В. Прогнозирование электропотребления с использованием авторегрессионного метода / П.В. Валь, А.С.Торопов // Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск: ТПУ, 2010. – С. 23-24.
5. Щербина Ю.В. Прогнозирование случайных процессов на основе разложения в гармонический ряд и применения фильтра Калмана с учетом корреляции между шумами в модели/ Щербина Ю.В., Николов Д.А. // Автоматика. – 1978. - № 5. С. 48-55.
6. Шаталов В.И. Краткосрочное прогнозирование суммарной энергетической нагрузки энергосистемы с учетом метеорологических факторов: Автореферат дисс... канд. техн. наук. – Новосибирск. – 1976. – 24 с.
7. Вагин Г.Я. Динамическое прогнозирование электропотребления дуговых сталеплавильных печей/ Вагин Г.Я., Лоскутов А.В., Редькин Е.В. // Межвузовский сборник научных трудов «Электрооборудование промышленных установок». – Горький: ГПИ. 1989. – С. 12 – 18.
8. Chow J.C. A preliminary algorithm for determining the order of a linear stochastic dynamic system/ Chow J.C. // IEEE Paper No. 75 – 5. – P. 518 – 520.

9. Galliana F.D. Identification of stochastic electric load model from physical data/ Galliana F.D., Handschin E., Frechter A.R. // IEEE Transaction on Automatic Control. – Vol. Ac – 19. – No. 6. – 1974. – P. 887 -893.
10. Keyhany A One – step – ahead load forecasting for on line application / Keyhany A., El – Abiad A. // IEEE Paper No. C 75 027 – 8. – P. 1 – 7.
11. Mehra K.K. On the identification of variances and adaptive Kalman filtering / Mehra K.K.// IEEE Transaction on Automatic Control. – Vol. Ac – 19. – No. 2. – 1970. – P. 175 - 181.
12. Sharma K.L.S. An application of non – linear adaptive estimation theory in short – term load prediction/ Sharma K.L.S., Mahalanabis A.K. // IEEE Paper No. C 74 333 – 1. – P. 1 – 7.
13. Праховник А.В. Прогнозирование параметров режимов электропотребления различных иерархических уровней энергетики / Праховник А.В., Розен В.П. // Труды конференции «Методы и средства управления электропотреблением». – Киев: Знание. – 1992. – С. 22 – 24.
14. Архиреева И.Н. Применение метода селекции для прогнозирования временных рядов электропотребления/ Архиреева И.Н., Литвинов Ю.Г., Суднова В.В. // Труды конференции «Методы и средства управления электропотреблением». – Киев: Знание. – 1992. – С. 26 – 27.
15. Розен В.П. Алгоритм управления электрической нагрузкой энергетических и производственных систем/ Розен В.П. // Труды 2-й международной конференции «Управление энергосистемами». – Львів: Taxis . – 1997 (1) – С.33-35.
16. Застосування предмету розпізнавання образів в системах управління електричним навантаженням/ Калінчик В.П., Розен В.П., Танітовська О.Д., Яшуніна О.С.; НТУУ „КПІ” Н.-д. ін-т автоматики та енергетики „Енергія”. – Київ, 2010. – 37 с.: іл.: – Бібліогр.: 15 назв. – Укр. – Деп. в ДНТБ України 18.05.2010 № 25- Ук- 2010.
17. Gupta P.C. Adaptive short term forecasting of hourly loads using weather information/ Gupta P.C., Yamada K.// IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. – Vol. Pas. – 91. – 1972. – P. 2085 - 2094.
18. Andersen, F.M. Long term forecasting of hourly electricity consumption in local areas / F.M. Andersen, H.V. Larsen, R.B. Gaardstrup // Applied Energy. – 2013. – № 110. – P. 147-162.
19. Brown R.G. Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series / R.G. Brown // Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1963. – 468 p.
20. Brown R.G. The fundamental theorem of exponential smoothing/ R.G. Brown, R.F. Meyer/ // Operation research. - 1961. - Vol.9. - № 5. – p. 673–685.
21. Holt C.C. Forecasting trends and seasonals by exponentially weighted moving averages / C.C. Holt // O.N.R. Memorandum 52, Carnegie Inst. of Technology. - 1957. - № 2
22. Прогнозирование показателей энергопотребления, генерации и стоимости полученной энергии/ Калінчик В.П., Кокорина М.Т.: НТУУ „КПІ” Н.-и. ін-т автоматики та енергетики «Енергія». – Киев, 2013. – 14 с.: іл. – Бібліогр.: 7 назв. – Рус. – Деп. в ГНТБ України 22.07.13, № 35– Ук 2013.
23. Калінчик В.П., Федосенко Н.Н. Адаптивные модели прогнозирования электрической нагрузки/ НТУУ „КПІ” Н.-и. ін-т автоматики та енергетики «Енергія». – Киев, 2010. – 15 с.: – Рус. – Деп. в ГНТБ України 15.03.2010, № 4-Ук – 2010/
24. Forecasting of RES generation indicators. [Kalinchuk, V., Buravliova, M., Pobihailo, V., Borychenko, O., Kalinchuk, V. //2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2021 - Conference Proceedingsthis link is disabled](#), 2021, стр. 445–448
25. В.П. Калінчик. Застосування статистичних методів прогнозування для планування електроспоживання/ В.П. Калінчик, В.В. Калінчик, Д.О. Мельник, К.А. Василенко. //Матеріали ХХVІ Міжнародної науково-практичної інтернет - конференції «Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки в країнах Європи та Азії» – Переяслав-Хмельницький. – 2020.- С.167-169
26. Ивахненко А.Г. Предсказание случайных процессов /Ивахненко А.Г., Лапа В.Г.// Киев: Наукова думка. – 1971. – 416 с.
27. Редкозубов С.А. Статистические методы прогнозирования в АСУ/ Редкозубов С.А.// М.: Энергоиздат. – 1981. – 152 с.
28. Uri N.D. Peak load forecasting using an adaptive mode /Uri N.D. // Eng. Opt. – 1979. – Vol. 4 – P. 57 – 63.
29. Автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления электроэнергетическими системами / О.Н.Войтов, Н.В.Воронов, А.З. Гамм др. / Под ред . М.Н.Розанова и В.А.Семенова . – Новосибирск: Наука. – 1986. – 205 с.
30. Оценивание состояния в электроэнергетике / А.З Гамм, Л.Н.Герасимов, И.И.Голуб и др. / Под ред Ю.Н.Руденко. – М.: Наука. – 1983. – 308 с.
31. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов / Ю. П. Лукашин// М.: Финансы и статистика, 2003. – 415 с. - ISBN 5-279-02740-5
32. Чуев Ю.В. Прогнозирование количественных характеристик процессов/ Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И./ М.: Сов. радио. – 1975. – 400 с.

33. Feuer A. Forecasting With Adaptive Gradient Exponential Smoothing / Feuer A. // The bell system technical journal. – Vol. 62. – 1983. – No. 8. – P. 2561 – 2580.
34. Trigg D.W. Exponential smoothing with an adaptive response rate/ Trigg D.W., Leach A.G. // Oper. Res. Quart. – 1967. – Vol. 18. – No. 1.
35. Калінчик В.П. Адаптивний підхід до прогнозування та управління електроспоживанням/ Калінчик В.П. // Вісник УБЕНТЗ. – 1999. - № 1. – С. 52 – 55.
36. Lijesen D.P. Adaptive forecasting of hourly load based and load measurement and weather information /Lijesen D.P., J. Rosing.// IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. – Vol. Pas. – 90. No.4. – 1971.
37. Калінчик В.П., Калінчик І.В. Прогнозування електричного навантаження промислових об'єктів/ Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». - Київ. 2009.- 7 с.:іл. – Укр.. – Деп. В ДНТБ України 12.10.09, № 92-Ук – 2009.
38. В.П. Калінчик. Комбіновані моделі прогнозування електроспоживання / Калінчик, Л.І. Несен, В.В. Калінчик// Збірник наукових праць. Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки в країнах Європи та Азії» – Переяслав-Хмельницький. – 2019.- С.133-135.

V V.P. Kalinchyk, Ph.D., ORCID 0000 - 0003- 4028- 0185

O.V.Meita, Ph.D., ORCID 0000-0002-4132-5202

V.V. Kalinchyk, Ph.D., ORCID 0000 - 0003- 3931- 646X

Yu.M. Chunyak, ORCID 0000 - 0002- 4506 – 912X

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

ADAPTIVE MODELS OF ELECTRIC LOAD FORECASTING OF PRODUCTION CONSUMERS

The article investigates models and methods of electric load forecasting. It is shown that the following methods of power consumption control are currently known: instantaneous norm; at the ideal rate; management on the forecast value; control with the use of average power on a moving time interval ("moving window" method). It is shown that it is better to focus on those methods that are based on the study of forecast estimates, which are the source information for management decisions. The main requirements for real-time systems are: high accuracy of operational forecasting and simplicity of algorithms, which provides a minimum solution time; work in conditions of uncertain and insufficient information, ensuring the stability of management. The analysis of works devoted to the issues of forecasting the processes of power consumption management systems of industrial enterprises is carried out. It is shown that automated control systems have specific requirements for mathematical forecasting methods due to little study of the nature of the forecast parameter, small amount of reporting statistics and insufficient reliability of source information and most accurately meets such requirements, adaptive approach to method design. The adaptive approach allows to solve the problem of adequacy of the method of the object of forecasting and from the point of view of simplicity of realization and time of calculations in the first place it is necessary to put adaptive methods of forecasting and, first of all, the method of exponential smoothing. Exponential smoothing, considered in this paper as a predictive model, allows to identify the inadequacy of the model to the real process and to bring the estimate of the determined basis of the process closer to the real one, ie to reduce the prediction error. However, this requires time, which increases with increasing changes in the coefficients of the model. In this regard, there is a problem of regulating the reaction rate of the predicted model to changes in its coefficients. A number of methods of automatic adjustment of the smoothing parameter are considered and analyzed: the evolutionary method of adaptation, methods using the tracking signal, methods of adapting the parameter by, optimization using gradient smoothing. It is shown that the method of adaptation using the tracking signal is simple and especially valuable for modeling series with a short history. Due to its simplicity, this method is especially convenient where predictions are made using computer technology. Studies of this model of forecasting on statistical data obtained at various enterprises have shown that the model adapts to real data at step 4-6 of forecasting and then the forecast error does not exceed 2%. Analysis of adaptive forecasting models based on the method of exponential smoothing showed their high efficiency and good adaptability to changes in the process of electricity consumption. The greatest difficulty in forecasting are cases of abrupt changes in the development of the process. Abrupt changes in the process can lead to a violation of the previously existing qualitative relationships of the parameters of the projected system. If there is a jump, it is very important to assess whether the deviation is caused by an obstacle or whether it is due to a change in the predicted process. If the changes are caused by an obstacle, it must be filtered out. If the deviations are caused by a change in the model, then the current process data are of the greatest value. From the point of view of fast working off of abrupt change the model of exponential smoothing with high value of the smoothing parameter is rather effective. However, this model is highly susceptible to interference. To eliminate this circumstance, a modified procedure for correcting

the parameters of the forecasting model is proposed. The procedure is based on the introduction of a logical operator, which is based on the analysis of inconsistencies in the forecasts and imposes additional restrictions on changes in the smoothing parameter and the values of the original statistics. Experimental studies of the considered models are carried out.

Keywords: *electrical load, control, forecast, adaptive models, exponential smoothing.*

References

1. Vinoslavsky V.N. Forecasting of electricity consumption of production facilities / V.N. Vinoslavsky, A.B. Prakhovnik, A.F. Bondarenko // *Energy and electrification*. - 1974. - № 5. - p. 30-31.
2. Lapinsky G.S. One-factorial regression models of forecasting of the power consumption of the industrial enterprises / G.S. Lapinsky, Z.R. Mirantsaev // *Izvestiya YuFU*. -2013. - № 5. - p. 241-246
3. Freire R. Z. Development of regression equations for predicting energy and hygrothermal performance of buildings/ Roberto Z. Freire, Gustavo H.C. Oliveira, Nathan Mendes // *Energy and Buildings*. – 2008. - № 40. – p. 810–820.
4. Val P.V. Forecasting of electricity consumption using the autoregressive method / P.V. Val, A.S. Toropov // *Proceedings of the XVI International scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists "Modern technology and technology"*. - Tomsk: TPU, 2010. - p. 23-24.
5. Shcherbina Yu.V. Prediction of random processes based on harmonic series decomposition and application of Kalman filter taking into account the correlation between noise in the model / Shcherbina Yu.V., Nikolov DA // *Automation*. - 1978. - № 5. p. 48-55.
6. Shatalov V.I. Short-term forecasting of the total energy load of the power system taking into account meteorological factors: Abstract of the dissertation. tech. Science. - Novosibirsk. - 1976. - 24 p.
7. Vagin G.Ya. Dynamic forecasting of power consumption of arc steelmaking furnaces / Vagin G.Ya., Loskutov A.V., Redkin E.V. // *Interuniversity collection of scientific works "Electrical equipment of industrial installations"*. - Bitter: GPI. 1989. - p. 12 - 18.
8. Chow J.C. A preliminary algorithm for determining the order of a linear stochastic dynamic system/ Chow J.C. // *IEEE Paper No. 75 – 5 . – P. 518 – 520*. Chow J.C. A preliminary algorithm for determining the order of a linear stochastic dynamic system/ Chow J.C. // *IEEE Paper No. 75 – 5 . – P. 518 – 520*.
9. Galliana F.D. Identification of stochastic electric load model from physical data/ Galliana F.D., Handschin E., Frechter A.R. // *IEEE Transaction on Automatic Control*. – Vol. Ac – 19. – No. 6. – 1974. – P. 887 -893.
10. Keyhani A. One – step – ahead load forecasting for on line application / Keyhani A., El – Abiad A. // *IEEE Paper No. C 75 027 – 8. – P. 1 – 7*.
11. Mehra K.K. On the identification of variances and adaptive Kalman filtering / Mehra K.K.// *IEEE Transaction on Automatic Control*. – Vol. Ac – 19. – No. 2. – 1970. – P. 175 - 181.
12. Sharma K.L.S., Mahalanabis A.K. An application of non – linear adaptive estimation theory in short – term load prediction/ Sharma K.L.S., Mahalanabis A.K. // *IEEE Paper No. C 74 333 – 1. – P. 1 – 7*.
13. Prakhovnik A.V. Forecasting the parameters of power consumption modes of different hierarchical levels of energy / Prakhovnik A.V., Rosen V.P. // *Proceedings of the conference "Methods and tools for power management."* - Kyiv: Knowledge. - 1992. - p. 22 - 24.
14. Archireeva I.N. Application of selection method for forecasting time series of power consumption / Archireeva I.N., Litvinov Yu.G., Sudnova V.V. // *Proceedings of the conference "Methods and tools for power management."* - Kyiv: Knowledge. - 1992. - p. 26 - 27.
15. Rosen V.P. Algorithm for controlling the electrical load of energy and production systems / Rosen V.P. // *Proceedings of the 2nd International Conference "Energy Management"*. - Lviv: Tacis. - 1997 (1) - P.33-35.
16. Kalinchyk V.P., Rozen V.P., Tanitovska O.D., Yashunina O.S.; NTUU "KPI" N.-d. Institute of Automation and Energy "Energy". - Kyiv, 2010. - 37 p. : ill. : - Bibliography: 15 titles. - Ukr. - Dep. in the State National Security Service of Ukraine 18.05.2010 № 25- UK-2010..
17. Gupta P.C. Adaptive short term forecasting of hourly loads using weather information/ Gupta P.C., Yamada K.// *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*. – Vol. Pas. – 91. - 1972. – P. 2085 - 2094.
18. Andersen, F.M. Long term forecasting of hourly electricity consumption in local areas / F.M. Andersen, H.V. Larsen, R.B. Gaardstrup // *Applied Energy*. – 2013. – № 110. – P. 147-162.
19. Brown R.G. Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series / R.G. Brown // *Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1963. – 468 p.*
20. Brown R.G. The fundamental theorem of exponential smoothing/ R.G. Brown, R.F. Meyer/ // *Operation research*. - 1961. - Vol.9. - № 5. – p. 673–685.
21. Holt C.C. Forecasting trends and seasonals by exponentially weighted moving averages / C.C. Holt // *O.N.R. Memorandum 52, Carnegie Inst. of Technology*. - 1957. - № 2

22. Forecasting of indicators of energy consumption, generation and cost of the received energy / Kalinchik V.P., Kokorina M.T.: NTUU "KPI" N.-i. Institute of Automation and Energy "Energy". - Kyiv, 2013. –14 p. : ill. - Bibliogr. : 7 titles. - Rus. - Dep. in GNTB of Ukraine 22.07.13, № 35– Uk 2013.
23. Kalinchik V.P., Fedosenko N.N. Adaptive models of electric load forecasting / NTUU "KPI" N.-i. Institute of Automation and Energy "Energy". - Kyiv, 2010. –15 p. : - Ruc. - Dep. in GNTB of Ukraine 15.03.2010, № 4-Uk - 2010/
24. Forecasting of RES generation indicators. Kalinchyk, V., Buravliova, M., Pobihailo, V., Borychenko, O., Kalinchyk, V. // 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2021 - Conference Proceedings [this link is disabled](#), 2021, стр. 445–448
25. V.P. Kalinchik. Application of statistical forecasting methods for electricity consumption planning / V.P. Kalinchik, V.V. Kalinchik, D.O. Мельник, К.А. Vasylenko. // Proceedings of the XXVI International Scientific and Practical Internet Conference "Problems and Prospects for the Development of Modern Science in Europe and Asia" - Pereyaslav-Khmelnysky. - 2020.- p.167-169
26. Ivakhnenko A.G. Prediction of random processes/ Ivakhnenko A.G., Lapa V.G.//Kyiv: Scientific opinion. - 1971. - 416 p.
27. Redkozubov S.A. Statistical forecasting methods in ACS / Redkozubov S.A. //M.: Energoizdat. - 1981. - 152 p.
28. Uri N.D. Peak load forecasting using an adaptive model/ Uri N.D. // Eng. Opt. – 1979. – Vol. 4 – P. 57 – 63.
29. Automated system of operational and dispatch control of electric power systems / O.N. Voitov, N.V. Voronov, A.Z. Gamm et al. / Ed. M.N. Rozanova and V.A. Semenova. - Novosibirsk: Science. - 1986. - 205 p.
30. Assessment of the state in the power industry / A.Z. Gamm, L.N. Gerasimov, I.I. Golub, etc. / Edited by Yu.N. Rudenko. - M.: Science. - 1983. - 308 p.
31. Lukashin Yu. P. Adaptive methods of short-term forecasting of time series / Yu. P. Lukashin. //Moscow: Finance and Statistics, 2003. - 415 p. - ISBN 5-279-02740-5
32. Chuev Yu.V., Mikhailov Yu.B., Kuzmin VI Forecasting quantitative characteristics of processes / Chuev Yu.V., Mikhailov Yu.B., Kuzmin VI //M.: Sov. radio. - 1975. - 400 p.
33. Feuer A. Forecasting With Adaptive Gradient Exponential Smoothing / Feuer A.// The bell system technical journal. – Vol. 62. – 1983. – No. 8. – P. 2561 – 2580.
34. Trigg D.W. Exponential smoothing with an adaptive response rate/ Trigg D.W., Leach A.G. // Oper. Res. Quart. – 1967. – Vol. 18. – No. 1.
35. Kalinchik V.P. Adaptive approach to forecasting and management of electricity consumption // Bulletin of UBENTZ. - 1999. - № 1. - p. 52 - 55.
36. Lijesen D.P. Adaptive forecasting of hourly load based and load measurement and weather information Lijesen D.P., J. Rosing.// IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. – Vol. Pas. – 90. No.4. – 1971.
37. Kalinchik V.P., Kalinchik I.V. Forecasting the electrical load of industrial facilities / Nat. tech. University of Ukraine "Kyiv. Polytechnic Inst. - Kyiv. 2009.- 7 pp. : ill. - Ukr .. - Dep. In the State Scientific Library of Ukraine on October 12, 2009, № 92-Uk - 2009.
38. V.P. Kalinchik, L.I. Nessen, V.V. Kalinchik. Combined models of electricity consumption forecasting / Collection of scientific papers. Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Internet Conference "Problems and Prospects for the Development of Modern Science in Europe and Asia" - Pereyaslav-Khmelnysky. - 2019.- p.133-135.

Надійшла 20.02.2022
Received 20.02.2022

ВПЛИВ СИСТЕМИ SMART GRID НА НАЦІОНАЛЬНУ ЕНЕРГЕТИЧНУ МЕРЕЖУ

Інфраструктура національних мереж багатьох країн дуже стара і включає класичні технології виробництва, передачі та розподілу електроенергії. Крім того, керованість і контрольованість цих систем також не є задовільними. З іншого боку, технології розумних мереж Smart Grid включають складні інструменти для моніторингу та контролю енергетичної системи в обох напрямках від електростанцій до кінцевих користувачів або навпаки. Щоб можна було заздалегідь виявити вразливості та вжити необхідних заходів. Крім того, система інтелектуальних мереж пропонує моніторинг та керування електричною енергією від виробництва до кінцевого користувача, а також забезпечує розумний облік, інтеграцію відновлюваної енергії в мережу. Крім того, ефективне використання джерел енергії з мінімальними втратами та мінімальним незаконним використанням також обробляється в технології розумних мереж. У цій статті висвітлюється вплив технологій інтелектуальних мереж на національні електромережі та пропонується деякі застосовні пропозиції з метою перетворення їх класичної системи електромереж на систему інтелектуальних мереж Smart Grid.

Ключові слова: Smart Grid, енергетичні системи, електричні мережі, інтелектуальне керування, інтелектуальні електричні мережі, системи керування розподілом електроенергії.

Вступ. Класична інфраструктура електромережі, від виробництва електроенергії до кінцевих споживачів, включає кілька енергетичних пристроїв для безпечної та ефективної передачі електроенергії, виробленої на електростанції, кінцевим споживачем. Такими силовими пристроями є електрогенератори, трансформатори, силові вимикачі, лінії передачі та розподілу, лічильники комунальних послуг, реле та запобіжники. Тому кожен із цих компонентів має свої потенційні проблеми через старі технології.

З іншого боку, сучасні технології енергосистеми пропонують інтеграцію відновлюваної енергії в електричних мережах, розумне вимірювання, двонаправлений зв'язок між децентралізованими силовими агрегатами генерації електроенергії і центральною системою керування виробництвом і споживанням енергії, запобігання відключенням електроенергії, стійких та безпечних джерел енергії, а також енергоефективність. Більш того, у сучасній енергетичній системі потрібен контроль, вимірювання та кібербезпека енергетичних процесів в кожній точці електромережі.

Якщо будь-яка класична енергетична система інтегрована з інформаційно-комунікаційною технологією, то електрична мережа перетворюється в розумну мережу і забезпечується двонаправлений зв'язок між генерацією електроенергії і центральною системою керування виробництвом і споживанням енергії. Розумна енергосистема (**Smart Grid**) це свого роду складна технологія, яка забезпечує не тільки двонаправлений зв'язок, але також має кілька різних аспектів, таких як доступність, ефективність, точність, керованість, економічність, гнучкість, функціональна сумісність, ремонтпридатність, вимірюваність, оптимальність, надійність, стійкість, стабільність, безпека та масштабованість [1-4]. Як показано на рис. 1, усі ці функції розумної енергосистеми роблять мережу достатньо стійкою при будь-яких збоїв живлення, падіння напруги, втрат потужності, коливань напруги та частоти, перенапруги та перевантаженні струмів. Крім того, система розумних мереж об'єднує виробників, операторів і споживачів, а також тих, хто розробляє енергетичну політику. У той час як класична електрична мережа складається лише з виробників і операторів на національному рівні, розумна мережа включає в себе споживача як виробника електроенергії. Тому що споживач також може бути виробником і продавати вироблену енергію в мережу. Енергія, вироблена споживачем, може бути отримана безпосередньо з відновлюваних джерел енергії або акумуляторної системи. [3-7].

Таким чином, всі ці види діяльності, такі як виробництво електроенергії, двонаправлений зв'язок, інтеграція відновлювальних джерел енергії та інші, є інтересами державних технічних інфраструктур для встановлення балансу між виробництвом та попитом на електроенергетичні ресурси.

Відключення або перебої у подачі електроенергії у національній енергосистемі зачіпають мільйони людей у країні та спричиняють численні економічні втрати з точки зору бізнесу та виробництва, а також низький рівень життя. Крім того, втрати при передачі та розподілі у світі варіюються від 5% до 20% залежно від інфраструктури енергосистеми.



Рисунок 1 – Вимоги розумної енергосистеми

Аварії в електромережі – на жаль, звичне явище для українських споживачів. Середня тривалість *планових* відключень для клієнта за 2019 рік в нашій країні становила 478 хвилин. Це втричі більше, ніж в Євросоюзі. А середня тривалість *позапланових* відключень у нас становила 683 хвилини, що в 7 разів більше, ніж в ЄС. Водночас технологічні втрати електроенергії на її передачу та розподіл в українських мережах становили майже 12% від загального відпуску, або в понад 1,5 раза перевищують середньоєвропейський рівень і понад удвічі – рівень втрат у розвинутих країнах. Подолати ці та інші негативні явища в електроенергетиці допоможе впровадження розумних мереж (Smart Grid) [8].

Мета та завдання. Впровадження інтелектуальних розумних в майбутньому є першочерговим завданням, оскільки вона має здатність захищати від кібербезпеки, сприяючи розширенню мережної системи для плавної інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як вітер, електромобілі та акумуляторні системи з використанням силової електроніки, сонячна, що забезпечує розумний облік, дозволяє спостерігати та контролювати енергію, пом'якшуючи коливання напруги, частоти та струму, створюючи гарну гармонізацію між виробниками, споживачами, операторами мереж та державою.

Як наслідок, побудова Smart Grid постає як складне завдання, що починається з детальної кількісної оцінки вимог до системи, визначення фактичних цілей і необхідних для їх досягнення рівнів функціонування. Це дослідження стане ефективним та дієвим інструментом для дослідників, інженерів, операторів передавачів та розподільників, щоб перетворити класичну національну енергосистему на інтелектуальну енергосистему.

Основна структура системи Smart Grid

Розумна система Smart Grid складається з двонаправленого потоку енергії в поєднанні з інформаційно-комунікаційними технологіями. Усі енергетичні пристрої, що використовуються в мережі для спостереження та керування – розумні та взаємодіють один з одним. В таблиці 1 приведена одна із основних структур розумної енергосистеми.

Таблиця 1 – Структура розумної енергосистеми

Розумна енергосистема Smart Grid			
Виробництво електроенергії <i>відновлювані і невідновлювані джерела енергії, включаючи мікромережі</i>	Передача електроенергії <i>силові трансформатори, силові вимикачі, реле, конденсатори, лінії електропередачі, електроопори</i>	Розподіл електроенергії <i>трансформатори, силові вимикачі, розумні лічильники, запобіжники, а також реле</i>	Споживання електроенергії <i>будинки, заводи, вуличні ліхтарі, електромобілі та акумулятори</i>

Ми визначили розумну мережу з чотирма основними функціями: виробництво електроенергії, передача електроенергії, розподіл електроенергії та споживання електроенергії. Усі функції мають двонаправлений зв'язок для підвищення рівня автоматизації, інформатизації, інтелектуальності на всіх рівнях системи керування функціонуванням енергосистеми.

Крім того, ринок і функціонування в основному пов'язані з державним регулюванням, де враховується ціни на електроенергію, інвестиції, баланс між виробництвом електроенергії та попитом, деякі ринкові стандарти, інтеграція систем відновлюваної енергії в національну мережу, пільговий тариф та підтримка споживачів.

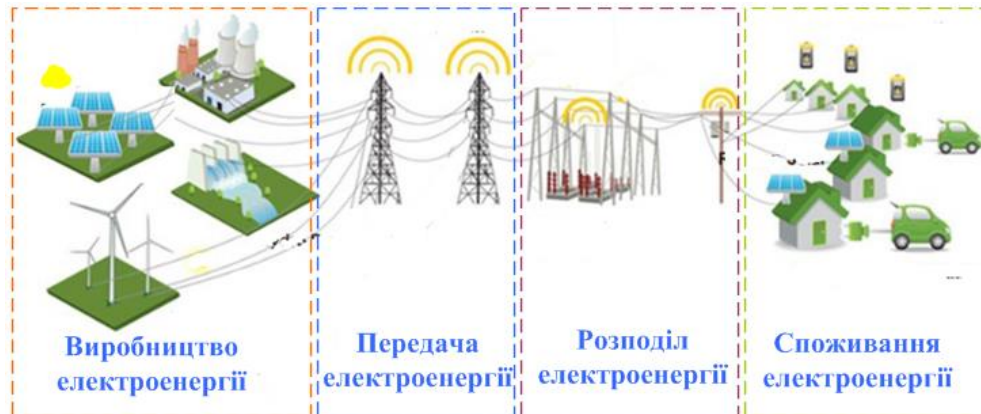


Рисунок 2 – Структура класичної електромережі

Функція виробництва електроенергії на рис. 3 має декілька відновлюваних та невідновлюваних джерел енергії. Відновлювальними джерелами енергії можуть бути вітер, сонце, гідро, біомаса, біопаливо, геотермальна, припливи та паливні елементи, невідновлюваними джерелами енергії є вугілля, нафта, ядерна та природний газ. Однак концепція розумної мережі полягає в тому, щоб якомога більше використовувати відновлювані джерела енергії.

У сучасних економічних умовах в Україні існує значна кількість енергоємних виробництв, тому проекти з енергоефективності та енергонезалежності стають одними з пріоритетних напрямів розвитку паливно-енергетичного комплексу (ПЕК) країни. Нестабільна ситуація з постачання та нерівномірність розподілу енергоресурсів, коливання світових цін на них обумовлює створення таких умов функціонування ПЕК, які б дозволяли забезпечити стабільний рівень його економічного зростання. Тому стратегія на забезпечення енергетичної незалежності та зниження енергоспоживання створює передумови для розвитку та впровадження у ПЕК сучасних технологій. Тому в літературі було проведено багато досліджень, щоб включити більше відновлюваних джерел до системи розумних мереж [9, 10].

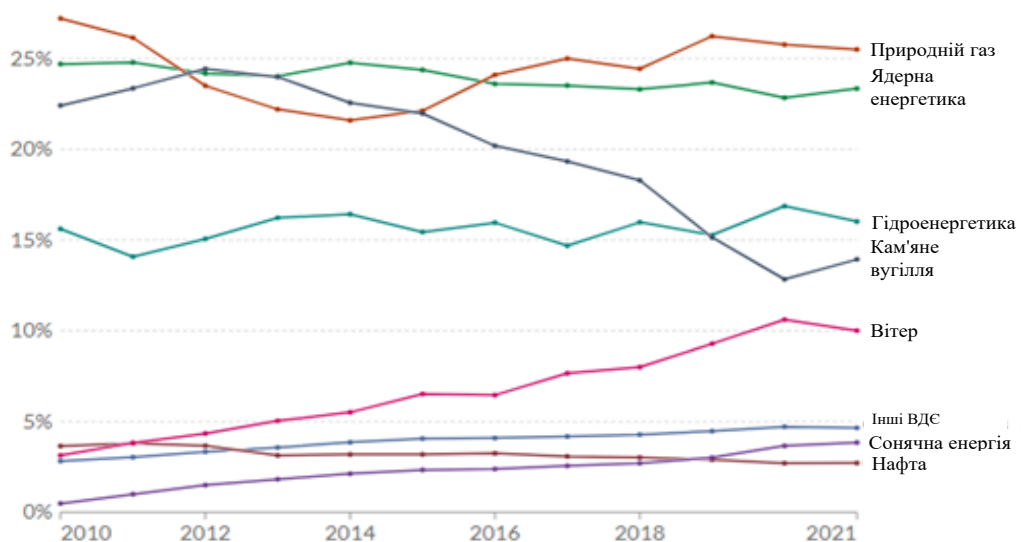


Рисунок 3 – Частка виробництва електроенергії в Європі за типами енергетичних ресурсів (2010 – 2021 р.) [11]

На рис. 3 показано частка виробництва електроенергії в Європі за типами енергетичних ресурсів. Три основні категорії енергії для виробництва електроенергії - це викопне паливо (вугілля, природний газ і нафта), ядерна енергія та відновлювані джерела енергії. Більшість електроенергії виробляється паровими турбінами, що використовують викопне паливо та ядерну енергію. Інші технології виробництва

електроенергії включають газові турбіни, гідротурбіни, вітряні турбіни та сонячні фотоелектричні елементи.

Природний газ залишається основним паливом (25%), для виробництва електроенергії в Європі, використовується у парових турбінах та газових турбінах.

За останнє десятиліття вугілля було одним з найбільших джерел вироблення електроенергії, його частка у загальному виробленні знизилася з 22% у 2010 р. до 14% у 2021 р.

На вугільну генерацію, впливає сильна цінова конкуренція з боку природного газу, ширше використання відновлюваних джерел енергії та, найголовніше, нові екологічні норми. Нині нові вугільні електростанції не будуються і не плануються.

Ядерна енергія залишається одним з основних виробництв електроенергії у Європі – 23 %. Атомні електростанції використовують парові турбіни для електроенергії з допомогою ядерного поділу.

Найбільша частка електроенергії, що виробляється відновлюваними джерелами енергії (34%), припадала на гідроенергетику (16%), використання енергії вітру збільшилось з 3% у 2010 р. до 10% у 2021 р., сонячна енергія (4%) та інші (4%).

Кількість електроенергії, що виробляється вітром, значно збільшилася протягом останнього десятиліття. Це збільшення значною мірою пов'язане з наявністю фінансових стимулів та цілей у галузі відновлюваних джерел енергії, встановлених урядами багатьох країн.

В Україні найбільша частка електроенергії (рис. 4), що виробляється припадає на атомну (55 %) та вугільну (23 %) енергетику. Відновлювальні джерела енергії складають всього 14%. Найбільша частка припадає на гідроенергетику (7%).

За останні роки сонячна енергія забезпечила близько 4% вироблення електроенергії в Україні. У міру того, як все більше електроенергії одержують із відновлюваних джерел, енергосистема повинна мати можливість накопичувати енергію сонця та вітру. Система повинна мати інтелект, щоб накопичувати надмірну енергію сонця і вітру для використання в нічний час або в похмурі дні.

Розподіл електроенергії для кожної країни за джерелами енергії узагальнено на рис. 5. Цілком зрозуміло, що 42% усіх енергоносіїв у Європі в 2021 році виробляється на електростанціях на горючому паливі. Польща та Естонія більшість своєї електроенергії виробляє з горючих видів палива 83% та 62%, відповідно.

Другим за величиною джерелом енергії, що використовується для виробництва електроенергії, є атомні електростанції, з часткою 23%. Її найбільшим рушієм є Франція (69%) та Україна (55%).

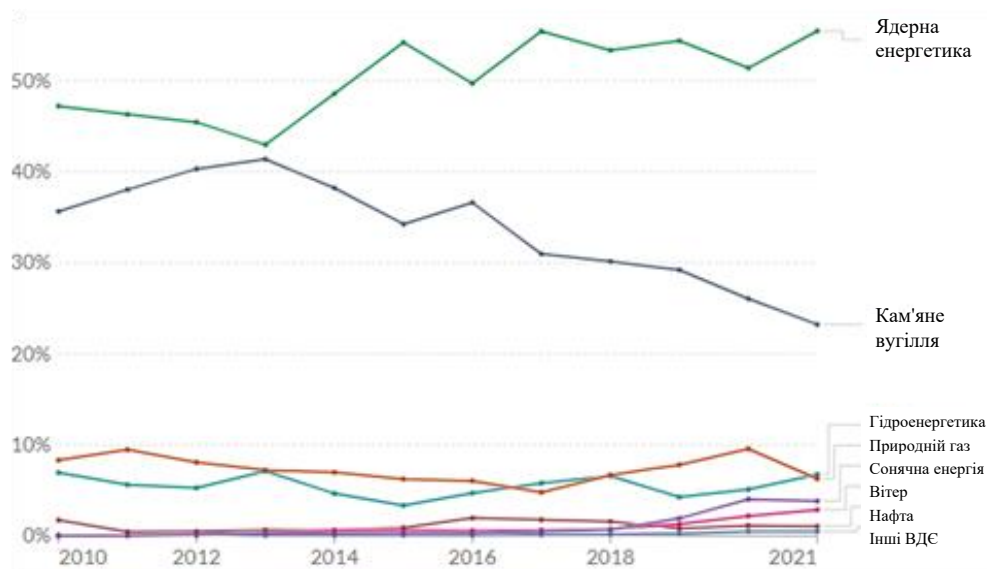


Рисунок 4 – Частка виробництва електроенергії в Україні за типами енергетичних ресурсів (2010 – 2021 р.) [11]

Гідроенергетика розвинута у багатьох країнах Європи (16%), наприклад частка виробництва електроенергії джерелом якої є гідроелектростанції у Норвегії займає 92%, Швейцарії 62%, Австрії 60%, що займає більшу половину від всього розподілу електроенергії за джерелами в цих країнах.

Незважаючи на високі показники гідроенергетики в багатьох країнах Європи, за останні роки частка відновлювальних джерел енергії збільшилась до 19%. Естонія (37,6%) та Іспанія (35%) використовують відновлювальні джерела енергії для виробництва електроенергії, а це третя частина від загальної потреби

енергії для цих країн. Також, збільшилась кількість використання вітрової та сонячної енергії у Австрії (19%) та Польщі (15,7%).

Збільшення частки відновлюваних джерел енергії в загальному обсязі енергетичних потреб Європи – це шлях до розумного використання природних ресурсів. Це піклування про здоров'я майбутніх поколінь і збереження червонокнижних рослин і тварин. Також це нові висококваліфіковані робочі місця, які потягнуть за собою науку і освіту, дадуть можливість створювати комфортні умови у складному кліматі без шкоди для екології.

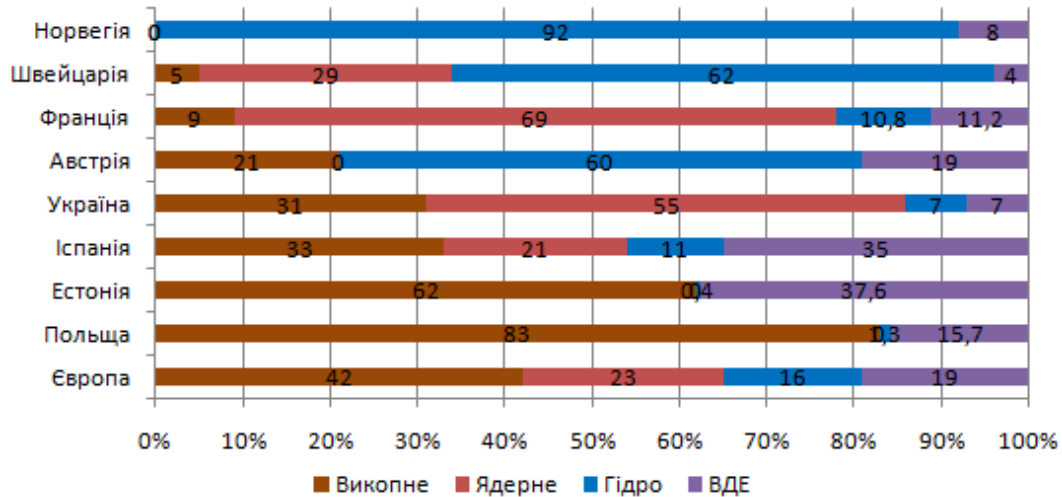


Рисунок 5 – Розподіл електроенергії за джерелами енергії, 2021 [11]

В Україні обсяги виробництва і використання енергії з відновлюваних джерел значно менші. На кінець 2021 в країні тільки 7% електроенергії отримано з сонячних чи вітрових електростанцій. Хоча в законі прописана мета – до 2030 року отримувати від альтернативної енергетики чверть всього потрібного обсягу, але прогнози експертів дещо скромніші. Вирахувано, що на великих станціях і в приватних домогосподарствах завдяки «зеленому тарифу» до кінця терміну його дії буде вироблятися від 13 до 20% електрики [12].

Наведена вище інформація та цифри підкреслюють важливість застосування Smart Grid у всьому світі, оскільки для виробництва електроенергії використовується багато різних джерел енергії.

Системи передачі електроенергії на рис. 2 включають силові трансформатори, лінії електропередач, підстанції, а також силові вимикачі. Значення напруги має найвище значення, а струм – найнижче значення в лініях передачі, щоб зменшити витрати та втрати за допомогою тонких електричних кабелів для передачі енергії на великі відстані.

Як показано на рис. 2, вся електроенергія передається по лініях електропередач, які можуть бути встановлені як над землею, так і під землею. Система Smart Grid дозволяє вимірювати сигнали напруги, струму та частоти в кожній точці лінії електропередачі за допомогою трансформаторів вимірювання напруги та струму, а також частотоміра для цілей спостереження та контролю.

Блок розподілу електроенергії на рис. 2 починається з понижуючого трансформатора і видає кілька рівнів напруги споживачам. Усі розумні лічильники, амперметри, вольтметри, частотоміри, запобіжники, вимикачі та реле входять до розподілу електроенергії. Для спостереження та контролю всіх електричних сигналів, таких як напруга, струм, частота, фазовий кут, послідовність фаз, в розподільному блоці встановлено кілька вимірювальних датчиків і невеликих трансформаторів. Усі компоненти розподільного блоку взаємодіють один з одним.

Одиниця споживання електроенергії на рис. 2 призначена для всіх типів навантажень, таких як заводи, будинки, вуличні ліхтарі та електротранспорт. Деякі споживачі можуть виробляти власну енергію з відновлюваних джерел або інших видів енергії та продавати цю енергію в мережу, якщо вироблена енергія не споживається. Але в цьому випадку необхідний розумний лічильник, щоб виміряти потік потужності в обидві сторони.

Після надання короткої інформації про класичну мережу її можна об'єднати з комунікаційними інфраструктурами і перетворити на систему інтелектуальних мереж Smart Grid, як показано на рис. 6. Вона складається з класичної мережі, а також комунікаційної інфраструктури, яка включає технології дротового та бездротового зв'язку в щоб налаштувати систему зв'язку між усіма електричними блоками та компонентами в розумній мережі. Таким чином, зараз вся система спостерігається і контролюється з

одного центру. Крім того, налаштований двонаправлений зв'язок, що дозволяє споживачеві бути споживачем.

Реалізація концепції Smart Grid неможлива без масштабного фізичного оновлення генеруючого і мережевого устаткування, забезпечивши керування технологічними процесами та економічними взаємодіями від локального до національного рівня. Саме у сфері систем керування функціонуванням і розвитком електроенергетики, відбуваються найбільш масштабні зміни, які в результаті мають привести до якісної трансформації умов енергопостачання споживачів за рахунок підвищення рівнів автоматизації, інформатизації та інтелектуальності на всіх рівнях систем керування функціонуванням енергосистеми і ринковими операціями [4].



Рисунок 6 Система інтелектуальних мереж Smart Grid

Переваги використання Smart Grid.

Як пояснювалося раніше, використання інтелектуальних мереж забезпечує низку завдань з управління, моніторингу, контролю, забезпечення безпеки, а також спрощує, прискорює та оптимізує. Ось рекомендації та важливі питання для інтелектуальних мереж, стисло викладені нижче:

- Забезпечення кращої якості електроенергії та якості послуг;
- Підтримка систем розподіленої генерації;
- Забезпечення гнучкого дизайну системи;
- Досягнення простої експлуатації та контролю;
- Управління самовідновленням від перебоїв в електроенергії;
- Активна участь споживачів у відповідь на попит;
- Стійка робота проти фізичних втручань та кібератак;
- Створення нових продуктів, послуг і ринків;
- Ефективна оптимізація активів та операцій;
- Дозвіл споживачам брати участь в оптимізації роботи системи;
- Надання додаткової інформації кінцевим користувачам про те, як використовувати джерела;
- Підтримка побудови повного енергетичного ринку;
- Дозвіл дистанційного вимірювання автоматизації та електричних лічильників;
- Забезпечення кращої безпеки та конфіденційності;
- Зменшення витрат на управління та обслуговування;
- Забезпечення двонаправленого потоку енергії та зв'язку через виробництво, передачу, розподіл та кінцевих користувачів;
- Збільшення ефективності передавання електроенергії та зменшення втрат в мережах;
- Дати можливість використовувати нові методики та методи, такі як штучний інтелект, машинне навчання, глибоке навчання, Інтернет речей, блокчейн, тощо;
- Складання легкого плану майбутніх розробок;
- Оптимальний попит на енергію;
- Збільшення вигод та доходів;
- Досягнення моніторингу в режимі реального часу;
- Дає унікальну можливість підключення різних типів джерел та накопичувачів енергії.

Висновки. Інфраструктури електромереж багатьох країн світу дуже старі і створюють багато проблем, включаючи коротке замикання, коливання напруги та струму, втрати, низький ККД, відключення

електроенергії, і не можуть забезпечити безпечну, надійну, чисту та економічну електроенергію, необхідну споживачам.

З іншого боку, розумна енергосистема є еволюційним процесом і не може бути створена за один крок. Вона надає багато переваг для всіх зацікавлених сторін, таких як фінансові фірми, виробники, науково-дослідні організації, споживачі, комунальні підприємства, органи захисту навколишнього середовища, регулюючі органи, незалежні оператори систем.

Таким чином, перетворення класичної мережі в інтелектуальну Smart Grid заповнює її власні бізнес-сфери та забезпечує підвищення ефективності, зниження втрат, гнучку ціну для споживачів, безпечну та стабільну електроенергію, а також надійну й цифрову інфраструктуру.

Список використаної літератури

1. Colak I. Introduction to Smart Grid. 3rd International Smart Grid Workshop and Certificate Program (ISGWCP), Istanbul, Turkey, 2016. pp. 30-34
2. Colak Денисюк С.П. Енергетичний перехід – вимоги до якісних змін у розвитку енергетики. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2019, № 1. С. 7–28.
3. Денисюк С.П., Стшелецькі Р. Формування складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2019, № 3. С. 8–22.
4. Lobodzinskiy V. Transient Analysis in Three-Phase Cable Lines with the Transposition Phase Cables Conductive Screens During Short Circuit Fault. IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2021. p. 413-416.
5. Lobodzinskiy Vadim, Chybelis Valeriy, Petruchenko Oleg, et al. Features of Transient Research in Three-Phase High-Voltage Power Transmission Cable Lines. Graif of Science, 2021, №6. pp. 132-145.
6. Лободзинський В.Ю., Чибеліс В.І. Аналіз перехідних процесів у трифазних електричних колах з розподіленими параметрами і міжфазними зв'язками на прикладі високовольтної кабельної лінії. Енергетика: економіка, технології, екологія, 2021 №3. С. 64-69.
7. Олійник С. Електричні мережі стануть “розумними”, 2021. [Електронний ресурс] – URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/elektrychni-merezhi-stanut-rozumnyumu>.
8. Концепція «Зеленого» енергетичного переходу України до 2050. Міністерство енергетики та захисту довкілля, 2020. [Електронний ресурс] – URL: <https://mepr.gov.ua/news/34424.html>
9. Чернишова М. І., Тульчинська С.Ю. Впровадження проекту «Розумні мережі» в контексті розвитку паливно-енергетичного комплексу України. Ефективна економіка, 2016, № 11.
10. Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy. [Електронний ресурс] – URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
11. Джерела відновлювальної енергії в сучасній енергетиці. [Електронний ресурс] – URL: [https://ekotechnik.in.I., Bayindir R., Sagiroglu S. The Effects of the Smart Grid System on the National Grids 8th IEEE International Conference on Smart Grid \(icSmartGrid\), Paris, France, 2020. pp. 122–126.ua/istochniki-vozobnovlyaemoj-enerгии/](https://ekotechnik.in.I., Bayindir R., Sagiroglu S. The Effects of the Smart Grid System on the National Grids 8th IEEE International Conference on Smart Grid (icSmartGrid), Paris, France, 2020. pp. 122–126.ua/istochniki-vozobnovlyaemoj-enerгии/)

V. Lobodzinskiy, PhD in Technical Sciences, assistant professor, ORCID 0000-0003-1167-824X

M. Buryk, PhD in Technical Sciences, assistant professor, ORCID 0000-0002-7114-1084

O. Petruchenko, senior teacher, ORCID 0000-0002-4982-4217

O. Illina, assistant teacher, ORCID 0000-0003-4157-0846

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

IMPACT OF THE SMART GRID SYSTEM ON THE NATIONAL ENERGY NETWORK

Modern power system technologies offer the integration of renewable energy in electricity grids, intelligent metering, bidirectional communication between power generation units and the central control system for energy production and consumption, prevention of power outages, sustainable and safe energy sources, and energy security. Moreover, the modern energy system requires control, measurement and cybersecurity of energy processes at every point of the grid.

The infrastructure of the national networks of many countries is very old and includes classic technologies of production, transmission and distribution of electricity. In addition, the controllability and manageability of these systems are also unsatisfactory. On the other hand, Smart Grid technologies include sophisticated tools to monitor and control the power system in both directions from power plants to end users or vice versa so that vulnerabilities can be identified in advance and the necessary measures taken. In addition, the smart grid system offers monitoring and management of electricity from production to the end user, as well as provides smart accounting, integration of renewable energy into the grid. Moreover, the efficient use of energy sources with minimal losses and minimal illegal use is also addressed in smart grid technology. This article

highlights the impact of smart grid technologies on national power grids and offers some useful suggestions for transforming their classic power grid system into a Smart Grid grid system.

Transforming the classic network into an intelligent one fills its own business areas and provides increased efficiency, loss reduction, flexible price for consumers, safe and stable electricity, as well as reliable and digital infrastructure.

As a result, building a Smart Grid is a complex task, starting with a detailed quantification of system requirements, determining the actual goals and the levels of operation needed to achieve them. This research will be an effective and efficient tool for researchers, engineers, transmitter operators and distributors to transform the classical national energy system into an intelligent energy system.

Keywords: *Smart Grid, power systems, power grids, intelligent control, information and communication technologies, power distribution control systems.*

References

1. Colak I. Introduction to Smart Grid. 3rd International Smart Grid Workshop and Certificate Program (ISGWCP), Istanbul, Turkey, 2016. pp. 30-34
2. Colak I., Bayindir R., Sagioglu S. The Effects of the Smart Grid System on the National Grids 8th IEEE International Conference on Smart Grid (icSmartGrid), Paris, France, 2020. pp. 122–126.
3. Denisyuk S.P., Energy transition - requirements for qualitative changes in energy development. *Energy: economics, technology, ecology*, 2019, № 1. p. 7–28.
4. Denisyuk S.P., Strzelecki R., Formation of components of the intelligent management platform. . *Energy: economics, technology, ecology*, № 3. p. 8–22.
5. Lobodzinskiy V. Transient Analysis in Three-Phase Cable Lines with the Transposition Phase Cables Conductive Screens During Short Circuit Fault. IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2021. p. 413-416.
6. Lobodzinskiy Vadim, Chybelis Valeriy, Petruchenko Oleg, etal. Features of Transient Research in Three-Phase High-Voltage Power Transmission Cable Lines. *Grail of Science*, 2021, №6. pp. 132-145.
7. Lobodzinsky V.Y., Chibelis V.I., Analysis of transients in three-phase electrical circuits with distributed parameters and interphase connections on the example of a high-voltage cable line. *Energy: economics, technology, ecology*, 2021, №3. p. 64-69.
8. Oliynyk S., Electric networks will become "smart", 2021. [Electronic resource] – URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/elektrychni-merezhi-stanut-rozumnymy>.
9. The concept of "Green" energy transition of Ukraine until 2050. Ministry of Energy and Environmental Protection, 2020. [Electronic resource] – URL: <https://mepr.gov.ua/news/34424.html>
10. Chernyshova M.I., Tulchinskaya C.JO., Implementation of the Smart Grids project in the context of the development of the fuel and energy complex of Ukraine. *Effective Economy*, 2016, № 11.
11. Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy. [Електронний ресурс] – URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
12. Sources of renewable energy in modern energy. [Electronic resource] – URL: <https://ekotechnik.in.ua/istochniki-vozobnovlyajemoj-energii/>

Надійшла 13.02.2022

Received 13.02.2022

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

УДК 536.24:66.045.12

DOI

В.Ю. Ліщишин, аспірант ORCID 0000-0003-4327-3319

М.М. Вознюк, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-2452-2255

М.В. Воробйов, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-9621-7658

Є.М. Письменний, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-6403-6596

О.І. Руденко, канд. техн. наук, доцент ORCID 0000-0002-8541-9710

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

КОНТАКТНИЙ ТЕРМІЧНИЙ ОПІР МІЖ ОРЕБРЕННЯМ ТА ТРУБОЮ-ОСНОВОЮ ДЛЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОВЕРХОНЬ ТЕПЛООБМІНУ

Розроблена експериментальна установка для дослідження контактної термічної опору (КТО) композиційної теплообмінної труби яка виконана з плоскоовальної сталеві труби – основи та алюмінієвого оребріння, які приєднані до основи за допомогою контактної зварювання. Методом прямих вимірювань визначено величину КТО для композиційної теплообмінної труби, яка була порівняна із значеннями КТО для трьох видів біметалевих труб з накатаним алюмінієвим оребрінням: з трубою-основою з вуглецевої Сталі 20, з трубою-основою з нержавіючої сталі 1Х18Н10 та з трубою-основою з латуні. Встановлено, що для композиційної теплообмінної труби середній термічний опір контактуючих поверхонь не залежить від густини підведеного теплового потоку та складає постійну величину $R_k = 2,75 \cdot 10^{-6} \text{ K m}^2/\text{Вт}$, тобто для інженерних розрахунків практично дорівнює нулю і їм можна знехтувати. Для композиційної теплообмінної труби застосування технології контактної зварювання унеможливило погіршення термічного контакту між моноребрим і трубою внаслідок температурних коливань у процесі експлуатації теплообмінних апаратів. Отримані результати показують, що композиційна поверхня з привареним алюмінієвим моноребрим має на два порядки менший КТО порівняно з теплообмінними поверхнями з широко розповсюджених біметалевих труб всіх відомих типів. Це забезпечує максимальний коефіцієнт теплопередачі.

Ключові слова: контактний термічний опір, експериментальні дослідження, плоскоовальна оребрена труба, композиційна теплообмінна поверхня, теплопередача, контактне зварювання

Вступ

Оребрені конвективні теплообмінні поверхні мають широку сферу застосування у якості елементів повітряних конденсаторів, сухих градирень паротурбінних установок теплових та атомних електростанцій, котлів-утилізаторів газотурбінних і паротурбінних установок, водяних економайзерів парових котлів, повітряних калориферів для попереднього підігріву повітря в котельних установках, охолоджувачів мастила, теплообмінних апаратів компресорних станцій газотранспортної системи, конденсаторів холодильних машин великої потужності для харчової та переробної промисловості, центральних кондиціонерів крупних об'єктів та іншого теплообмінного обладнання типу «газ-рідина».

Пошук оптимальної конструкції оребраних труб є важливою задачею, оскільки підвищення питомого теплового потоку та зменшення аеродинамічного опору апаратів призводить до суттєвого зменшення капітальних та експлуатаційних витрат.

Прототипом нових високоефективних оребраних труб є композиційні теплообмінні поверхні [1], які розроблені в КПІ ім. Ігоря Сікорського і являють собою сталеві плоскоовальні труби з неповним оребрінням з високотеплопровідного матеріалу – алюмінію, які відповідають зазначеним вище вимогам щодо аеродинамічних та масогабаритних характеристик.

Застосування в конструкції нових оребраних труб головних принципів особливостей сталевих плоскоовальних труб з неповним оребрінням [2]: плоскоовальної основи, неповного поперечного оребріння, ідеального термічного контакту між оребрінням та трубою-основою потребують пошуку доступного при достатній теплопровідності матеріалу оребріння, вибору конструкції оребріння за

умовами жорсткості та міцності; необхідності застосування сталеві труби у якості основи, обумовленої вимогами до міцності і технологічності.

Так як високу теплопровідність мають матеріали із низькою міцністю (алюміній, мідь, і т.д.), запропоновано застосувати оребрення у вигляді гофрованої стрічки (моноребра) (рис. 1.), що забезпечує достатню для умов транспортування, монтажу і експлуатації жорсткість конструкції оребрення таких труб.

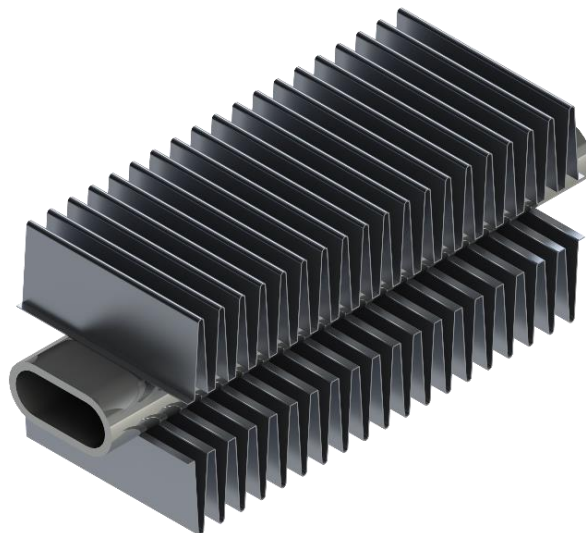


Рисунок 1 - Композиційна теплообмінна труба

Для отримання з'єднання труби та моноребер використовується двостороннє контактне зварювання, яке дозволяє приварювати одночасно дві ланки гофрованої стрічки. Така технологія має переваги при виробництві труб з неповним оребренням, що дозволяє забезпечити надійний термічний контакт гофрованої стрічки зі стінкою плоскоовальної труби.

Можливість створення розвиненої теплообмінної поверхні та інтенсифікація теплообміну за рахунок оребрення, виконаного з високотеплопровідних матеріалів, сприяє значному поліпшенню теплотехнічних характеристик теплообмінних апаратів, одночасно забезпечуючи їх каркасну міцність та довговічність. У випадку проектування та виготовлення таких поверхонь, коли несуча труба та ребра виконані з різних матеріалів, приєднаних між собою механічно, наприклад, накатуванням або втискуванням, в зоні їх контакту спостерігається температурний перепад. Це зумовлено наявністю міжконтактного зазору, в якому теплообмін здійснюється за рахунок теплопровідності дискретно розташованих контактних областей (плям), утворених в результаті залишкової шорсткості металевих поверхонь, що з'єднуються та теплопровідності середовища, що знаходиться в зазорі між ними. В зв'язку з тим, що теплопровідність середовища завжди менше контактуючих матеріалів, а площа плям невелика, то в зоні контакту виникає контактний термічний опір (КТО), який в цілому впливає на ефективність роботи теплообмінної поверхні.

Аналіз літературних досліджень в цій галузі показує, що на сьогодні вже існують достатньо надійні методики для розрахунку КТО [3, 4]. Проте, представлені в них розрахункові залежності описують контактний теплообмін переважно для пар з однакових матеріалів і значно рідше для пар з двох матеріалів, що мають різні фізико-механічні властивості. Зокрема, відмінності коефіцієнтів термічного розширення несучої труби та оребрення впливають на величину початкового зазору, який може зростати зі збільшенням робочої температури та збільшуватися протягом певного часу в процесі експлуатації теплообмінної поверхні. Так, в [5, 6, 7] представлені результати досліджень КТО біметалевих труб зі спіральньо-накатаним оребренням, які широко застосовуються в апаратах повітряного охолодження. В біметалевих трубах несуча труба виготовлена зі сталі, а оребрення з алюмінію, при проходженні теплового потоку через зону їх прилягання завжди має місце перепад температури між контактуючими поверхнями. В [8] експериментально досліджено КТО біметалевих труб вітчизняного виробництва, а в [9] отримані результати експериментального дослідження КТО для мідних теплових труб з насадженими на них за допомогою преса ребер з алюмінієвого сплаву.

Крім того, аналіз літературних джерел показав практичну відсутність інформації про КТО у випадку приєднання ребер до несучої труби шляхом зварювання. Як відомо з [5] наявність зварювального з'єднання забезпечує ідеальний термічний контакт між ребрами та трубою, але враховуючи те, що при виготовленні композиційної теплообмінної поверхні відбувається зварювання двох різнорідних матеріалів, було прийняте рішення про перевірку КТО даного з'єднання. Поява термічного опору може

бути пов'язана з неякісним приварюванням поверхні ребер до поверхні труби і як наслідок, утворення в контактній зоні порожнеч та раковин. Всі ці дефекти залежать від якості виконання основних та допоміжних технологічних операцій під час виготовлення поверхні, зокрема, наявності мікронерівностей, хвилястості, прогину плоскоовальної труби, недостатнього притиску ребер до поверхні труби і т.д.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є визначення контактного термічного опору композиційної теплообмінної поверхні, що має плоскоовальну сталеву трубу – основу та алюмінієве оребрення, які приєднані до неї за допомогою контактного зварювання.

Для досягнення мети дослідження були поставлені наступні задачі:

- Розробити експериментальну установку та методику проведення досліджень;
- Провести аналіз результатів та оцінити характеристики КТО запропонованої теплообмінної труби у порівнянні з КТО для інших видів оребрених теплообмінних поверхонь.

Матеріал і результати досліджень

На рис. 2 приведений загальний вигляд установки для дослідження КТО композиційної теплообмінної поверхні.



Рисунок.2 - Експериментальна установка для дослідження контактеного термічного опору дослідного зразка композиційної теплообмінної поверхні:

1 – дослідний зразок композиційної теплообмінної поверхні; 2 – посуд Дьюара; 3 – прилад живлення постійного струму Б5-44; 4 – модуль реєстрації сигналів термопар “Triton 6004TC”; 5 – комутаційний модуль “Triton C37”; 6 – блок комутації; 7 – мідь-константанові термопари; 8 – дроти живлення електронагрівача

Дослідний зразок поверхні (1) своєю нижньою частиною у вигляді гладкої неоребреної ділянки міцно закріплений в посуді Дьюара (2) та ретельно теплоізований базальтовою ватою марки БСТВ-1. Оребрена частина поверхні знаходиться ззовні та охолоджується повітрям. Підвід теплоти до ребер здійснюється за допомогою електронагрівача, який розміщується всередині труби і має довжину, що дорівнює довжині оребреної частини поверхні. Таке конструктивне рішення дозволило відводити теплоту через контактну область поверхонь несучої труби та ребер. Живлення електронагрівача по дротам (8) відбувалось приладом з регульованою напругою постійного струму типу Б5-44, яким фіксувалась підведена теплова потужність до електронагрівача шляхом переключення дискретних вимикачів вихідної напруги та струму, встановлених на передній панелі приладу. Сигнали з термопар (7) спрямовувалися через комутаційний модуль “Triton C37” (5) на модуль аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та

реєстрації типу “Triton 6004TC” (4). Блок живлення та комутації електродротів установки розміщувався на щиті управління експериментальним стендом (6).

Схема розташування термопар приведена на рис. 3. По одній термопарі (3) розташовувалось на протилежних плоских сторонах труби та закріплювалися на невеликій відстані від зовнішньої поверхні стінки плоскоовальної труби (1) навпроти зони приєднання поверхні моноребра (2) до труби (вид Б), а інші дві термопари (3) на відстані 15 мм між собою розміщалися у заглибленнях в контактній зоні ребра (види Б, В) посередині міжреберного проміжку та притискалися до поверхні ребра алюмінієвою липучою стрічкою (4).

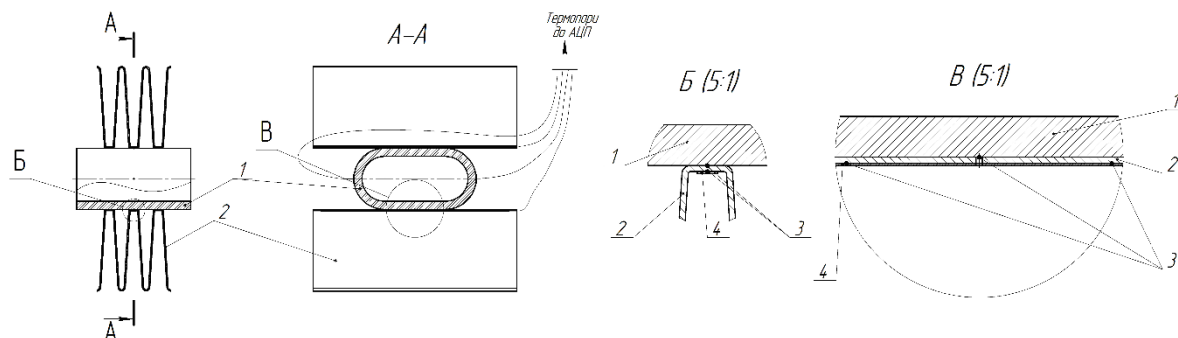


Рисунок 3 - Схема розташування термопар на монорєбрі та стінці труби при дослідженні термічного контактного опору:

1 – стінка плоскоовальної труби; 2 – монорєбро; 3 – термопари; 4 – кріпильна алюмінієва стрічка

На рис. 4 показаний вигляд ребреної поверхні з розташованими на ній вимірювальними термопарами. Для зменшення теплових втрат в навколишнє середовище гладка неоребрена частина плоскоовальної труби ізолювана ватою з базальтового волокна. В дослідженнях використовувалось шість мідь-константанових термопар діаметром дротів 0,08 мм, з них, по три термопари розміщалися симетрично щодо осі труби на діаметрально протилежних сторонах дослідного зразка в зоні контактного зварювального шва поверхонь моноребра та труби.

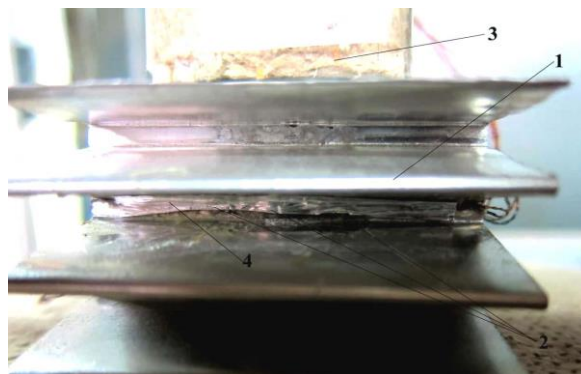


Рисунок 4 - Боковий вигляд дослідного зразка композиційної теплообмінної поверхні:
1 – монорєбро; 2 – мідь-константанові термопари; 3 – теплоізоляція електронагрівача;
4 – кріплення алюмінієвої стрічки

Таким чином, методом прямого вимірювання визначались температура стінки труби та середня за двома показами температура біля кореня ребра в області контактуючих поверхонь. На основі отриманих даних обчислювався температурний перепад на контактї в зонї приварювання ребер до труби.

Дослідження КТО проводилось при встановленні стаціонарного температурного режиму для кожного значення підведеної теплової потужності в межах $Q = (6 - 20)$ Вт. Діапазони температур та густин теплових потоків в зонї контакту відповідно складали $(35 - 130)^\circ\text{C}$ та $(15 - 65) \cdot 10^3$ Вт/м²К.

На рис. 5 приведені експериментальні дані величин контактної термічної опору в залежності від густин теплового потоку q_k . На основі первинно отриманих серій максимальних і мінімальних значень термічного опору (точки 1) проведено усереднення даних (точки 2) та побудована апроксимуюча залежність (крива 3). Як видно з рис. 5 середній термічний опір контактуючих поверхонь не залежить від підведеної густини теплового потоку і в зазначеному вище діапазоні q_k в межах методичних та приладових похибок складає постійну величину $R_k = 2,75 \cdot 10^{-6}$ К м²/Вт.

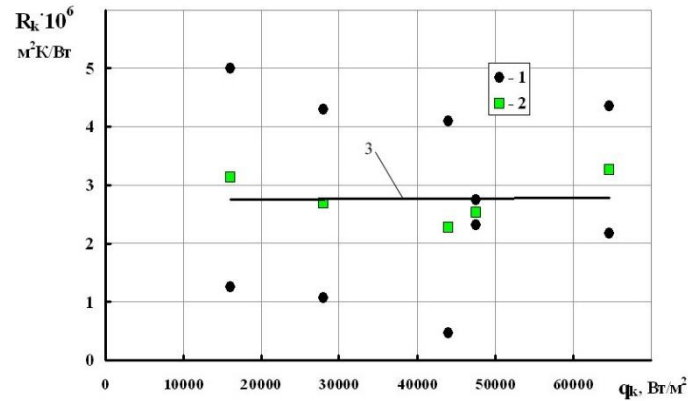


Рисунок 5 - Вплив густини теплового потоку на термічний контактний опір дослідного зразка композиційної теплообмінної поверхні:

1 – дослідні максимальні і мінімальні значення термічного контактного опору; 2 – середні значення термічного контактного опору; 3 – апроксимуюча крива

На рис.6 порівнюються КТО біметалевих труб з накатаними алюмінієвими ребрами, де матеріал труби-основи виконаний з різномірних матеріалів (криві 2, 3, 4) та КТО досліджуваної композиційної поверхні (крива 1) в залежності від середньої температури контакту t_k . Криві 2, 3, 4, отримані за розрахунковими формулами, що враховують форму (клас) шорсткості контактуючих поверхонь, які приведені в [5]. З аналізу кривих 2, 3, 4 випливає, що найбільші значення КТО відносяться до біметалевих труб (крива 2, основна труба з вуглецевої сталі 20) та змінюються в діапазоні $R_k = (260 - 360) \cdot 10^{-6} \text{ К м}^2/\text{Вт}$. Найменший КТО у біметалевій трубі з латунною основою, який змінюється в межах $R_k = (100 - 165) \cdot 10^{-6} \text{ К м}^2/\text{Вт}$ (крива 4).

В усіх біметалевих трубах спостерігається лінійне зростання КТО із збільшенням температури в зоні контакту, але значно сильніше зростання відбувається у біметалевій трубі з основою з вуглецевої сталі 20 в області температур $t_k = (100 - 150) \text{ }^\circ\text{C}$ (крива 2). В композиційній теплообмінній поверхні (крива 1), в якій присаднення моноребра до основи отримано за принципово іншою технологією контактного зварювання, КТО не залежить від збільшення температури в зоні контакту, а його значення в (100 – 110) разів менше, ніж в біметалевих трубах з накатаним алюмінієвим оребренням.

Складний процес теплообміну в оребрених поверхнях характеризується коефіцієнтом теплопередачі K , який залежить від багатьох чинників і зокрема від величини термічного контактного опору R_k . На рис. 7 показаний вплив величини термічного контактного опору на коефіцієнт теплопередачі для різних досліджених поверхонь. Так, збільшення величини термічного опору від $R_k = 2 \cdot 10^{-4} \text{ К м}^2/\text{Вт}$ до $R_k = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ К м}^2/\text{Вт}$, які характерні для біметалевих оребрених труб, призводить до зменшення коефіцієнта теплопередачі K від 20 % до 30 %. В той же час, коефіцієнт теплопередачі поверхні з алюмінієвим моноребром, яка має на два порядки менший, в порівнянні з біметалевими оребреними трубами КТО (рис. 6), зменшується всього на 0,25 % по відношенню до монолітної оребреної труби, для якої $R_k = 0 \text{ К м}^2/\text{Вт}$ (рис. 7). Тому при розрахунках теплообміну композиційних теплообмінних поверхонь контактний термічний опір між оребренням і трубою основою можна не враховувати.

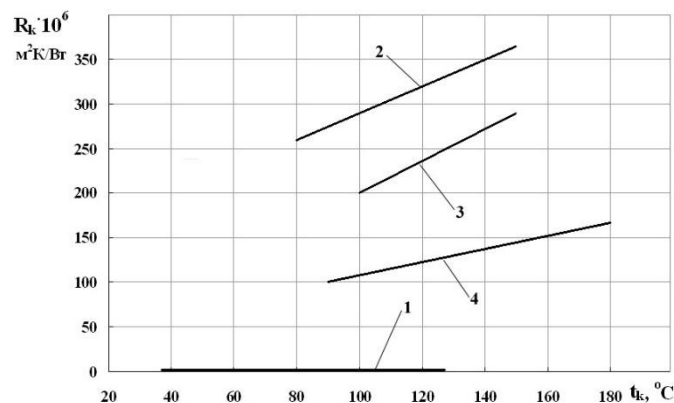


Рисунок 6 - Залежність термічного контактного опору від температури в зоні контакту:

1 – композиційна теплообмінна поверхня; 2 – біметалеві труби з накатаним алюмінієвим оребренням (труба-основа з вуглецевої Сталі 20); 3 – біметалеві труби з накатаним алюмінієвим оребренням (труба-основа з нержавіючої сталі 1X18H10); 4 – біметалеві труби з накатаним алюмінієвим оребренням (труба-основа з латуні)

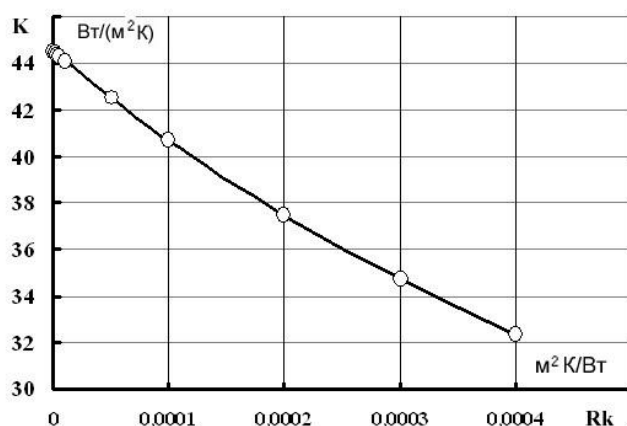


Рисунок 7 - Вплив величини термічного контактного опору на коефіцієнт теплопередачі

З вищенаведеного впливає, що запропонована композиційна поверхня з приварним алюмінієвим монорребром має суттєві переваги, порівняно з теплообмінними поверхнями з широко розповсюджених біметалевих труб.

Висновки

Проведені дослідження показали наступне:

- контакт між поверхнями ребра і труби є досконалим, середній термічний опір контактуючих поверхонь не залежить від підведеної густини теплового потоку та практично дорівнює нулю (середнє значення складає $R_k = 2,75 \cdot 10^{-6}$ Км²/Вт), тому, в теплових розрахунках композиційних поверхонь їм можна знехтувати;
- застосування методу контактного зварювання унеможливує погіршення термічного контакту між ребром і трубою-основою внаслідок температурних коливань у процесі експлуатації теплообмінних апаратів;
- композиційна поверхня з приварним алюмінієвим монорребром має на два порядки менший контактний термічний опір у порівнянні з КТО широко розповсюджених біметалевих оребрених труб всіх відомих типів, що забезпечує максимальний коефіцієнт теплопередачі.

Список використаної літератури

1. Письменний Є.М., Вознюк М.М., Ніщик О.П., Терех О.М. Композиційна теплообмінна труба / Патент на корисну модель UA 148303. 21.07.2021. Бюл. №29.
2. Pismennyi E.N. Study and application of heat-transfer surfaces assembled from partially finned flat-oval tubes. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 106. P. 1075 – 1087.
3. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. –М.: Энергия, 1971. 216 с.
4. Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. С-Пб.: Энергоатомиздат, 1992. 280 с.
5. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977. 328 с.
6. Андрижиевский А.А., Дударев В.В., Сухоцкий А.Б. Тестирование биметаллических ребристых труб по величине термического сопротивления механического контакта несущей трубы и оребренной оболочки. *Труды БГТУ: Химия и технология неорганических веществ*, 2013, №3. С. 166 – 169.
7. Пиир А.Э., Верещагин А.Ю., Миннигалеєв А.Ш. Влияние высокотемпературного прогрева несущей трубы на ТКС БРТ. *Труды РНКТ-5*. 2010. Т.6. С.153 – 155.
8. Руденко А.И. Исследование контактного термического сопротивления для тепловых труб из меди с оребрением из алюминиевого сплава. *Промышленная теплотехника*, 2007, т.29, №4. С.22 – 28.
9. Руденко А.И., Нищик А.П. Исследование контактного термического сопротивления в биметаллических трубах со спирально-накатным оребрением. *Промышленная теплотехника*, 2009, т.31, №5. С. 15 – 19.

V. Lishchyshyn, PhD student, ORCID 0000-0003-4327-3319

M. Vozniuk, Cand. Sc., ORCID 0000-0002-2452-2255

M. Vorobyov, Cand. Sc., ORCID 0000-0001-9621-7658

E. Pismennyi, Dr. Sc., Prof., ORCID 0000-0001-6403-6596

A. Rudenko, Cand. Sc., Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-8541-9710

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

CONTACT THERMAL RESISTANCE BETWEEN THE FIN AND PIPE-BASE FOR COMPOSITE HEAT TRANSFER SURFACES

Experimental setup for investigation of contact thermal resistance (CTR) of composite heat-exchange tube, made of flat-oval steel tube – base and aluminum fins, which are connected to the base by means of contact welding, has been developed. By direct measurement, the CTR values for a composite heat exchanger tube are compared to the CTR values for three types of bimetallic tubes with rolled aluminium fins: carbon steel 20 base tube, stainless steel 1X18H10 base tube and brass base tube. It is established that for a composite heat-exchange tube the mean thermal resistance of contacting surfaces doesn't depend on the density of supplied heat flow and makes constant value $R_k = 2,75 \cdot 10^{-6} \text{ Km}^2/\text{W}$, that is practically equal to zero for engineering calculations and it is possible to neglect it. For composite heat-exchange tube the application of contact welding technology makes it impossible to deteriorate thermal contact between monorail and tube due to temperature fluctuations in the process of operation of heat-exchange apparatuses. The results obtained show that the composite surface with welded aluminium monofin has two orders of magnitude lower CTR than the heat exchange surfaces made of widely used bimetallic tubes of all known types. This provides the highest heat transfer coefficient.

Keywords: contact thermal resistance, experimental investigations, flat-oval finned tube, composite heat-exchange surface, heat transfer, contact welding

References

1. E.N. Pismennyi, M.M. Voznyuk, A.P. Nischik, A.M. Terekh, "Composite heat-exchange tube", Patent for utility model UA 148303, 21.07.2021, Bulletin number 29.
2. E.N. Pismennyi, "Study and application of heat-transfer surfaces assembled from partially finned flat-oval tubes", Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 106. P. 1075 – 1087.
3. V.M. Popov, "Heat-exchange in the contact zone of the detachable and indivisible joints", M.: Energia, 1971. 216 p.
4. V.B. Kuntyshev, N.M. Kuznetsov, "Thermal and aerodynamic calculation of finned heat exchangers for air cooling", S-Pb: Energoatomizdat, 1992. 280 p.
5. Yu.P. Shlykov, E.A. Ganin, S.N. Tsarevsky, "Contact thermal resistance", Moscow: Energia, 1977. 328p.
6. A.A. Andrizhievsky, V.V. Dudarev, A.B. Sukhotsky, "Testing of bimetallic finned tubes on the thermal resistance value of the mechanical contact between the carrier tube and the finned shell", Proceedings of BSTU: Chemistry and technology of inorganic substances, 2013, №3. pp. 166 – 169.
7. A.E. Piiir, A.Yu. Vereshchagin, A.Sh. Minnigaleev, "Effect of high-temperature heating of the supporting tube on the TKS of the BRT", Proceedings of the RSCT-5. 2010. Vol.6. pp.153 – 155.
8. A.I. Rudenko, "Investigation of contact heat resistance for heat tubes of copper with Al-alloy finned", Industrial Heat Engineering, 2007, Vol. 29, 4. pp. 22 – 28.
9. A.I. Rudenko, A.P. Nischik, "Research of contact thermal resistance in bimetallic pipes with spiral-rolling fins", Industrial Heat Engineering, 2009, Vol.31, No.5. pp. 15 – 19.

Надійшла 17.01.2022

Received 17.01.2022

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДЕНСАТОРА ЕНЕРГОБЛОКА АЕС

В роботі показано, що технічний стан конденсаційних пристроїв паротурбінних установок значною мірою визначає величину втрат електричної енергії, надійну і економічну роботу енергоблоків АЕС, а модернізація конденсаторів парових турбін дозволить забезпечити суттєвий приріст генерації електричної енергії при відносно невисоких капітальних вкладеннях порівняно з витратами на будівництво нових енергоблоків АЕС. Аналіз досконалості процесу теплопередачі в конденсаторі згідно принципів термoeкономічної діагностики з метою виявлення причин аномальної роботи енергоперетворювальної системи показав, що основні причини зниження навантаження визначаються підвищенням температури охолоджуючої води і відхиленням тиску пари в конденсаторі від нормального значення, а серед діагностичних параметрів окрім величини присосів, повинна бути оцінка забруднень поверхні теплообміну, яка суттєво впливає на зниження виробітку електроенергії. Розглянуто основні моменти модернізації конденсатора енергоблоку № 3 Запорізької АЕС за принципом «блочно-модульної» конструкції розробки ПАТ «Турбоатом» та характеристики конденсатора К-38080, які забезпечує нова конструкція. Наведено методику теплового розрахунку конденсатора із застосуванням ітераційних методів, за якою враховано наявність присосів повітря в просторі конденсатора та появу забруднень поверхні теплообміну. Обчислено та проаналізовано приріст електричної потужності на затискачах генератора при зміні фактору парового навантаження та товщини забруднення. Визначено аналітичну залежність досліджуваних параметрів зниження приросту електричної потужності при модернізації конденсатора та зроблено інтерпретацію результатів. Робота підкреслює важливість обробки результатів діагностики та моніторингу технічного стану конденсаційних пристроїв паротурбінних установок та інформації про їх вплив на величину генерації електричної потужності.

Ключові слова: *тепловий розрахунок конденсатора АЕС, присоси повітря, забруднення, приріст електричної потужності*

1. Вступ. Конденсаційна установка призначена для зниження параметрів пари за турбіною, що є одним з основних способів досягнення високого термічного ККД паротурбінної установки, оскільки відомо, що при зміні тиску за турбіною на 1 кПа економічність паротурбінних установок АЕС змінюється приблизно на 1,5-2% [1]. Враховуючи, що обладнання українських АЕС працює понад 30 років, а зниження виробітку електроенергії, спричинене лише технічним станом конденсаційних пристроїв паротурбінних установок значною мірою нівелює зазначений приріст ефективності, діагностика та моніторинг технічного стану конденсаційних пристроїв паротурбінних установок сприятимуть покращенню даної ситуації.

Із технічним станом теплообмінного обладнання пов'язують надійну і економічну роботу енергоблоків АЕС. Зниження виробітку електроенергії відбувається як внаслідок погіршення вакууму в конденсаторах, так і через розвантаження енергоблоків для пошуку присосів води. Модернізацією конденсаторів парових турбін можна досягти суттєвого приросту генерації електричної енергії при відносно невисоких капітальних вкладеннях порівняно з витратами на будівництво нових енергоблоків АЕС, а оцінка їх технічного стану дозволить вчасно вжити необхідні заходи.

Тиск в конденсаторі залежить від наступних основних параметрів: температури охолоджуючої води на вході, кратності охолодження, коефіцієнта теплопередачі і питомого парового навантаження. Тому в роботі розглядається зміна електричної потужності турбоустановки на затискачах генератора при зниженні витрати пари в конденсаторі та при появі забруднень поверхні теплообміну.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Ядерна енергетика виробляє понад 50% електроенергії і є важливою ланкою в забезпеченні енергетичної незалежності України. Однак основне обладнання енергоблоків АЕС виробило ресурс до та понад 60% і потребує пошуку шляхів до підвищення надійності, працездатності, безпеки і подовження терміну служби.

Технічний стан конденсаційних пристроїв паротурбінних установок значною мірою визначає величину втрат електричної енергії. Порушення в роботі конденсаторів призводять до вимушеного зниження електричної потужності енергоблоку і погіршення надійності, а також до істотного недовиробітку електроенергії. За оцінками фахівців Південноукраїнської АЕС через забруднення конденсаторів на енергоблоці №1 в місяць в середньому втрачалось 20-30 млн кВт·год, на блоці №2 5-15 млн кВт·год, що відповідає виведенню з експлуатації енергоблоку протягом півдобы або doby [2].

В Україні діють 4 атомні електростанції з 15-ю енергоблоками, 12 з яких на 2020р. мають термін експлуатації понад 30 років, модернізація наявного обладнання необхідна для забезпечення енергобезпеки України, виконання Енергетичної стратегії країни, а також дає можливість роботи обладнання АЕС спільно з енергосистемами європейських країн. На двох енергоблоках з 15 останнім часом (№ 2 ВП «Південноукраїнська АЕС» та № 3 ВП «Запорізька АЕС») проведена модернізація конденсаторів паротурбінних установок за принципом «блочно-модульного» виконання, які можуть працювати при різних умовах експлуатації енергоблоків АЕС потужністю 1000 МВт. Унікальна конструкція конденсаторів забезпечила підвищення теплової потужності реакторної установки енергоблоків до 107 % [3].

Проте в літературних джерелах не достатньо відображено характеристики приросту електричної потужності на затискачах генератора з новими конденсаторами «блочно-модульного» виконання. Метою роботи є дослідити зв'язок між зміною витрати пари в конденсаторі, появою забруднень поверхні теплообміну та приростом електричної потужності турбоустановки при модернізації конденсаторів за рахунок поглиблення розрахункового тиску пари.

В сучасних умовах управління ресурсом обладнання енергоблоків АЕС здійснюється за допомогою комплексної системи діагностики, яка є водночас інструментом визначення технічного стану і способом комплексного інженерного обстеження устаткування та оцінки його залишкового ресурсу. Згідно принципів термoeкономічної діагностики [4-6], метою якої є виявлення причин аномальної роботи енергоперетворювальної системи, порівнюються два режими роботи установки: проектний (еталонний) і реальний, в якому мають місце аномалії в роботі елементів, викликані появою в процесі їх експлуатації додаткових незворотностей. Основу термoeкономічної діагностики становить декомпозиційний вартісний аналіз деструкції ексергії в елементах системи, за яким аналіз досконалості процесу теплопередачі в конденсаторі здійснюють за допомогою коефіцієнта втрат ексергії продукту [7], числа одиниць деструкції ексергії [8] та потенціалу покращення термодинамічної ефективності елемента (показник Ван Гула) [9].

Питання реновації енергетичних блоків АЕС шляхом впровадження автоматичного діагностування низькопотенціальних комплексів (НПК) турбінних устаткувань розглядається в [10]. Автор підкреслює, що основні причини зниження навантаження визначаються умовами роботи НПК – підвищенням температури охолоджуючої води і відхиленням тиску пари в конденсаторі від нормального значення, та наводить перелік діагностичних параметрів, серед яких є величина присосів, проте немає оцінки забруднень поверхні теплообміну.

3. Мета дослідження. Метою роботи є аналітичний опис залежності електричної потужності турбоустановки на затискачах генератора від зміни витрати пари в конденсаторі та появи забруднень поверхні теплообміну шляхом побудови множинної лінійної регресійної залежності на основі статистичних даних та інтерпретація отриманих результатів.

4. Методика теплового розрахунку модернізованого конденсатора блочно-модульного виконання. Після тривалої експлуатації в конденсаторах турбін починають проявлятися дефекти, що призводять до присосів охолоджуючої води. Вони починають проявлятися через певний час і мають тенденцію до поступового зростання. Найбільш ймовірними причинами виникнення даного виду дефектів є: корозійне розтріскування металу в місцях локального механічного впливу; розвиток пітингово-виразкового дефекту або прикладання навантажень в місцях вальцювальних з'єднань; механічні пошкодження труб. Оперативному виявленню цих присосів може служити організація в корпусі конденсатора сольових відсіків. Ефективним способом зменшення присосів є, наприклад, виконання подвійних трубних дошок з подачею в порожнину між ними конденсату з тиском, що перевищує тиск охолоджувальної води.

Енергоблок № 3 Запорізької АЕС був пущений в 1986 році. У його складі – турбіна К-1000-60/1500-2, яка до продовження терміну експлуатації блоку і проведеної модернізації була укомплектована трьома конденсаторами типу К-33160 і 12-ю приймально-скидними пристроями. Запропонована «блочно-модульна» конструкція конденсатора нового покоління забезпечує підвищення надійності, працездатності та безпеки і збільшує термін служби всього блоку. У створеній конструкції конденсатора К-38080 використані авторські розробки ПАТ «Турбоатом» [3].

Конструкція конденсатора, виконана з «модульним» компонованням трубного пучка, запобігає переохолодженню конденсату і насичення його газами, що не конденсуються. Вона герметична і виключає присоси повітря, а також потрапляння охолоджувальної води в паровий простір. Максимальна величина можливого присоса охолоджуючої води в паровий простір конденсатора становить не більше 0,00001% від витрати пари в конденсатор протягом усього терміну служби конденсатора. У конструкції нижніх модулів передбачені додаткові елементи (деаераційні щити і деаераційні пристрої), що дозволяють знизити кисневу складову в конденсаті.

Таким чином, нова конструкція конденсатора забезпечує [3]:

- установку корпусів на існуючі опори фундаменту без зміни конструкції фундаменту і його розрахунку;

- щільність кріплення труб охолоджуючих в дошках зовнішніх за рахунок вальцювання і зварювання за технологією підприємства-виготовлювача;
 - поглиблення розрахункового тиску пари в конденсаторі (вакууму) з відповідним приростом електричної потужності турбоустановки на затискачах генератора;
 - установку на входних, вихідних і проміжних камерах люків, які забезпечують доступ до охолоджуючих труб для визначення можливих дефектів труб і контролю щільності з'єднання труб охолоджуючих з дошками зовнішніми;
 - покриття внутрішніх поверхонь камер водяних, кришок і з'єднань анкерних антикорозійним матеріалом;
 - відведення з трубного пучка пароповітряної суміші, що не зконденсувалася;
 - повну конденсацію пари, що надходить з циліндрів низького тиску турбіни;
 - працездатність при форсуванні теплової потужності реакторної установки до 3210 МВт (107%).
- Характеристики конденсатора після модернізації представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Конструктивні характеристики конденсатора К-38080

Показник	Після модернізації
Тип	поверхневий
Поверхня охолодження, м ²	38080
Тип труби	зварна
Сортамент труб, мм	Ø23x0,5x14060 Ø23x1,0x14060
Кількість труб	37644
Кріплення труб в дошках зовнішніх	вальцювання і зварювання
Кількість ходів/потоків	2/2
Витрата пари в конденсатор, т/год	1114,22
Тиск пари в конденсаторі, кПа	3,57
Витрата води охолоджуючої в конденсатор, т/год	56000
Розрахункова температура охолоджуючої води, °С	15
Швидкість води в трубах, м/с	2,0

Основною характеристикою роботи конденсатора є величина створюваного ним розрідження або абсолютного тиску в конденсаторі. Крім того, при обчисленні коефіцієнта теплопередачі в конденсаторі згідно різних методик необхідно знати середню температуру охолоджуючої води, за якою обчислюється коефіцієнт тепловіддачі з водяного боку, а також різницю температур між парою й водою для визначення коефіцієнта тепловіддачі з парового боку. Всі ці температури також повинні визначатися в результаті теплового розрахунку, тому повний тепловий розрахунок конденсатора вимагає застосування ітераційних методів, коли попередньо задаються, а потім уточнюються деякі необхідні для розрахунку величини (наприклад, кінцева температура охолоджуючої води). В роботі розрахунок виконувався за методикою, викладеною в [1].

Коефіцієнт теплопередачі визначається за формулою:

$$K = 4070 \cdot a \cdot \left(\frac{1,1 \cdot w_B}{d_{вн}^{0,25}} \right)^{0,12 \cdot a(1+0,15t_{1B})} \times \left[1 - \frac{(0,52 - 0,0072 \cdot d_k) \cdot \sqrt{a}}{1000} \cdot (35 - t_{1B})^2 \right] \cdot \left[1 + \frac{z-2}{10} \cdot \left(1 - \frac{t_{1B}}{35} \right) \right] \cdot \Phi_d; \quad (1)$$

де a – коефіцієнт стану поверхні теплообміну конденсатора (враховує забруднення трубок, а також опосередковано відображає щільність вакуумної системи); w_B – швидкість охолоджуючої води в трубах, м/с; $d_{вн}$ – внутрішній діаметр трубок, мм; t_{1B} – температура охолоджуючої води на вході в конденсатор, °С; z – число ходів води в конденсаторі; $d_k = D_k / F$ – питома парове навантаження конденсатора, г/(м²·с); F – поверхня охолодження конденсатора, м²; Φ_d – коефіцієнт, що враховує вплив парового навантаження конденсатора (d_k).

У першому наближенні температуру води на виході визначали при прихованій теплоті фазового переходу $r = \Delta h_k = 2435,94$ кДж/кг :

$$t_{2B} = t_{1B} + \frac{D_k \cdot \Delta h_k}{G_6 \cdot c_{p6}}. \quad (2)$$

Недогрів води до температури насичення:

$$\delta_t = \frac{t_{2g} - t_{1g}}{\frac{k \cdot F}{G_g \cdot c_{pg}} - 1}. \quad (3)$$

Температура насичення пари в конденсаторі:

$$t_n = t_{1g} + \Delta t + \delta_t. \quad (4)$$

За значенням останньої визначається прихована теплота фазового переходу і уточнюються значення температури води на виході з конденсатора.

Згідно методики розрахунку визначається розбіжність між прийнятими і отриманими значеннями нагріву води. Далі при необхідності продовження розрахунку у другому наближенні аналогічним чином обчислюються недогрів води до температури насичення, температура насичення пари в конденсаторі.

Тиск в конденсаторі, який відповідає температурі насичення t_n , знаходиться за таблицями властивостей водяної пари як функція температури насиченої пари. Далі за типовою енергетичною характеристикою турбіни або за універсальною залежністю $\Delta N / D_k = f(p_k / D_k)$ визначається приріст електричної потужності на затискачах генератора.

Наявність присосів повітря в просторі конденсатора у розрахунку вносилась зміною витрати пари в конденсаторі.

Питоме парове навантаження визначалося за формулою:

$$d_k = D_k / F \quad (5)$$

при номінальному значенні питомого парового навантаження $d_{номк} = 40,30 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

Граничне парове навантаження:

$$d_{грк} = (0,9 - 0,012 \cdot t_{1g}) \cdot d_{номк}; \quad (6)$$

фактор парового навантаження в діапазоні $d_k < d_{грк}$:

$$\Phi_d = d_k / d_{грк} (2 - d_k / d_{грк}). \quad (7)$$

Повний термічний опір передачі теплоти в конденсаторі з чистою поверхнею теплообміну дорівнює сумі термічних опорів з боку охолоджуючої води (перший доданок в знаменнику виразу), стінки трубок поверхні теплообміну (другий доданок в знаменнику виразу) і з боку пари, що конденсується (третій доданок в знаменнику виразу).

$$K = \frac{1}{R_B + R_{CT} + R_{II}}, \quad (8)$$

де

$$R_B = \frac{1}{\alpha_B} \cdot \frac{d_3}{d_{вн}}, \quad (9)$$

$$R_{CT} = 1,15 \cdot \frac{d_3}{\lambda_{CT}} \cdot \lg \frac{d_3}{d_{вн}}, \quad (10)$$

$$R_{II} = \frac{1}{\alpha_{II}}. \quad (11)$$

При наявності забруднень поверхні теплообміну їх термічний опір увійде додатковим доданком в знаменник виразу, тобто

$$K_3 = \frac{1}{\frac{1}{K} + R_3}. \quad (12)$$

Розрахунок проводиться за умов появи в трубках поверхні теплообміну забруднення, що має коефіцієнт теплопровідності $2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при товщині $0-0,2 \text{ мм}$.

5. Режимні характеристики модернізованого конденсатора К-38080

Згідно режимних характеристик конденсатора, які приведені в таблиці 2, обчислено та наведено на рис. 1-2 приріст електричної потужності на затискачах генератора при зміні фактору парового навантаження (рис.1) та товщини забруднення (рис.2).

Аналіз побудованих залежностей показав, що при зниженні фактору парового навантаження відбувається зниження приросту електричної потужності на затискачах генератора. Поява забруднень на поверхні теплообміну також негативно впливає на приріст електричної потужності на затискачах генератора, при цьому на зміну досліджуваного параметру також має вплив температура охолоджуючої води: чим вона вище, тим менший ефект модернізації конденсатора.

Проте доцільно дослідити залежність електричної потужності турбоустановки на затискачах генератора від зміни витрати пари в конденсаторі та появи забруднень поверхні теплообміну шляхом

побудови множинної лінійної регресійної залежності на основі статистичних даних та зробити інтерпретацію отриманих результатів.

Таблиця 2 – Режимні характеристики конденсатора до та після модернізації

Розрахункова температура охолоджуючої води на вході в перший корпус конденсатора, °С	Середнє значення тиску пари конденсатора, кПа		Приріст електричної потужності турбоустановки на затискачах генератора після модернізації конденсатора, МВт
	існуючого К-33160	модернізованого К-38080	
15	3,825	3,57	0,9
20	4,923	4,668	2,1
25	6,414	6,1	3,1
30	8,345	7,963	4,1
35	10,846	10,356	5,2

Для спрощення подальшого представлення матеріалів введемо позначення:

Y – прогнозований приріст електричної потужності на затискачах генератора, МВт, X_1 – температура води на вході, °С, X_2 – фактор парового навантаження, в.о., X_3 – товщина забруднення, мм.

Враховуючи умови побудови багатфакторної моделі щодо відсутності мультиколінеарності факторів оцінимо характер взаємозв'язків залежної змінної Y від незалежних змінних X_{1i} , X_{2i} , X_{3i} . Для цього побудуємо матрицю парних коефіцієнтів кореляції (табл. 3).

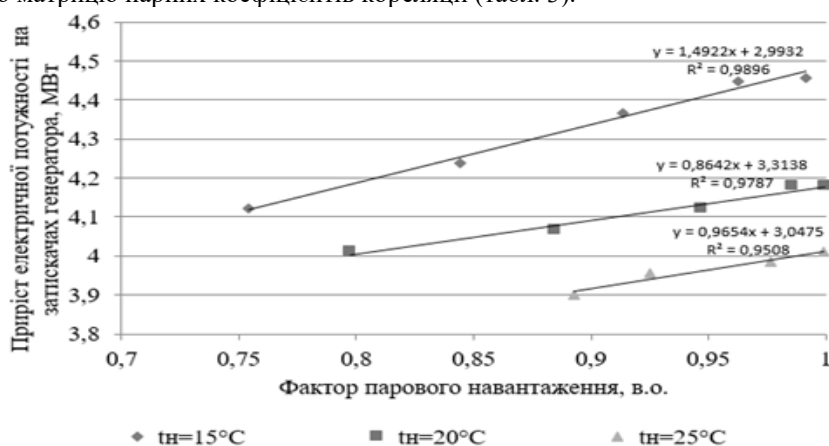


Рисунок 1 – Приріст електричної потужності на затискачах генератора при зміні фактору парового навантаження

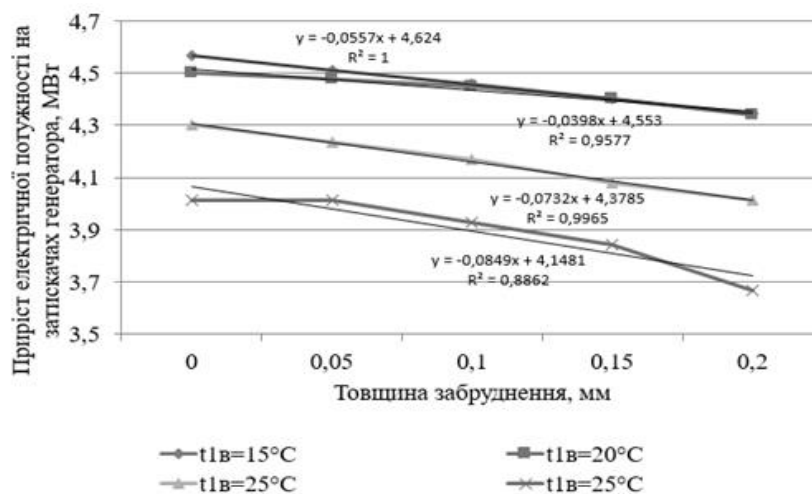


Рисунок 2 – Приріст електричної потужності на затискачах генератора при зміні товщини забруднення

Таблиця 3 – Матриця парних коефіцієнтів кореляції

	Y	X_1	X_2	X_3
Y	1	-0,772534862	0,205126	-0,09474
X_1		1	0,2905	0,182112
X_2			1	0,429806
X_3				1

Парні коефіцієнти кореляції між незалежними змінними моделі незначні. Це свідчить про відсутність мультиколінеарності. Отже, в даному випадку доцільно будувати модель множинної лінійної регресії за допомогою методу найменших квадратів. В Excel можна скористатися Пакетом аналізу, опцією Регресія. В таблицях 4-5 наведено результати роботи Пакету аналізу, звідки:

$$b_0 = 3,20628, b_1 = -0,03906, b_2 = 1,918999, b_3 = -0,49651.$$

Відповідно,

$$\hat{Y}_i = 3,20628 - 0,03906 X_{1i} + 1,918999 X_{2i} - 0,49651 X_{3i}, \quad (13)$$

де \hat{Y}_i – прогнозований приріст електричної потужності на затискачах генератора, МВт, X_{1i} – температура води на вході, °C, X_{2i} – фактор парового навантаження, в.о., X_{3i} – товщина забруднення, мм.

Таблиця 4 – Регресійна статистика

Множинний R	0,905222
R-квадрат	0,819427
Нормований R-квадрат	0,80137
Стандартна похибка	0,102024
Спостереження	34

Таблиця 5 – Результати роботи Пакету аналізу

	Коефіцієнти	Стандартна помилка	t -статистика	P -Значення
Y -перетин	3,20628	0,291717	10,99108	4,84E-12
$X_{1i} = t_{1e}$	-0,03906	0,003532	-11,0603	4,16E-12
$X_{2i} = \Phi_d$	1,918988	0,317102	6,051634	1,21E-06
$X_{3i} = \sigma$	-0,49651	0,265186	-1,87229	0,070943

Оцінка параметра b_0 дорівнює 3,20628 і є оцінкою середнього приросту електричної потужності на затискачах генератора, МВт, при відсутності впливу температури води на вході, фактору парового навантаження, товщини забруднення. Тобто ця величина характеризує приріст за рахунок модернізації конденсатора.

Оцінка параметра b_1 дорівнює -0,03906. Це означає, що при заданих факторі парового навантаження та товщині забруднення зростання температури на вході призведе до зниження очікуваного приросту електричної потужності на затискачах генератора на 40 кВт. Аналогічно оцінка параметра b_2 , що дорівнює 1,918988, означає, що при фіксованих температурі води на вході та товщині забруднення зростання фактору парового навантаження супроводжується зростанням очікуваного приросту електричної потужності на затискачах генератора на 1,92 МВт. Отже, оцінка параметра b_3 , що дорівнює -0,49651, означає, що при фіксованих температурі води на вході та факторі парового навантаження зростання товщині забруднення супроводжується зниженням очікуваного приросту електричної потужності на затискачах генератора на 0,5 МВт. Ці оцінки дозволяють краще розуміти вплив досліджуваних факторів на зміну електричної потужності на затискачах генератора.

Оскільки в моделі множинної регресії існують принаймні три пояснюючі змінні, коефіцієнт множинної змішаної кореляції являє собою частку варіації змінної Y , що пояснюється заданим набором пояснюючих змінних: $r^2 = 0,8194$.

Це означає, що 81,94% приросту електричної потужності на затискачах генератора пояснюється змінами показників температури води на вході, фактору парового навантаження та товщини забруднення.

Аналіз розподілу залишків в залежності від передбачених значень показує, що оскільки їх величина не залежить від передбачених значень і приймає як позитивні так і негативні значення (рис.4), умова лінійної залежності змінної Y від пояснюючих змінних виконується.

Переконавшись за допомогою аналізу залишків, що модель лінійної множинної регресії є адекватною, можна визначити, чи існує статистично значуща взаємозв'язок між залежною змінною і набором пояснюючих змінних. Оскільки в модель входить кілька пояснюючих змінних, нульова і

альтернативна гіпотези формулюються наступним чином: $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$, H_1 : існує принаймні одне значення $\beta_j \neq 0$ (між відгуком і хоча б однією пояснюючою змінною існує лінійна залежність).

Для перевірки нульової гіпотези про відсутність лінійної залежності застосовується F -критерій: при рівні значущості α нульова гіпотеза H_0 відхиляється, якщо $F > F_{U(k, n-k-1)}$, в іншому випадку гіпотеза H_0 не відхиляється.

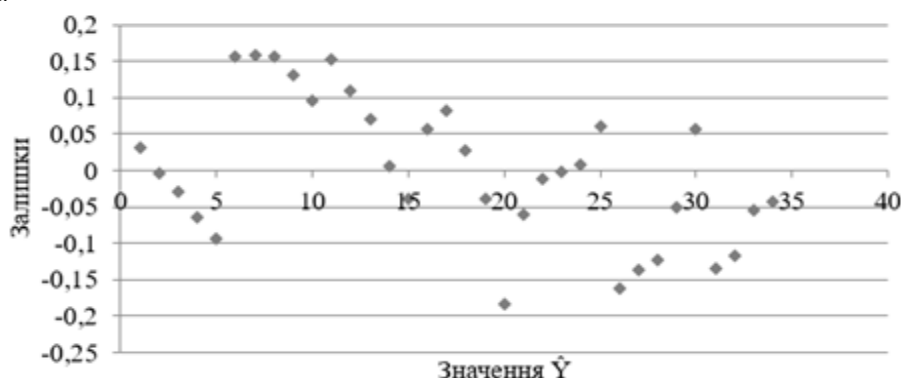


Рисунок 4 – Залежність залишків від передбачених значень \hat{Y}_i

Таблиця 6 – Зведена таблиця дисперсійного аналізу для перевірки гіпотези про статистичну значущість коефіцієнтів регресії

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	Значимість <i>F</i>
Регресія	3	1,417036	0,472345	45,37929	2,89E-11
Залишок	30	0,312265	0,010409		
Всього	33	1,729301			

Якщо рівень значущості дорівнює 0,05, критичне значення F -розподілу з 3 і 30 ступенями свободи $F_{U(2,31)} = F_{OBR}(1-0,05; 3; 30) = 0,11606$.

Згідно таблиці 6, F -статистика дорівнює $45,3793 > F_{U(2,31)} = 0,11606$, а p -значення близьке до 0,000 $< 0,05$. Отже, нульова гіпотеза H_0 відхиляється, і приріст електричної потужності на затискачах генератора лінійно пов'язаний хоча б з однією з пояснюючих змінних (температурою води на вході, фактором парового навантаження, товщиною забруднення).

Результати застосування t -критерію отримані за допомогою Пакету аналізу для кожної з незалежних змінних, включених в регресійну модель. Таким чином, вплив температури води на вході:

$$t_1 = 11,0603,$$

вплив парового навантаження:

$$t_2 = 6,05163,$$

вплив товщини забруднення:

$$t_3 = 1,87229.$$

Якщо рівень значущості дорівнює 0,05, критичними значеннями t -розподілу з 30 ступенями свободи є $t_L = -2,3595$ і $t_U = 2,3595$. p -значення = 0. На підставі однієї з нерівностей $t = 6,05163 > 2,3595$ або $p = 0,0000 < 0,05$ нульова гіпотеза H_0 відхиляється. Отже, при фіксованій температурі і товщині забруднення між змінною X_2 (фактор парового навантаження) і приростом потужності існує статистично значуща залежність. Таким чином, існує надзвичайно мала ймовірність відкинути нульову гіпотезу, якщо між фактором парового навантаження і приростом потужності немає лінійної залежності.

Аналогічним чином визначено, що при фіксованому факторі парового навантаження і товщині забруднення між змінною X_1 (температура на вході) і приростом потужності існує статистично значуща залежність.

Для третього фактору $t = 1,87229 < 2,3595$, проте p -значення = $0,035 < 0,05$. Отже, при фіксованій температурі і факторі парового навантаження між змінною X_3 (товщина забруднення) і приростом потужності лінійної залежності не спостерігається, але це не означає відсутності залежності взагалі, адже вона може бути нелінійною.

Замість перевірки гіпотези про нахил генеральної сукупності можна оцінити значення цього нахилу. У моделі множинної регресії для побудови довірчого інтервалу використовується формула:

$$b_j \pm t_{n-k-1} S_{b_j}. \quad (14)$$

Скористаємося цією формулою для того, щоб побудувати 95%-ий довірчий інтервал, що містить нахил генеральної сукупності β_1 (вплив температури X_1 на приріст потужності Y при фіксуванні товщини забруднення X_3 та факторі парового навантаження X_2). Оскільки $b_1 = -0,03906$, $S_{b_1} = 0,00353$, критичне значення t -статистики при 95% -му довірчому рівні і 30 ступенях свободи $t_{n-k-1} = 2,3595$, отримуємо:

$$-0,04739 \leq \beta_1 \leq -0,03073.$$

Таким чином, з огляду на ефект забруднення та парового навантаження, можна стверджувати, що при збільшенні температури води на вході на один градус приріст зменшується на величину, яка коливається від 30 до 47 кВт. Існує 95% -ва ймовірність, що цей інтервал правильно оцінює залежність між двома змінними. Оскільки даний довірчий інтервал не містить нуля, можна стверджувати, що регресійний коефіцієнт β_1 має статистично значимий вплив на приріст потужності.

Аналогічно розглянемо вплив парового навантаження X_2 на приріст потужності Y при фіксуванні товщини забруднення X_3 та температури X_1). Оскільки $b_2 = -1,91899$, $S_{b_2} = 0,3171$, отримуємо:

$$1,17078 \leq \beta_2 \leq 2,66719.$$

Отже, з огляду на ефект забруднення та температури, можна стверджувати, що при збільшенні парового навантаження приріст збільшується на величину, яка коливається від 1,17 до 2,66 МВт. Існує 95% -ва ймовірність, що цей інтервал правильно оцінює залежність між двома змінними.

7. Висновки

Незважаючи на різні конструктивні заходи щодо ущільнення вузла кріплення трубок в трубних дошках, присоси охолоджуючої води в паровий простір конденсатора все ж з'являються. Також в процесі експлуатації неминуча поява забруднень на поверхні теплообміну конденсатора.

Отримана аналітична залежність зміни електричної потужності на затискачах генератора дозволила визначити межі її зміни, зокрема: з огляду на ефект забруднення та парового навантаження при збільшенні температури води на вході на один градус приріст зменшується на величину, яка коливається від 30 до 47 кВт, а при врахуванні забруднення та зміни температури, при збільшенні парового навантаження приріст збільшується на величину, яка коливається від 1,17 до 2,66 МВт.

Це підкреслює важливість результатів діагностики та моніторингу технічного стану конденсаційних пристроїв паротурбінних установок для отримання інформації про їх вплив на величину генерації електричної потужності, що дозволить як своєчасно вживати необхідні заходи для запобігання розвантаження енергоблоків для пошуку присосів води, так і більш точно прогнозувати виробіток електричної енергії для продажу на енергоринок.

Список використаної літератури

1. Теплообменники энергетических установок. Учебное электронное издание / К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков, В.И. Брезгин, Ю.М. Бродов, В.К. Купцов, И.Д. Ларионов, М.А. Ниренштейн, П.Н. Плотников, А.Ю. Рябчиков, С.И. Хаэт. Екатеринбург : УрФУ. 2015. [Електронний ресурс].
2. Заміна конденсаторів турбін на ЮУАЕС: заплановане вдалося Дата публікації: 12.2019. Ю. Дікусар, О. Резник [Електронний ресурс]. URL: <https://www.sunpp.mk.ua/ru/publications/8318/>. (Дата звернення 30.09.2021).
3. Конденсатор нового поколения «блочно-модульной» конструкции для турбоустановки К-1000-60/1500-2 Запорожской атомной электростанции / А.Н. Усс, С.Т. Пацюк, А.В. Панченко, А.В. Шавлаков, Д.Х. Харлампиди // *Проблеми машинобудування*. Харків, 2018. Т. 21. № 1. С. 4-10.
4. Torres C. On the Cost Formation Process of the Residues // In Proceedings of the 19th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. Crete, Greece, July 12-14, 2006. p. 415-424.
5. Torres C. Structural Theory and Thermoeconomic Diagnosis Part 1. On Malfunction and Dysfunction Analysis / C. Torres, A. Valero, L. Serra, J. Royo // *Energy Conversion and Management*. 2002. Vol. 43. № 9. p. 1503-1518.
6. On the Thermoeconomic Approach to the Diagnosis of Energy System Malfunctions. Part 2. Malfunction Definitions and Assessment / A. Valero, L. Correas, A. Zaleta, A. Lazzaretto, V. Verda, M. Reini, V. Rangel // *Energy International Journal*. 2004. № 29. P. 1889 -1907.
7. Piacentino A. Scope-Oriented Thermoeconomical Analysis of Energy Systems. P. I. Looking for a Non-Postulated Cost Accounting for the Dissipative Devices of a Vapour Compression Chiller. Is it Feasible? / A. Piacentino, F. Cardona // *Applied Energy*. 2010. Vol. 87. P. 943 – 956.
8. Tapia C. F. Computer-Aided Design and Optimization of Heat Exchangers / C. F. Tapia, M. J. Moran // *Computer-Aided Engineering of Energy Systems. Optimization ASME*, 1986. Vol. 1. P. 99 – 103.
9. Hepbasli A. A Key Review on Exergetic Analysis and Assessment of Renewable Energy Resources for a Sustainable Future/ A. Hepbasli // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. №12 P. 593 – 661.
10. Быкова Т.И. Реновация энергоблоков ТЭС и АЭС путем диагностирования их низкопотенциальных комплексов // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, 2011. №7(89). С.53-58.

K. Bratkovska, Cand. Sc. (Econ.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2091-9623

Yu. Liush, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-7907-8374

A. Shram, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4206-7716

National University Zaporizhzhia Polytechnic

STUDY OF THE CONDENSER'S OPERATING CHARACTERISTICS OF THE NPP UNIT

The paper shows that the technical condition of condensing devices of steam turbines largely determines the amount of electricity losses, reliable and economical operation of NPP units, and the modernization of steam turbine capacitors will provide a significant increase in electricity generation with relatively low capital investment compared to construction of new NPP power units. Analysis of the perfection of the heat transfer process in the condenser according to the principles of thermoeconomic diagnostics to identify the causes of abnormal operation of the power conversion system showed that the main causes of load reduction are determined by rising cooling water temperature and deviation of steam pressure from normal assessment of contamination of the heat transfer surface, which significantly affects the reduction of electricity generation. The modernization main points of the capacitor of the Zaporizhzhia NPP power unit № 3 on the principle of "block-modular" design developed by PJSC "Turboatom" and the characteristics of the capacitor provided by the new design are considered. The method of thermal calculation of the condenser with the use of iterative methods, which takes into account the presence of air leakage in the space of the condenser and the appearance of contamination of the heat exchange surface, is given. The increase of electric power at the generator terminals at change of steam load factor and pollution thickness is calculated and analyzed. An analytical dependence of the investigated parameters of reducing the increase in electric power during the modernization of the capacitor is obtained and the interpretation of the results is carried out. The work emphasizes the importance of processing the results of diagnostics and monitoring of the technical condition of steam turbines condensing devices and information about their impact on the amount of electric power generation.

Keywords: thermal calculation of NPP condenser, air leakage, pollution, electric power gain

References

1. Aronson, K.E., Blinkov, S.N., Brezgin, V.I., Brodov, Yu.M., Kuptsov, V.K., Larionov, I. D., Nirenstein, M.A., Plotnikov, P.N., Ryabchikov, A. Yu. & Hayot, S.I. (2015). Heat exchangers of power plants. Educational electronic edition. Retrieved from <https://openedu.urfu.ru/files/book/> (in Russ.)
2. Dikumar, Y., Reznik, O. (2019). Replacement of turbine condensers at SUNPP: planned succeeded. Retrieved from <https://www.sunpp.mk.ua/ru/publications/8318/> (in Ukr.)
3. Uss, A.N., Patsyuk, S.T., Panchenko, A.V., Shavlakov, A.V. & Harlampidi, D.Kh. (2018) Condenser of a new generation of "block-modular" design for the K-1000-60 / 1500-2 turbine unit of the Zaporozhye nuclear power plant. *Problemy mashynobuduvannia (Problems of mechanical engineering)*, 21,1, 4-10. (in Ukr.)
4. Torres, C. (2006). On the Cost Formation Process of the Residues. In Proceedings of the 19th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. Crete, Greece, July 12-14, 2006, 415-424.
5. Torres, C., Valero, A., Serra, L. & Royo, J. (2002). Structural Theory and Thermoeconomic Diagnosis Part 1. On Malfunction and Dysfunction Analysis. *Energy Conversion and Management*, 43, 9, 1503-1518.
6. Valero, A., Correas, L., Zaleta, A., Lazzaretto, A., Verda, V., Reini, M. & Rangel, V. (2004) On the Thermoeconomic Approach to the Diagnosis of Energy System Malfunctions. Part 2. Malfunction Definitions and Assessment. *Energy International Journal*. 29, 1889 -1907.
7. Piacentino, A. & Cardona, F. (2010) Scope-Oriented Thermoeconomical Analysis of Energy Systems. P. I. Looking for a Non-Postulated Cost Accounting for the Dissipative Devices of a Vapour Compression Chiller. Is it Feasible? *Applied Energy*. 87, 943 – 956.
8. Tapia, C. F. & Moran, M. J. (1986) Computer-Aided Design and Optimization of Heat Exchangers. *Optimization ASME*, 1, 99 – 103.
9. Hepbasli, A. (2008) A Key Review on Exergetic Analysis and Assessment of Renewable Energy Resources for a Sustainable Future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 593 – 661.
10. Bykova, T.I. (2011). Renovation of TPP and NPP power units by diagnosing their low-potential complexes. *Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit (Energy saving. Energy. Energy audit)*, 7 (89), 53-58.

Надійшла 10.01.2022

Received 10.01.2022

В.В. Філонов^{1,2}, асп., провідний інженер ORCID 0000-0001-8123-026XЮ.С. Філонова^{1,2}, асп., інженер ORCID 0000-0002-9728-3726О.В. Коваленко^{1,2}, студ., інженер ORCID 0000-0002-9858-9137В.А. Кондратюк¹, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-5035-311X¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

²ТОВ «ІПП-Центр»

ОПИС РАДІАЦІЙНОГО МОДУЛЮ МУЛЬТИФІЗИЧНОГО КОДУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДЕГРАДАЦІЇ ГЕОМЕТРІЇ ВИГОРОДКИ ВВЕР-1000

На сьогоднішній день вкрай важливим є питання можливості продовження терміну експлуатації енергоблоків атомних станцій у понад проектний період, а також розробка нових підходів для розширення попередньо оцінених можливих років продовження ресурсу енергоблоків, в яких цей період майже вичерпано. Відповідно до проектної межі безпечної експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР – обмежуючим фактором з точки зору зміни геометричного стану є контакт вигородки та периферійного палива. Попередній аналіз формозміни внутрішньокорпусних пристроїв, який є обов'язковим при продовженні ресурсу, показав, що більш очікуваним є контакт вигородки та шахти, який передувє контакту з ядерним паливом. Додатковим фактором є те, що із-за особливості конструкції вигородки виникають радіальні перетоки теплоносія із активної зони на периферію відбивача. Такий стан не передбачений проектом, тому у вітчизняній галузі виникають дискусії щодо подальшої безпечної експлуатації. Основною причиною зміни геометричного стану є сукупність впливу накопленої радіаційної дози, а також нерівномірність температурного поля. «Класичний» аналіз, який застосовується при продовженні терміну експлуатації складається з послідовних етапів, у кожному з яких виконується оцінка радіаційних умов, температурного поля та, нарешті, оцінка міцності. Такий підхід є прийнятним лише у випадку слабкого взаємозв'язку між фізиками (етапами) та при умові консервативної оцінки на кожному кроці. На сьогоднішній день такий підхід практично вичерпав себе, оскільки запас років «гарантованої безпечної експлуатації», які оцінені послідовним підходом – практично вичерпані. В даній роботі представлений опис модулю оцінки радіаційного навантаження, який є складовою мультифізичного коду для аналізу стану вигородки в умовах деградації її геометрії. Даний підхід є розробкою спеціалістами ТОВ «ІПП-Центр» та аспірантами і студентами університету.

Ключові слова: вигородка, ВВЕР-1000, продовження ресурсу, радіаційні навантаження, картограма паливного завантаження, деградація геометрії

Прийняті скорочення:

АЕС	– Атомна електрична станція	ВЯБ	– Відділ ядерної безпеки
АкЗ	– Активна зона	РУ	– Реакторна установка
ВВЕР	– Водоводяний енергетичний реактор	ТВЗ	– Тепловіділяюча збірка
ВКП	– Внутрішньокорпусні пристрої	ШВК	– Шахта внутрішньокорпусна

Прийняті позначення:

V	– Глибина вигорання (Вт·с/кг)	R_p^f	– Радіус оболонки твел, (м)
E_f	– Енергія виходу ділення, (Дж)	r	– Радіальний напрямок (координата), (м)
k	– Відносне енерговиділення, (-)	t	– Час, (с)
N_{FA}	– Кількість ТВЗ, (-)	w	– Вагова функція, (-)
N_p	– Кількість твелів, (-)	z	– Аксіальний напрямок (координата), (м)
N_l	– Аксіальна дискретизація, (-)	Θ	– Тангенціальний напрямок (координата), (рад)
Q_{heat}	– Теплова потужність, (Вт)	ν_f	– Середній вихід швидких нейтронів, (-)

Індекси:

V	– об'ємне	$node$	– чарунка
ref	– опорний	$МК$	– монте-Карло

Вступ.

На сьогоднішній день вигородка реактора ВВЕР-1000 є основним лімітуючим фактором понад проектного терміну експлуатації. Переоцінка ресурсу вигородки є комплексною задачею, яка в загальному

випадку потребує аналітичних обґрунтувань зони періодичних натурних досліджень, а також повного аналізу прогностичного стану. Провести дослідження, а отже і отримати верифікаційні результати неможливо для «гарячого» стану реактора з урахуванням радіаційного поля. Єдиний спосіб, який дозволяє отримати геометричні характеристики вигордки – це дослідження зміни геометрії у холодному стані та подальша інтерпретація цих даних на стан «робота на потужності». Якість прогнозу стаціонарного стану вигордки при роботі на номінальній потужності очевидно залежить від фізичної обґрунтованості розрахункової моделі. Взагалі, всі математичні моделі, які використовуються для оцінки напруженого стану використовують експериментальні дані, які узагальнені неявними функціями. Сучасна процедура переоцінки стану вигордки послідовна і базується на трьох основних кроках: розрахунок радіаційного енерговиділення і пошкоджуваності [1,2], розрахунок температурного поля [3] та оцінка формозміни [4,5]. Результати, які отримані послідовним аналізом свідчать про те, що починаючи з 20-25 кампанії внаслідок деградації геометрії можуть з'являтися радіальні перетоки із активної зони у напрямку внутрішньокорпусної шахти реактору з інтенсивністю еквівалентною проектному байпасу теплоносія (~1% від номінальної витрати). Це призводить до того, що локально змінюються умови експлуатації активної зони, а отже і з'являється зворотній зв'язок, принаймні між другим та третім кроком послідовної процедури. Варто зазначити, що радіальні перетоки, тобто зміна конфігурації охолодження активної зони, є непроективним ефектом розпухання вигордки і, в загальному, потребують комплексного аналізу впливу на РУ в цілому. Слід також зауважити, що загалом дана проблема є мультифізичною, досвід розв'язання якої на енергоблоках з реакторами ВВЕР-1000 відсутній не лише на вітчизняних атомних електричних станціях (АЕС).

Поява радіального перетоку теплоносія з АкЗ на периферію поліпшує умови охолодження вигордки між кільцями, особливо в області максимальних радіаційних навантажень. Це призводить до зміни як амплітудних і середньооб'ємних значень так і власне поля температури, що є одним із визначальних факторів при оцінці між-кільцевого розкриття [6].

Необхідність більш точної (в контексті даної проблеми – реалістичної) оцінки потребує ефектів які породжують зворотні зв'язки типу «теплогідравліка – міцність». Із-за зміни геометрії вигордки локально змінюються й умови опромінення металу не тільки відбивача (вигордки) але й міжкільцевих шпильок та внутрішньокорпусної шахти (ШВК), що породжує додаткові нелінійності задачі, що аналізується. Таким чином, в контексті реалістичної оцінки робочою стає концепція мультифізичного зв'язку, який коротко можна охарактеризувати так: «розігрів – розкриття – інтенсифікація охолодження та зміна локальних радіаційних умов - закриття». В даній роботі наведений опис нейтронного модулю, який є складовою зв'язаного мультифізичного аналізу.

Мета та завдання дослідження

Основною метою даної статті є опис підходу, який застосовується для оцінки миттєвого та накопиченого радіаційного стану внутрішньокорпусних пристроїв (ВКП) і дозволяє оптимальним чином враховувати особливості експлуатації енергоблоку ВВЕР-1000. Основним завданням є побудова логічного зв'язку між концептуальними складовими модулю, які можна розділити в залежності від використання на:

- інженерний аналіз паливного завантаження (фактично ініціалізація);
- модель транспорту нейтронів та гамма квантів для оцінки локальних характеристик радіаційних полів, а також процедура для оцінки накопичених величин з урахуванням умов охолодження (основний розрахунковий модуль);
- формування параметричних функцій впливу радіального перетоку на радіаційні поля в елементах ВКП;

1. Інженерний аналіз паливного завантаження енергоблоку ВВЕР-1000

Як було зазначено вище, розрахунковий модуль можна умовно поділити на три частини за принципом виконуваності при мультифізичному аналізі. На початку відбувається ініціалізація вхідних даних для транспортної частини модулю на основі експлуатаційної інформації для конкретного енергоблоку АЕС, яка формується інструментарієм відділу ядерної безпеки (ВЯБ) конкретного майданчику (наприклад БИПР/ПЕРМАК-А). Концептуально підготовку вхідних даних моделі транспорту нейтронів та гамма квантів, а також розрахунок енерговиділення, флюенсу та пошкоджуваності можна представити у вигляді наступних послідовних кроків:

- Формування бази даних для сортів палива в залежності від температури та глибини вигорання палива (ізотопний склад, середнє значення виходу нейтронів ділення, спектр ділення, середнє значення енергії виходу на одне ділення).

- На основі картограм паливного завантаження для кожного умовного сектора (див. Рис. 1) розраховується теплова та нейтронна потужність (застосовуючи експлуатаційні дані), а також оцінюється часовий профіль витоків нейтронів із активної зони.

- В залежності від специфікації опорних величин формуються вхідні дані в локальній системі координат моделі транспорту на основі експлуатаційних даних для обраних часових проміжків.

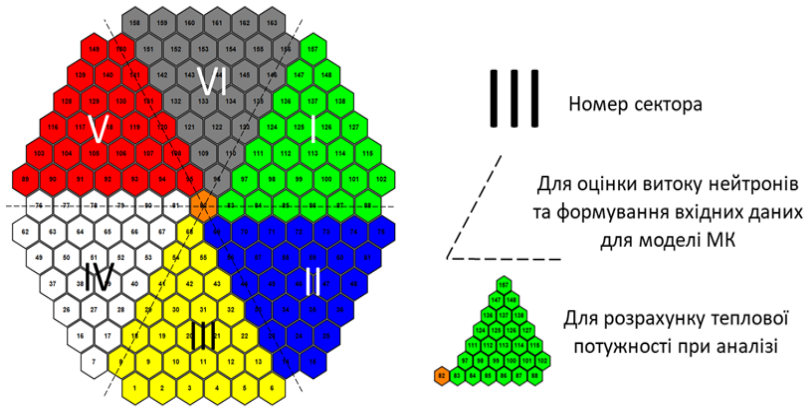


Рисунок 1 – Нумерація секторів для аналізу паливних кампаній

Аналіз паливної кампанії необхідний для вибору найбільш характерної доби експлуатації, а також вибору представницького сектора АкЗ, оскільки раціональним є аналіз 60-градусного сектора. Для цього була розроблена багатопараметрична процедура, яка базується на інженерній оцінці витоку нейтронів за межі АкЗ, що є в першому наближенні альтернативною дифузійного аналізу, та дозволяє проводити оцінку в абсолютних величинах.

На першому кроці, формується база даних сортів палива, яке використовувалося в певний проміжок експлуатації (наприклад з моменту введення в експлуатацію по сьогоднішній день). Для цього розроблена спеціальна підпрограма, яка дозволяє отримати погоджене температурне поле в твел (2D, r-z), яке є вхідним параметром для нейтронно-фізичної моделі твел на базі коду WIMS5b [7] із можливістю автоматичного підбору критичної концентрації борної кислоти. Даний блок виконується лише один раз, або за необхідності доповнення бази даних сортів палива.

Для кожної паливної кампанії обираються характерні часові кроки (додатково додаються початок та кінець паливної кампанії), а для кожного кроку – характерний сектор. Така концепція аналізу дає можливість сформувати консервативний набір в масштабах усього періоду експлуатації енергоблоку (максимально навантажений часовий крок – максимально навантажений сектор). В якості критеріїв вибору характерних часових кроків та сектору використовуються наступні величини: інтегральна потужність сектору ($Power_i$), інтегральний витік нейтронів ($effFlux_i^{ave}$), інтегральний витік нейтронів по максимально навантажений грані ($effFlux_i^{max}$). Оскільки інженерними методами важко оцінити інтегральний витік нейтронів (невідомі вклади непериферійних твелів та тепловиділяючих збірок (ТВЗ)), то будується часовий тренд фактично безрозмірної величини.

Теплова потужність сектору розраховується в залежності від значення конфігуратора $FAtype_1$:

$$Power_i = \frac{Q_{heat}}{N_{FA} \cdot N_p \cdot N_l} \cdot \sum_j^{N_j^{sec}} \left(\begin{array}{l} FAtype_1 = "MaxNode", N_p \cdot N_l \cdot \max(k_k^{node}) \\ FAtype_1 = "Max", N_p \cdot N_l \cdot \max(k_k^l) \\ FAtype_1 = "Ave", N_p \cdot N_l \cdot mean(k_k^l) \\ FAtype_1 = "Min", N_p \cdot N_l \cdot \min(k_k^l) \end{array} \right) \quad (1)$$

Для розрахунку витоку нейтронів необхідно оперувати опорною глибиною вигорання (для ТВЗ), яка визначається на основі значень конфігуратора $FAtype_2$:

$$B_j = \left(\begin{array}{l} FAtype_2 = "MaxNode", \max(B_{j,k,l}) \\ FAtype_2 = "Max", \max(B_{j,k}^l) \\ FAtype_2 = "Ave", mean(B_{j,k}^l) \\ FAtype_2 = "Min", \min(B_{j,k}^l) \end{array} \right) \quad (2)$$

Оцінка витоку нейтронів для обраної периферійної ТВЗ:

$$effFlux_j = Power_j^{FA} \frac{[v_f(T_{ref}, B_j) - 1]}{2\pi R_p^l N_p \cdot E_f(T_{ref}, B_j)} F(Per_j, \dots) \quad (3)$$

Опорна температура T_{ref} для функцій параметрів від глибини вигорання обирається згідно зі значенням конфігуратора $FAtype_3$. Слід зазначити, що в залежності (3) присутні досить грубі припущення. По перше залежність (3) оцінює сумарний витік нейтронів через усереднену густину потоку з поверхні

твел та ефективну площу витоку, у припущенні, що частка в $1.0/v_f$ від загальної кількості миттєвих нейтронів іде на підтримку критичної ланцюгової реакції, а все інше $(v_f - 1.0)/v_f$ покидає паливо (без врахування поглинання нейтронів паливом та продуктами ділення, а також теплоносієм). Функція $F(Per_j, \dots)$ характеризує ефективний периметр, який фактично враховує «скільки середніх» твелів приймають участь у витоці через грань обраної ТВЗ. Функція $F(Per_j, \dots)$ дійсно залежить від геометричного периметру ТВЗ Per_j , проте насправді враховує вплив й інших, непериферійних твел. Інженерними методами оцінити значення цієї функції практично неможливо. Основне припущення, яке дозволяє перейти від аналізу абсолютних величин до відносних, це те, що функція $F(Per_j, \dots)$ в межах однієї ТВЗ слабо змінюється для середньої густини потоку нейтронів під час усієї кампанії. Таким чином, можна оцінити тренд у часі сумарної втрати нейтронів (безрозмірної величини) через обраний сектор:

$$efFlux_i^{ave} = \left(\max_{i,time} \left[\sum_j^{N_i} efFlux_j \right] \right)^{-1} \cdot \sum_j^{N_i} efFlux_j \quad (4a)$$

$$efFlux_i^{max} = N_i \cdot \max_j [efFlux_j] \cdot \left(\max_{i,time} \left[\sum_j^{N_i} efFlux_j \right] \right)^{-1} \quad (4b)$$

Не дивлячись на досить грубу оцінку, вдається в першому наближенні обирати референтні моменти паливної кампанії, причому для деяких із них, часових точок - дві, оскільки аналізується як середній витік, так і витік по максимальній грані.

Слід зазначити, що всі вище представлені величини розраховуються для всіх часових кроків обраної для аналізу паливної кампанії, а також для всіх трьох значень конфігуратора $FAtype_3$ (характеризує опорну температуру T_{ref} розрахунку вигорання).

Як видно із залежностей (1)-(4) оцінка може здійснюватися для різних комбінацій $FAtype_1 - FAtype_2$. Оскільки для транспорту нейтронів застосовується двовимірний модель, необхідно розуміти, що є обґрунтованими з точки зору консерватизму вхідними даними. Так, наприклад, потрібно розуміти як інтерпретувати глибину вигорання (яку величину обирати) та відносну потужність для кожного твелу у випадку застосування двовимірної моделі (формування ваги елементарного джерела нейтронів). На основі отриманих референтних часових кроків, а також даних відносно характерного сектору, формується набір вхідних величин для транспортної моделі. Формування вхідних даних відбувається згідно із значеннями конфігураторів $DOtype_1 - DOtype_4$. Сумарна потужність нейтронів ділення оцінюється для сектору як:

$$Source = \frac{k_Q^{er} \cdot Q_{heat}}{N_{FA} \cdot N_P \cdot N_L} \cdot \sum_i^{N_s} \frac{v_f(T_{ref}, B_i)}{E_f(T_{ref}, B_i)} \begin{cases} DOtype_3 = "MaxNode", N_P \cdot N_L \cdot \max(k_k) \cdot \\ DOtype_3 = "Max", N_L \cdot \sum_j^{N_P} \max(k_k) \\ DOtype_3 = "Ave", \sum_j^{N_P} \sum_k^{N_L} k_o \cdot N_L \sum_j^{N_P} mean(k_k) \\ DOtype_3 = "Min", N_P \cdot N_L \cdot \min(k_k) \end{cases} \quad (5)$$

Характеристична глибина вигорання B_i розраховується аналогічно (2) використовуючи значення конфігуратора $DOtype_1$. Розрахунок вагових коефіцієнтів для кожного твел моделі транспорту нейтронів та гамма квантів здійснюється на основі експлуатаційних даних. Опорна глибина вигорання для кожного твел обирається на основі значення ідентифікатора $DOtype_1$. Для функцій концентрації ізотопів, середнього виходу нейтронів ділення і енергії одного ділення опорна температура обирається за конфігуратором $DOtype_2$ (аналог $FAtype_3$ при аналізі характерних часових проміжків для паливної кампанії).

$$w_{i,j} = \sum_k^{N_L} \left(k_k \frac{v_f(T_{ref}, B)}{E_f(T_{ref}, B)} \right)_k \left[\sum_i^{N_s} \sum_j^{N_P} \sum_k^{N_L} \left(k_k \frac{v_f(T_{ref}, B)}{E_f(T_{ref}, B)} \right)_{i,j,k} \right]^{-1} \quad (6)$$

Для кожного моменту паливної кампанії генеруються аксіальні профілі енерговиділення, для того, щоб була можливість синтезувати тривимірні поля для подальших розрахунків. На Рис. 2 представлено результати аналізу характерної паливної кампанії для енергоблоку ВВЕР-1000.

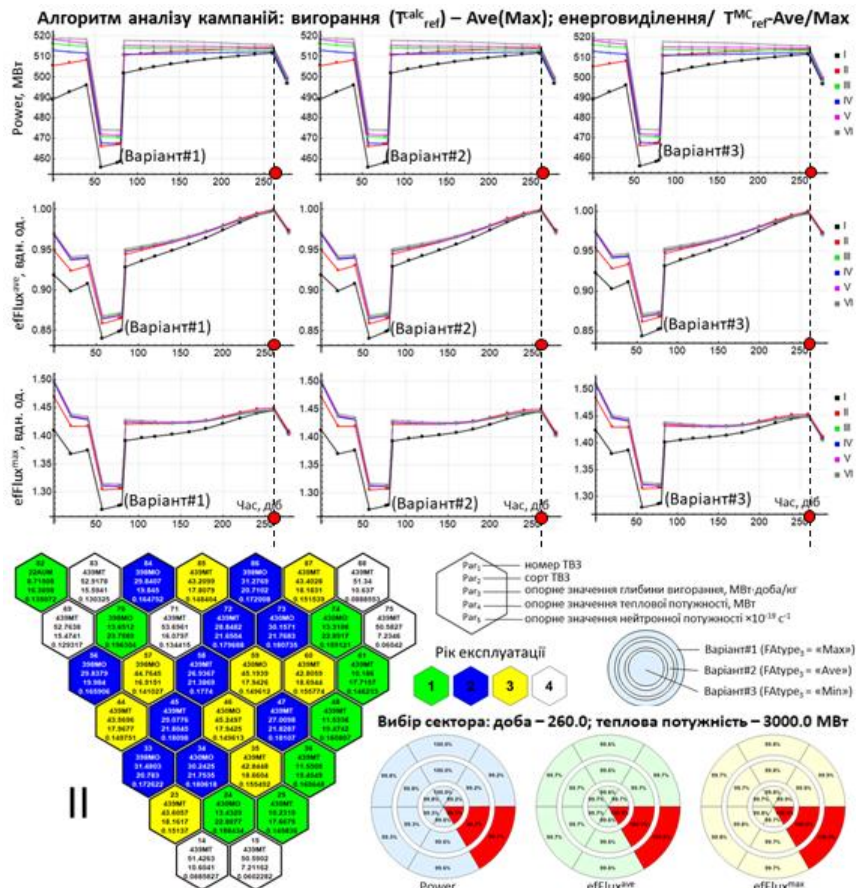


Рисунок 2 – Результати інженерної оцінки характеристичної паливної кампанії енергоблоку ВВЕР-1000

2. Модель транспорту радіаційних полів

Для розрахунку енерговиділення (q_v), флюенса і пошкоджуючої дози (D) в елементах ВКП була розроблена спрощена модель реактора ВВЕР-1000 для транспортного коду MCNPX. Розрахункова модель представляє собою 60-й сектор поперечного перерізу реактора, який включає такі елементи: активну зону на рівні паливного стовпа, вигородку, ШВК, різбові тяги, шпильки, корпус реактора з наплавкою та теплоносій, а площини симетрії проходять крізь центри 2-ох послідовних отворів різбових тяг у вигородці. Загальний вигляд розрахункової області представлений на Рис. 3. Модель вигородки разом зі шпильками, охолоджувальними каналами та різбовою тягою повторює переріз біля місця з'єднання двох кілець вигородки. Геометрія активної зони реактора побудована за допомогою повторюваної структури правильних шестигранних призматичних елементів [8], що моделюють елементарну чарунку ТВЗ із омиваючим її теплоносієм. Відстань між протилежними гранями такого елемента рівна кроку розташування ТВЗ в трикутній решітці. Кожна ТВЗ також моделюється за допомогою таких структур із відстанню між протилежними гранями, що відповідає кроку розташування твел і кластерів. Кожний такий елемент моделює елементарну чарунку таких видів:

- Твел та теплоносій, що його омиває;
- Направляючу трубку із теплоносієм;

В розрахунковій моделі передбачена можливість конфігурування активної зони (АкЗ) різними ТВЗ з урахуванням їх особливостей.

Граничні умови моделі представлені у вигляді дзеркального відбиття на границі симетрії, верхній та нижній площинах, перпендикулярних аксіальній осі, а також вакуумних на зовнішній циліндричній поверхні корпусу реактору. Теплофізичні і нейтронно-фізичні властивості, а також матеріальний склад елементів моделі однорідні в аксіальному напрямку. Джерело частинок також рівномірно розподілене в аксіальному напрямку, а потужність джерела розраховується із урахуванням фактичної висоти моделі. Таким чином, дана модель представляє двовимірну адаптацію тривимірної постановки нейтронної задачі (r - θ модель). Такий підхід обумовлений тим, що вдається оптимально застосовувати розрахункові ресурси для отримання статистично збіжних результатів. Фактично, застосовується концепція двовимірного розрахунку максимально навантаженого поперечного перерізу.

Нейтронне поле в вигородці і ШВК формується за рахунок їх витоку із АкЗ через внутрішню поверхню вигородки, а також внаслідок багаторазового розсіювання нейтронів на ядрах металу вигородки. Поле енерговиділення відповідно внаслідок витоку гамма-квантів із АкЗ та взаємодії з металом вигородки і ШВК завдяки 3 процесам: фотоефекту, комптон-ефекту і народження електрон-позитронних пар. Очевидно, що від коректності задання джерела частинок і ізотопного складу палива залежить коректність отримуваних результатів полів енерговиділення, а також швидкості набору флюенса і пошкоджуючої дози. Тому для врахування вищеперахованих процесів в моделі прийнята наступна концепція згідно пунктів:

- Основне джерело - стаціонарне джерело нейтронів представляє собою швидкі нейтрони ділення, поле яких формується по-твельно, відповідно до інженерного аналізу паливних кампаній з урахуванням середнього спектру ділення нейтронів по всій моделі АкЗ та нерівномірності середнього виходу нейтронів і енергії ділення;

- При поглинанні нейтрона в паливному матеріалі моделі він інтерпретується як реакція ділення без народження швидких нейтронів, але з народженням миттєвих гамма-квантів. Таким чином враховується процес народження миттєвих гамма-квантів в процесі ділення;

- Гамма-кванти, що запізнюються враховуються шляхом додавання до нейтронного джерела фотонного джерела із спектром згідно із [9] та з урахуванням середнього їх виходу на одне ділення.

На Рис. 3 наведено загальний вигляд розрахункової моделі, а також її дискретизація у сенсі збору імітаційних даних (детектування). Для детального відтворення амплітудних значень радіаційних полів біля границі вигородка - АкЗ використовується комбінована сітка (сітка «А» та сітка «Б»), що дозволяє оптимально застосовувати розрахункові ресурси.

Оскільки детальний розрахунок енерговиділення, швидкості набору флюенсу та пошкоджуваності відбувається у двовимірному наближенні $(r-\Theta)$, то постає питання «синтезу» відповідних результатів для подальшого їх застосування в тривимірному наближенні. Таким чином, постає питання щодо подальшої застосовності отриманих результатів у тривимірних $(r-\Theta-z)$ моделях теплогідроліки та міцності.

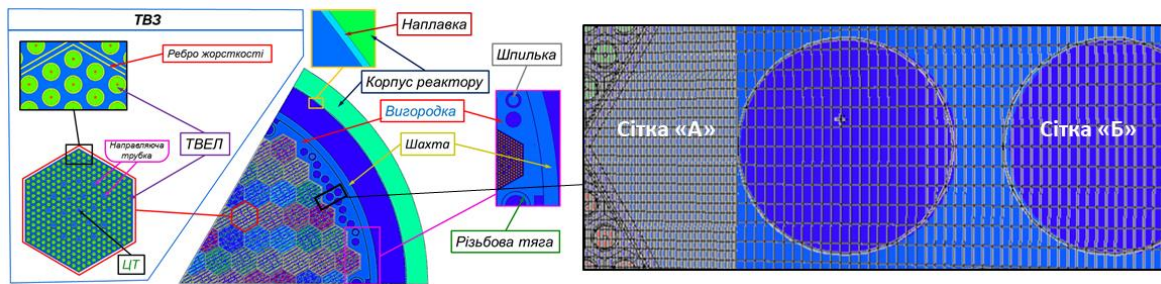


Рисунок 3 – Розрахункова модель транспорту нейтронів та гамма квантів

В загальному випадку, кожен з параметрів (миттєвий та накопичений) можна представити узагальнюючою функцією (7), яка за своєю сутністю є синтезом двовимірних даних $\Psi_{МК}(r, \Theta)$ отриманих моделлю Монте-Карло, та аксіального профілю $f(z)$, який формується на основі експлуатаційних даних.

$$\Psi(r, \Theta, z) = A \cdot \Psi_{МК}(r, \Theta) \cdot f(z) \quad (7a)$$

$$\Psi_{\Sigma}(r, \Theta, z) = A \cdot \Psi_{МК}(r, \Theta) \cdot f(z) \cdot \int_{0.0}^T \Pi_{ref}(t) dt \quad (7b)$$

Коефіцієнт А може трактуватися як коефіцієнт запасу, або ж амплітудне значення у випадку перенормування функції $\Psi_{МК}(r, \Theta)$. Відзначимо, що $\Psi_{МК}(r, \Theta)$ - це радіаційні поля, які розраховуються за допомогою моделі транспорту нейтронів та гамма квантів ($q_v(r, \Theta)$ - радіаційне енерговиділення; $\dot{F}(r, \Theta)$ - швидкість набору флюенсу; $\dot{D}(r, \Theta)$ - швидкість набору пошкоджуваності). Аксіальний профіль $f(z)$ може бути миттєвим, або ж накопиченим, в залежності від конфігурування мультифізичного розрахунку, що передбачено в основній програмі. $\Pi_{ref}(t)$ - це референтний безрозмірний профіль зміни витоку нейтронів в часі, якій оцінюється за допомогою вище описаної інженерної методики.

Як було зазначено вище, для кожної часової точки обирається індивідуальний сектор, який в загальному різний для всіх проміжків часу, та $\Pi_{ref}(t)$ доцільно обрати як максимальну величину $efFlux_i^{max}$ для даного часового кроку. Проте, попередній аналіз показав, що умовна площа під кривою теплової потужності секторів на ~0.5-4.0% більша, ніж під іншими кривими. Тому консервативно обирається максимальне значення серед трьох інтегралів по часу:

$$\int_{0.0}^T \Pi_{ref}(t) dt = \max \left(\int_{0.0}^T \max [Power_i(t)] dt, \int_{0.0}^T \max [efFlux_i^{ave}(t)] dt, \int_{0.0}^T \max [efFlux_i^{max}(t)] dt \right) \quad (8)$$

Для коректного застосування (8), значення $Power_i$, $efFlux_i^{ave}$, $efFlux_i^{max}$ для кожного сектора переформовуються на амплітудне значення, яке рівне одиниці. На Рис. 4 представлена схематизація розрахунку накопичувальних величин (флюенс, доза).

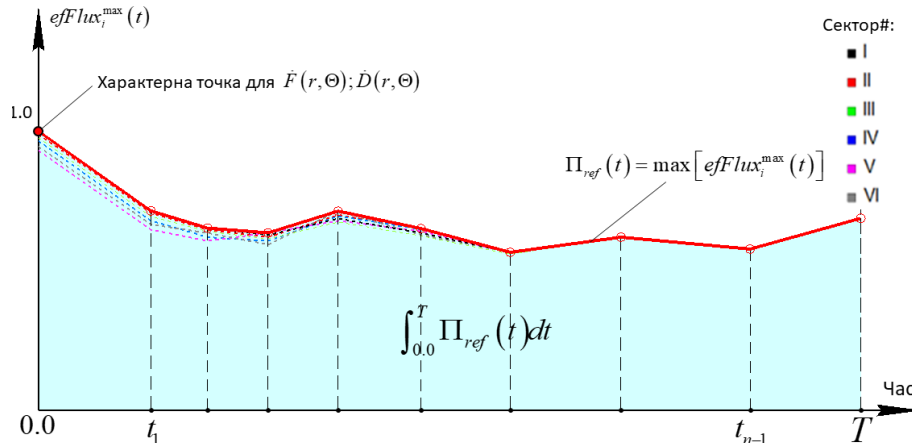


Рисунок 4 – Схематизація розрахунку сумарного опромінення для обраної паливної кампанії на прикладі величини $efFlux_i^{max}$

Таким чином, розрахункову підпрограму транспорту нейтронів можна використовувати безпосередньо для мультифізичного аналізу конкретної часової точки паливної кампанії, або ж узагальнюючи конкретну паливну кампанію. Відзначимо, що за розрахунковими затратами перший спосіб є найменш оптимальним, проте в деяких випадках є необхідним при аналізі.

3. Концепція параметричних функцій

Під час зміни геометрії вигорідки у місцях радіального перетоку відбувається зміна властивостей сповільнення радіаційного випромінювання, яке покидає межі АкЗ. Це призводить до того, що збільшується частина високоенергетичного випромінювання, яке взаємодіє з міжкільцевою шпилькою та ШВК, а також з різьбовою тягою. Для врахування даного впливу в розрахунковій моделі транспорту нейтронів та гамма квантів передбачена можливість задавати індивідуальні властивості матеріального складу та температури для елементарної геометричної ділянки. Для спрощення аналізу приймається, що крайові ефекти на торцях кілець вигорідки не враховуються. Таке наближення дає можливість оцінювати поля випромінювання також у двовимірному наближенні і, фактично, застосовувати екземпляри однієї розрахункової моделі при паралельних розрахунках. В цілому, розрахунки з урахуванням нерівномірності матеріального складу є значно складнішими (з точки зору часу розрахунків, особливо, коли йде мова про ітеративне наближення при мультифізичному аналізі). Тому був побудований альтернативний спосіб, який дозволяє отримати параметричну функцію, яка за своєю суттю відповідає фактору зниження/підвищення енерговиділення – Ω і визначається як відношення характеристик радіаційного поля при розкритті до незбуреного значення. Для однозначності та простоти формування фактору Ω обирається один із способів визначення: по максимальному значенню, або по середньому у відповідному поперечному перерізі.

Фактор зміни радіаційного поля Ω залежить від температури теплоносія та металу вигорідки, а також від матеріального складу, що визначається геометрією розкриття. Температури визначаються в теплогідрравлічному модулі, а геометрія розкриття відповідно у модулі розрахунків на міцність, який в загальному також може бути параметричним. Отже вдається однозначно встановити взаємозв'язок параметричної функції Ω з іншими модулями мультифізичного розрахунку.

Параметричні розрахунки за допомогою транспортної моделі проводилися в межах зміни матеріального складу (масова доля заліза) від 0.0 до 1.0, що відповідає повному розкриттю (0.0), або ж відсутності зміни геометрії (1.0). В першому наближенні відбувалася гомогенізація метал-теплоносія за для відсутності необхідності введення додаткової змінної, яка б характеризувала нерівномірність розкриття у поперечному перерізі. По температурі функція рівномірно табулювалася в межах 280-480 °С по металу та 280-340 °С по теплоносію. Результати фактору зміни радіаційного енерговиділення для кожного з конструкційних елементів ВКП наведені на Рис. 5. (в якості температури наведена температура гомогенізованого

Сформована параметрична функція дозволяє суттєво оптимізувати розрахункові затрати при спряженому аналізі, що дає можливість аналізувати також перехідні аварійні процеси для обґрунтування впливу деградації геометрії на РУ в цілому.

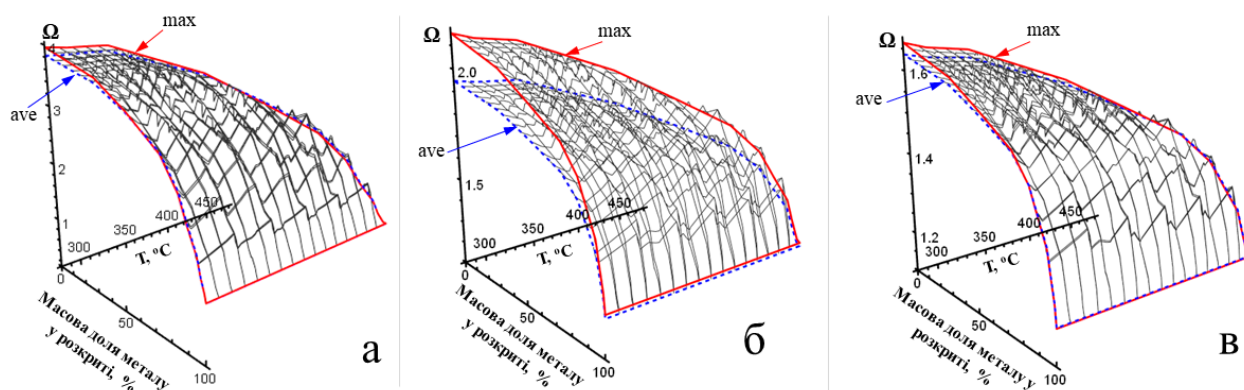


Рисунок 5 – Параметричні функції фактору зміни енерговиділення (а – ШВК, б – шпилька міжкільцева, в – різьбова тяга)

Висновки

В роботі представлений опис ключових складових частин нейтронно-фізичного модулю, який є частиною перспективного мультифізичного коду для аналізу деградації геометрії вигородки та його впливу на реакторну установку в цілому. Розроблений модуль складається з трьох основних частин до яких відноситься: інженерний аналіз паливних завантажень, безпосередньо транспортний блок, та параметричний аналіз. Розроблена досить гнучка система налаштувань, яка дозволяє конфігурувати модуль в залежності від типу аналізу, що дає можливість проводити консервативні та реалістичні оцінки з урахуванням можливих радіальних перетоків теплоносія за межі АкЗ.

Інженерний аналіз базується на оцінці безрозмірного профілю витoku нейтронів із АкЗ за період опорної паливної кампанії з подальшим вибором опорного сектору для референтної часової точки. Результатом роботи підпрограми аналізу паливного завантаження являється необхідний набір даних, який дозволяє сформувати характеристики джерела випромінення для транспортної частини модулю. Фактично таким чином відбувається ініціалізація.

Транспортна модель випромінення базується на Монте-Карло коді MCNPX, та побудована в двовимірній постановці ($r-\theta$) з урахуванням необхідності задання нерівномірності температури та матеріального складу. Така модель дає можливість оцінювати амплітудні значення полів випромінення, а також за допомогою підпрограми постобробки синтезувати тривимірні ($r-\theta-z$) миттєві та накопичені характеристики випромінення, які передаються в теплогідравлічний модуль та модуль розрахунків на міцність.

З метою економії розрахункових ресурсів, що є вкрай важливим при аналізі перехідних процесів передбачена підпрограма генерації набору даних для оцінки впливу деградації геометрії вигородки на функціонали випромінення в металі вигородки. Для цього оцінені фактори зміни енерговиділення в основних елементах ВКП, які залежать від локальної температури теплоносія та металу (зв'язок з теплогідравлічним модулем), а також від співвідношення метал – вода (модуль розрахунків на міцність). Такий підхід дозволяє раціональним чином організувати нестационарні розрахунки при аварійних процесах для обґрунтування впливу деградації геометрії на реакторну установку.

Список використаної літератури:

- 1.Абдуллаев А, Солдатов С., Ганн В., Черницкий С. Расчет флюенса нейтронов и тепловыделения в конструкционных элементах реактора ВВЭР-100 0 методом Монте-Карло. Ядерна та радіаційна безпека. 2018. №1. С. 11–16.
- 2.Бородкин П. Г., Хренников Н. Н. Расчетно-экспериментальные исследования радиационной нагрузки на корпусах и опорных конструкциях ВВЭР-1000 в фактических реакторных условиях. Ядерная и радиационная безопасность. 2015. №1. С. 1–10.
- 3.Filonov V., Filonova Y., Dubyk Y., Bohdan A. Calculation of VVER-1000 core baffle temperature distribution for it's swelling assessment. Proceedings of Odessa Polytechnic University. 2020. №1. С. 35–45.
- 4.Махненко О. В., Кандава С. М., Черкашин М. В. Совершенствование методов оценки радиационного распухания и прогрессирующего формоизменения элементов ВКУ реактора ВВЭР-1000. Девятая международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». 2019. №2. С. 35–42.
- 5.Dybuk Y., Filonov V., Filonova Y. Swelling of the WVER-1000 Reactor Core Baffle. IASMiRT. 2019.
- 6.Filonova Y., Dubyk Y., Filonov V., Kondratjuk V. Improved Computational Fluid Dynamics Framework for Reactor Core Baffle Swelling Assessment. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science. 2021. №1. С. 1–10.

7. WIMS-ANL USER MANUAL REV. 4/ ANL/RERTR/TM-23/Jan.2001.

8. MCNPX User's Manual Version 2.6.0, LA-CP-07-1473, April 2008

9. Марин С.В., Олейник Д.С., Сушино-Хоменко Е.А., Шкаровський Д.А., Юдкевич М.С. Расчёт тепловыделения в материалах ядерного реактора методом Монте-Карло. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2016. Вып. № 5. С. 27-35.

V. Filonov^{1,2}, Ph.D. student, ORCID 0000-0001-8123-026X

Y. Filonova^{1,2}, Ph.D. student, ORCID 0000-0002-9728-3726

O. Kovalenko^{1,2}, student., ORCID 0000-0002-9858-9137

V. Kondratyuk¹, Ph.D., docent, ORCID 0000-0001-5035-311X

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

²IPP-Centre LLC

DESCRIPTION OF THE RADIATION MODULE OF MULTIPHYSICAL CODE FOR ANALYSIS OF THE BAFFLE GEOMETRY DEGRADATION

To date, the possibility of lifetime extension for nuclear power units beyond the project period is extremely important, as well as developing new approaches to expand the previously estimated possible years of lifetime extension of power units, for which this period is almost exhausted. According to the design limit of safe operation for power units with VVER type of reactors - the limiting factor in terms of changes in the geometric state is the contact of baffle and peripheral fuel. Preliminary analysis of the geometric changes of reactor internals, which is mandatory during lifetime extension, showed that more expected is the contact of the baffle metal and barrel, which precedes the contact with nuclear fuel assemblies. An additional factor is that due to the design features of the baffle there are radial flows of coolant from the core to bypass. This situation is not foreseen by the project, so there are discussions in the domestic industry about further safe operation. The main reason for the change in geometry is the combination of accumulated radiation dose and the temperature field unevenness. The "classical" analysis, which is used for lifetime extension, consists of successive stages: the assessment of radiation conditions, temperature field calculation and, finally, the stress-strain state estimation. This approach is acceptable only in the case of a weak link between the physical modules (steps), and requires the conservative evaluation at each step. To date, this approach has almost exhausted itself, as the reserve of "guaranteed safe operation" years, which are estimated by the consistent approach, is almost expired. This paper describes the module for radiation loads estimation, which is a component of the multiphysical code for the analysis of baffle state in terms of its geometry degradation. This approach is developed by specialists of IPP-Centre LLC and PhD students and students of the university.

Keywords: baffle, VVER-1000, lifetime extension, radiation loads, fuel boot map, geometry degradation

References:

1.A. Abdullaev, S. Soldatov, V. Gann, S. Chernickij, "Calculation of the neutron fluence and heat release in the structural elements of the VVER-1000 reactor using the Monte Carlo method," (In Russian), Nuclear and Radiation Safety, vol. 1, pp. 11–16, 2018.

2.P. Borodkin, N. Hrennikov, "Computational and experimental studies of the radiation load on the VVER-1000 vessels and support structures under actual reactor conditions," (In Russian), Nuclear and Radiation Safety, vol. 1, pp. 1–10, 2015.

3.V. Filonov, Y. Filonova, Y. Dubyk, A. Bohdan, "Calculation of VVER-1000 core baffle temperature distribution for it's swelling assessment," Proceedings of Odessa Polytechnic University, vol. 1., pp. 35–45, 2020.

4.O. Mahnenko, S. Kandala, M. Cherkashin, "Improvement of methods for assessing radiation swelling and progressive form change of the VVER-1000 reactor internals," (In Russian), IX ISTC "Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Energy", vol. 2, pp. 35–42, 2019.

5.Y. Dybuk, V. Filonov, Y. Filonova, "Swelling of the WWER-1000 Reactor Core Baffle," IASMiRT, 2019.

6.Y. Filonova, Y. Dubyk, V. Filonov, V. Kondratjuk, "Improved Computational Fluid Dynamics Framework for Reactor Core Baffle Swelling Assessment," JNERS, vol. 1, pp. 1–10, 2021.

7. WIMS-ANL USER MANUAL REV. 4/ ANL/RERTR/TM-23/Jan.2001.

8. MCNPX User's Manual Version 2.6.0, LA-CP-07-1473, April 2008

9.S. Marin, D. Olejnik, E. Suhino-Homenko, D. Shkarovsk'ij, M. Yudkevich, "Calculation of heat release in the materials of a nuclear reactor by the Monte Carlo method," Questions of atomic science and technology, Physics of nuclear reactors, vol. 5, pp.27-35, 2016.

Надійшла 23.01.2022

Received 23.01.2022

ПРО КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ДЬОДУ В БУРУЛЬКАХ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ

Проведені дослідження утворення і зростання бурульок на дротяних насадках при розпиленні води ударом об тверду поверхню і форсункою за температур докільля $-3 \dots -7$ °С. Досліди проведені на дротах діаметром 3 мм і 0,5 мм з відповідною відстанню між насадками 10 мм і 29 мм.

Отримані залежності для обчислення маси утвореного льоду в залежності від часу. Вивчено зростання бурульок на насадках в горизонтальній площині в часі та подовжж і вниз. Отримані значення швидкості зростання по радіусу біля 0,3 мм на градус і швидкості подовження – біля 1 мм за годину при температурі оточуючого повітря мінус 5 °С. Максимальна довжина бурульок залежить від відстані між насадками. Ця відстань перекривається льодом через певний час і подача води на бурульки блокується. Досягнуто зростання льоду між паралельними насадками на дроті діаметром 3 мм. Розраховані потрібні відстані між насадками для різних температур повітря. При використанні «бурулькових» пристроїв у якості підігрівачів повітря до розрахованих відстаней між насадками слід додати проміжок для проходу повітря через яруси бурульок.

Визначена середня теплова потужність установки з горизонтальними дротяними насадками, яка може бути використана для підігрівання повітря теплотою кристалізації води. З часом середня теплова потужність зростає, що пов'язано зі збільшенням поверхні теплообміну і збільшенням частки льоду, що утворюється з води, яка потрапила на поверхню насадки. Для перших 30 хв. роботи усереднене значення частки льоду, що утворився становить 8%. Через 7 год. роботи до 28% води, що потрапляє на насадки, перетворюється в лід. На 1 м² площі насадок можна отримати від 1 до 4 кВт середньої теплової потужності при температурах повітря $-5 \dots -10$ °С. Зазначений підігрівач повітря не потребує значних капіталовкладень, споживає мінімальну кількість електроенергії, не потребує людської праці для видалення готового продукту, може бути механізована та автоматизована. Для збільшення кількості насадок без зростання сусідніх рядів запропоновано насадки розміщувати в шаховому порядку.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, лід, бурулька, підігрів повітря для вентиляції, теплота кристалізації, утворення бурульок, швидкість намерзання льоду.

Вступ.

Холод є відновлюваним джерелом енергії. Він застосовується в енергетиці і для акумулювання холоду зими на літо у вигляді льоду. Кліматичні ресурси, тобто зовнішнє повітря з температурами нижче нуля градусів Цельсія, є в багатьох країнах Європи, Азії та Америки. Такі можливості наявні також в горах завдяки зниженню температури зовнішнього повітря приблизно на 1 °С на кожні 200 м висоти, тому сніг і морози мають місце навіть в Африці.

В усіх випадках, коли маємо воду в рідкій фазі і температуру зовнішнього повітря нижче 0 °С, відбувається процес утворення ожеледі, який є однаковий за своєю природою. Вода в рідкій фазі, найчастіше переохолоджена, потрапляє на поверхню де відбувається утворення та накопичення льоду. В процесі утворення льоду прихована теплота кристалізації передається до навколишнього повітря, що має температури нижче точки замерзання. А тонкий шар переохолодженої води присутній на межі розподілу лід-повітря перетворюється в лід [1].

Повністю льодофобні тіла не зустрічаються [2]. Більша частина досліджень, які ведуться, спрямовані на вивчення впливів та зменшення наслідків утворення льоду на інженерних конструкціях та спорудах. Вчені приділяють увагу вивченню впливу температури, швидкості вітру, кількості вологи, а також форми і матеріалів з яких виготовлені конструкції на процес та інтенсивність утворення льодових утворень. У зв'язку з активним розвитком обчислювальної техніки та систем моделювання процесів все більше робіт спрямовані на моделювання процесів утворення льоду на поверхнях різної форми та за різних умов [3-7].

Інший напрямок досліджень – акумулювання льоду і подальше його використання влітку для систем охолодження та кондиціонування. Розрахунки показали, що витрати енергії на виробництво і акумулювання з подальшим використанням льоду влітку зменшуються в порівнянні з його виробництвом холодильними машинами в 18...51 разів [8]. Використання бурульок для виробництва льоду має пріоритет в районах з теплими зимами або нестійкими морозами [2].

При льодоутворенні в бурульках можливо використовувати теплоту фазового переходу (вода-лід) 334 кДж/кг. В [9...11] показані можливості використання підігрітого повітря перед випарниками теплових насосів та калориферами вентиляційних систем у морози.

Теплоту кристалізації води пропонується застосовувати у винаході «Система опалення будівлі І.І. Пухового», що включає обігрів буферної зони пасивної системи сонячного опалення в нічний період і при відсутності прямого сонячного випромінювання [12...14]. Система дозволяє економити високопотенційну енергію на опалення житлової зони і одночасно акумулювати холод, який може використовуватися в подальшому і сприяти економії електроенергії. Крім того, система знімає пікові навантаження в морози і знижує встановлену потужність традиційних джерел енергії в житлових зонах.

Перша згадка про виробництво льоду в бурульках є в монографії [2]. Градирня-естакада з робочим об'ємом 150 м³ являла собою споруду з дерева, яка складалась з трьох ярусів. До стійок висотою 6 м через кожні 2 м були приєднані обв'язувальні рами, на які вкленені з відстанню 0,3 м між вісями жердини діаметром 0,1...0,13 м. Жердини кожного ряду (ярусу) перехрещувались у просторі з жердинами нижче розміщеного ряду, завдяки чому струмінь води, що падав з верхнього ярусу, розбивається об нижній, так що поверхня струменів і крапель збільшувалась. Жодних досліджень не проведено. Лише відзначено, що в районі Одеси бурульки досягали нижнього ярусу за 2...3 доби, а лід видаляли впродовж 2-х днів, зупиняючи подачу води.

Дослідження зростання бурульок проведені на трубах різних діаметрів насадок із сталі, алюмінію і полімерів [11]. На трубах з полімерних матеріалів по обидва боки утворювалося 2 ряди бурульок.

Отримана математична залежність визначення швидкості росту бурульки в довжину для $d_{тр}=6...45$ мм в діапазоні температур зовнішнього повітря $t_n=-4...-15$ °С та постійній поверхневій густині зрошення $G=0,014$ кг/(с·м²):

$$\vartheta_l = -0,17 \cdot t_n - 0,4, \quad (1)$$

де: ϑ_l – швидкість росту бурулькового конгломерату в довжину, мм/хв.; t_n – температура зовнішнього повітря, °С.

Для кристалізаторів-підігрівачів повітря [11] з лінійними насадками важливо знати допустиму відстань δ , м (рис. 1), яка забезпечує прохід повітря без зрошення сусідніх рядів при заданому часі безперервної роботи та відстань між ярусами лінійних насадок, що залежить від довжини бурульок в критичний момент часу, коли потрібно знімати бурульки з насадок через небезпеку блокування проходу повітря.

Таким чином, відстані між насадками в підігрівачах повинні бути більшим для забезпечення проходу повітря, а відстань між ярусами є залежною від відстані між насадками.

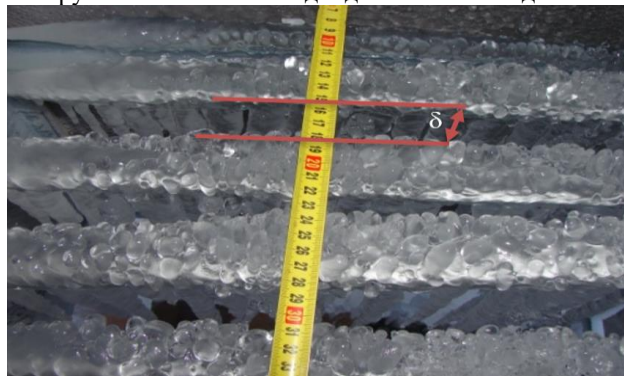


Рисунок 1 – Лід, що утворився на циліндричних насадках, які розміщені паралельно: δ , м – відстань між горизонтальними насадкам в підігрівачі повітря

Постановка задачі. Мета роботи – дослідити швидкість зростання бурульок до моменту їх видалення на насадках з дроту при різних відстанях між ними, та максимально можливу їх довжину. Визначити розрахунками відстані між лінійними насадками та ярусами в залежності від температур повітря при фіксованому часі роботи кристалізатора роботи установки до моменту видалення бурульок при застосуванні технології генерації льоду і підігрівання повітря. Визначити середню теплову потужності підігрівача повітря з горизонтальними насадками з дроту, що використовує теплоту кристалізації води.

Результати досліджень. Дослідження зростання бурульок проведені нами на дротах діаметром 3 мм, розташованих на відстані 13 мм в поперечному напрямі та на дротах діаметром 0,5 мм, розташованих на відстані 30 мм в поперечному напрямі.

Виконання дослідів на дротах діаметром 3 мм, що розташовані паралельно (гратка) проводилось при розпиленні води методом удару об тверду поверхню. Дослід був завершений через 4 години після початку зрошування горизонтальних насадок за допомогою гравітаційного методу розпилення струменя води. Середня температура навколишнього повітря становила мінус 5,5 °С.

В кінці дослідження насадки дослідної конструкції з утвореною на них льодяною масою у формі бурульок, у центральній частині ґратки зрослися між собою, що призвело до блокування вільного перерізу для руху води і повітря. Наслідком цього стало більш повільне збільшення бурульок у розмірах у цій частині ґратки.

Центральна частина ґратки зрошувалась з більшою витратою води, яка стікала з поверхні удару струменя, що витікав з отворів на висоті 760 мм над поверхнею удару. Під час падіння струменю вода встигала переохолоджуватись і, навіть на поверхні удару, утворювалися короткі бурульки, з яких вода падала на розміщену нижче на 300 мм ґратку.

Краплі води затримувалися на суцільній поверхні льоду, утвореного на насадках у верхній їх частині. Тому протягом останніх 10...15 хв. проведення дослідження мало місце збільшення льодяної маси на верхній частині ґратки шляхом перетікання води на периферію, де бурульки ще не зрослися через нестачу води. Розміри бурульок за цей проміжок часу змінилися несуттєво. Слід вважати, що до моменту зростання льодових наростів, які утворились вздовж дротів (циліндричних насадок), пройшло 3,5 години.

Було виконано вимірювання значень довжини та діаметру бурульок після закінчення дослідження. Максимальна довжина бурульок складала 270 мм, середня довжина – 140 мм. При цьому найбільший діаметр бурульок становив 13 мм при його середньому значенні 9 мм. Середня відстань між осями сусідніх по насадці бурульок складала 20 мм.

Розрахунки отриманої теплової потужності за період часу 40...50 хвилин показують, що вона змінюється зі зростанням маси льоду і становить 5...104 Вт.

Дослідження формування бурульок на горизонтальних дротяних насадках з використанням форсунки. На 4-х стійках були розміщені три яруси на відстані 430 мм один від одного. На кожному з ярусів розміщувалась насадка – рамка, яка має розмір 360×330 мм і площу $F=0,118 \text{ м}^2$. Передбачені кріплення для дроту діаметром 0,5 мм: по довжині рамки – 12 шт. з кроком 30 мм з кожної сторони і відповідно по ширині рамки – 10 шт. з кроком 30 мм з кожної сторони. Для диспергації води використовувались форсунки тонкого розпилу. Постійна поверхнева густина зрошення водою становила $G=0,014 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$.

Дріт з ніхрому в насадці виконує подвійну функцію: виступає у якості основи та направляючого елемента для захоплення та утримання крапель води (при подальшій роботі установки навколо дроту утворюється льодовий нарост, який бере на себе всі механічні навантаження, які пов'язані з утриманням зростаючої маси льоду на рамці); використовується в якості нагрівача для видалення намороженого льоду.

Досліди проводились за температури довкілля $-3...-7 \text{ }^\circ\text{C}$. Через 15 хвилин роботи крок між бурульками складав 7...8 мм, а діаметр бурульок 3...4 мм.

Після 1 год. 30 хв. з моменту включення при температурі навколишнього середовища мінус $4 \text{ }^\circ\text{C}$, бурульки мали довжину $l_6 = 50...70 \text{ мм}$ і діаметр $d_6 = 5...7 \text{ мм}$. Крок між бурульками зріс до 15...20 мм шляхом поглинання сусідніх бурульок. На дроті діаметром 3 мм середній крок між бурульками складав 20 мм через 3 години з моменту початку подачі води. Поверхня теплообміну складала $6,8 \text{ м}^2$.

Діаметр льоду, намороженого навколо дроту, після 7 годин роботи становив біля 15...20 мм – середнє значення 17,5 мм. У верхній частині бурульки зрослися між собою на довжину 100...120 мм.

Час роботи нагрівача для скидання льоду залежить від кількості намороженого льоду. В даній дослідній установці цей час не перевищував 8 хв.

Для аналізу процесу утворення льоду на насадках з дроту та отримання математичних залежностей, якими можна користуватись для розрахунку аналогічних систем наморожування льоду, введена величина відносна маса льоду на один метр довжини насадки та один градус різниці температури кристалізації та температури довкілля \bar{m} , $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{ }^\circ\text{C})$:

Маса льоду віднесена до тривалості процесу його наморожування для дроту діаметром 0,5 мм при густині зрошення форсункою $G=0,014 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ та температурі зовнішнього повітря $t_{\text{н}} = -3...-7 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\bar{m} = 4,7 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^{1,37}, \quad (2)$$

де τ – час роботи установки, хв.

Для розрахунків використана сумарна довжина насадок дослідної установки, яка становить $L = 12 \text{ м}$.

При оптимізації необхідної витрати води коефіцієнти та показник степеня в отриманому рівнянні можуть збільшуватись.

Середню теплову потужність підігрівача повітря, що використовує теплоту кристалізації води, визначили для кожних 30 хв. роботи (рис. 2). При цьому середню кількість теплоти в кДж за період, взяту з графіка, слід поділити на 1800 с. Наприклад, з 1-ї години до 1 год. 30 хв. середня кількість теплоти складає 170 кДж для всієї установки з довжиною дротяної насадки 12 м при середній температурі навколишнього повітря мінус $5,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Відповідно середня теплова потужність складає $P=170/1800=94 \text{ Вт}$.

Сумарна площа робочої поверхні дослідної установки підігрівача з горизонтальними насадками з дроту діаметром 0,5 мм становить $F_n=0,327 \text{ м}^2$. Таким чином, в перерахунку на 1 м^2 , середня теплова потужність з 1-ї години до 1 год. 30 хв. становить 287 Вт/м^2 .

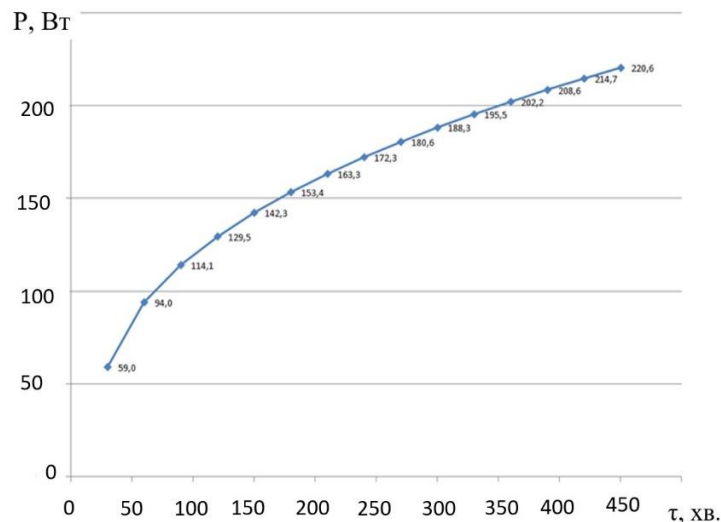


Рисунок 2 – Залежність середньої теплової потужності підігрівача з горизонтальними насадками з дроту діаметром 0,5 мм довжиною 12 м (поверхнева густина зрошення форсункою постійна і складає $G=0,014 \text{ кг/(с·м}^2)$, температура зовнішнього повітря $t_n=-3...-7 \text{ °C}$).

Аналіз результатів досліджень

Обидва дослідження проведені приблизно в однаковому діапазоні температур. Вважаємо, що середня температура становить мінус 5 °C . Відстань між боковими поверхнями насадок – 10 і 29 мм відповідно.

За 3,5 години на дроті діаметром 3 мм намерзло в горизонтальному напрямку 5 мм льоду або 1,42 мм на годину. На 1 градус швидкість зростання складе біля $0,3 \text{ мм/(год·°C)}$.

На дроті діаметром 0,5 мм радіус збільшився майже на 9 мм за 7 годин або 1,29 мм за годину, що є близьким до попереднього значення. Можна прийняти, що при мінус 5 °C швидкість наростання основи бурульки 1,5 мм за годину. У цьому випадку, при використанні даних для труб, лід насадки повинен досягти половини відстані між насадками за 10,8 години (648 хв.). При цьому максимальна довжина бурульок розрахована спираючись на залежність (1) [11] для -5 °C – $0,45 \text{ мм/хв}$. Максимальна довжина складе 0,29 м. Але фактично вона є більшою, а саме 420 мм за 7 год., що вказує на неможливість використання для дроту залежностей, отриманих на трубах.

На дроті діаметром 3 мм максимальна довжина склала 162 мм за 3,5 години (210 хв.). Середня швидкість зростання в довжину $0,77 \text{ мм/хв}$. Для середньої довжини 91 мм швидкість складе $0,44 \text{ мм}$, що корелюється з розрахованим за рівнянням, отриманим для труб. Але периферійні бурульки мали неоптимальні умови зрошення, хоч вони враховані при визначенні середньої довжини.

На дроті діаметром 0,5 мм робота була закінчена через 7 годин (420 хв.), коли бурульки мали довжину, яка дорівнювала висоті ярусу. При цьому швидкість зростання у довжину складе 1 мм/хв . Таким чином, для дротів швидкість зростання бурульок в довжину в оптимальних умовах зрошення складає біля $0,8...1 \text{ мм/хв}$. при температурі близькій до -5 °C . В [11] відзначається, що на трубах кількість льоду навколо насадки є більшою, ніж в бурульках, і це співвідношення збільшується з зростанням діаметра труби. Це робить логічним збільшення швидкості подовження бурульок на дротах.

Час роботи установки може бути різним. Його збільшення сприяє підвищенню продуктивності через зростання довжини бурульок та збільшенням поверхні теплообміну.

З часом середня теплова потужність підігрівача з горизонтальними насадками з дроту зростає, що пов'язано зі збільшенням поверхні теплообміну і збільшенням частки льоду, що утворюється з води, яка потрапила на поверхню насадки. Так, для перших 30 хв. роботи усереднене значення частки льоду, що утворився становить 8%, а через 7 год. роботи до 28% води, що потрапляє на насадки, перетворюється в лід.

На 1 м^2 площі насадок можна отримати від 1 до 4 кВт середньої теплової потужності при температурах повітря $-5 \dots -10 \text{ °C}$.

Але збільшення максимально допустимої довжини бурульки призводить до зменшення кількості насадок при заданій площі перерізу установки і, відповідно, до зменшення продуктивності. Тому

збільшувати відстані між насадками слід в межах умов зростання рядів та мінімального перерізу отвору для проходу повітря.

Ми розраховали на основі отриманих даних відстані між насадками і ярусами для 8, 12 і 16 годин роботи при температурах оточуючого повітря -5 і -10 °С. Прийнята питома швидкість нарощування льоду в горизонтальній площині $0,3$ мм/(год·°С).

Для температури -5 °С ($1,5$ – мм/°С) маємо половину мінімальної відстані між насадками за 8 годин – 12 мм, за 12 годин – 18 мм і за 16 год – 24 мм, що відповідає відстані між боковими поверхнями насадок $24, 36$ і 48 мм.

Для температури -10 °С (3 мм/°С) відстані між боковими поверхнями для 8 год – 48 мм, для 12 год – 72 мм і для 16 год – 96 мм.

При збільшенні часу в 2 рази кількість насадок зменшується вдвічі. Зростання часу сприяє продуктивності і степені $1,37$ або приблизно в степені $4/3$. Продуктивність зростає в $2,58$ рази. Таким чином збільшений час роботи дещо вигідніший збільшенню кількості насадок. Але це ще потрібно перевірити практично, змінюючи число насадок.

Відстань між ярусами для згаданих температур і розрахованого часу знайдена при швидкості зростання 1 мм/хв. При температурі -5 °С відстань складе: для 8 год (480 хв) – 480 мм. Для 12 год (720 хв) – 720 мм і для 16 год – 960 мм. Відстань між насадками для підігрівачів повітря повинна бути більшою на $20...30$ мм, але на відстань між ярусами це не вплине.

При лімітованій висоті установки слід її ділити на 3 яруси з врахуванням габаритів системи зрошення. Наприклад, для температури оточуючого повітря -5 °С та висоті 3 м відстань між ярусами повинна бути $0,6...0,8$ м з відстанню між насадками 36 мм. Підігрівати повітря при його початковій температурі -5 °С немає сенсу, тому можлива лише генерація льоду.

У випадку температури оточуючого повітря -10 °С при швидкості зростання довжини бурульок 2 мм/хв. і висоті між ярусами 800 мм, лід потрібно видаляти через 400 хвилин, або біля 7 годин. В той час як при температурі -5 °С для цього потрібно 14 годин. При підігріванні повітря не слід забувати про додаткову відстань між насадками для проходу повітря.

Для збільшення кількості насадок без зростання сусідніх рядів запропоновано в патенті [15] насадки розміщувати в шаховому порядку. Враховуючи те, що бурульки мають конічну форму.

Висновки

1. Експериментально досліджено і проведено аналіз зростання бурульок на дротяних насадках.
2. Найменша відстань між паралельними насадками у кристалізаторах-підігрівачах повітря повинна враховувати можливість проникнення повітря.
3. На дротяних насадках за температури оточуючого повітря -5 °С і -10 °С слід приймати збільшення радіуса бурульок в горизонтальній площині біля насадок з дроту $1,5$ мм і 3 мм на годину відповідно. При пошаровому методі виробництва льоду при температурі оточуючого повітря -5 °С товщина льоду зростає на 1 мм за годину.
4. Відстань між насадками визначає максимально можливу довжину бурульок, яка впливає на відстань між ярусами.
5. Середня теплова потужність підігрівача повітря зростає з часом. Тривалість роботи установки залежить від відстані між насадками. Проходження повітря блокується змерзанням верхніх частин бурульок сусідніх конгломератів.
6. Підігрівача повітря з горизонтальними насадками з ніхромового дроту не потребує значних капіталовкладень, споживає мінімальну кількість електроенергії, не потребує людської праці для видалення готового продукту, може бути механізована та автоматизована. На 1 м² площі насадок підігрівача можна отримати від 1 до 4 кВт середньої теплової потужності при температурах повітря $-5...-10$ °С.
7. Дротяні насадки забезпечують простий спосіб знімання льоду з насадок пропусканням електричного струму через дріт протягом $5...10$ хвилин.

Список використаної літератури

1. M. Farzaneh (ed.). Atmospheric Icing of Power Networks. – Springer, 2008. – P.350
2. Бобков В. А. Производство и применение льда / В. А. Бобков – М.: Пищевая промышленность, 1977. – 223 с
3. Fikke S., Ronsten G., Heimo A., Kunz S., Ostrozlik M., Persson P.-E., Sabata J., Wareing B., Wichura B., Chum J., Laakso T., Sääntti K., Makkonen L. Atmospheric Icing on Structures COST 727: 2006, Measurements and data collection on icing // State of the Art Publication of MeteoSwiss. – 2007. – Vol.75, P. 110.
4. Ueno K., Farzaneh M. Morphological instability of the solid-liquid interface in crystal growth under supercooled liquid film flow and natural convection airflow. Phys. Fluids, 22(017102), 2010.
5. Ueno K., Farzaneh M., Yamaguchi S., Tsuji H. Numerical and experimental verification of a theoretical model of ripple formation in ice growth under supercooled water film flow. Fluid Dyn. Res., 42(025508), 2010

6. Larszlor E. Kollarr , Farzaneh M. Modeling the evolution of droplet size distribution in two-phase flows // International Journal of Multiphase Flow. – 2007. – Vol.33 – P. 1255-1270.
7. Szilder K. Simulation of ice accretion on a cylinder due to freezing rain // Journal of Glaciology. – 1994. – Vol.40, № 136. – P. 586-594.
8. Пуховой И. И. Энергетические и экологические показатели производства и аккумуляции льда, заготовленного зимой в Украине / И. И. Пуховой, Л. Н. Ляхович // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т.26, № 5. – С. 67-71.
9. Пуховой И. И. Экономия природного газа при замене котлов тепловыми насосами и использовании теплоты кристаллизации воды как альтернативы теплоты грунта зимой / И. И. Пуховой, М. К. Безродный, С. А. Мхитарян // Возобновляемая энергетика. – 2006. – №1. – С. 15-19.
10. Пуховий І. І. Зміна геометричних параметрів зростання конгломератів бурульок на горизонтальних насадках при розпиленні води форсункою / І. І. Пуховий, А. М. Постоленко // Наукові вісті НТУУ КПІ. – 2018. – №4. – С. 63- 68.
11. Пуховой И. И. Образование льда в сосульках и использование теплоты кристаллизации для подогрева воздуха / И. И. Пуховой, А. М. Постоленко // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т.91, № 3. – С. 800 – 806.
12. Авторское свидетельство № 1388665 СССР, МКИ F 24 D 15/00. Система отопления здания / И. И. Пуховой, заявл. 19.03.1986, опубл. 15.04.1988. Бюл. № 14.
13. Пуховой И. И. Система отопления зданий без теплового насоса с использованием природной холодной воды./ И. И. Пуховой // Промышленная теплотехника. – 1992. – Т.14, №1. – С. 57-61.
14. Пуховой И. И. Сравнение систем отопления с непосредственным и теплонасосным использованием воды с потенциалом до 30°C / И. И. Пуховой // Проблемы машиностроения. – 2005. – №2. – С. 23-27.
15. Патент на корисну модель № 93148, Україна, МПК F24C 1/00 F24D 15/00. Охолоджувач-кристалізатор води для підігрівання повітря і генерації льоду в бурульках / І.І. Пуховий, М.Л. Новік, А.М. Постоленко, заявник і патентоутримувач Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, заявл. 25.02.2014, опубл. 25.09.2014. Бюл. № 18.

I. Pukhovoy, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0003-4915-9699

A. Postolenko, Ph.D., ORCID 0000-0003-0502-8910

A. Petrechuk, student

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

ABOUT CONSTRUCTIVE FEATURES OF DEVICES FOR PRODUCING ICE IN ICICLES AND THEIR INFLUENCE ON PRODUCTIVITY

The paper describes the results of research of icicles formation and growth on wire nozzles when water is sprinkling with a striking on a hard surface and (or) use a nozzle for spraying water at ambient temperatures of outside air -3 ... -7 °C. The studies were carried out on wires with a diameter of 3 mm and 0.5 mm with a distance between the nozzles of 10 mm and 29 mm, respectively. Dependences of the ice mass calculating, assigned to one meter of the nozzle and the temperature difference in 1 °C on time, were obtained. The icicles growth process on horizontal nozzles in time has been studied. Values of the growth rate were obtained: in the direction of the radius was 0.3 mm per 1 °C and the elongation rate was about 1 mm per hour at an ambient temperature of -5 °C. The maximum length of icicles depends on the distance between the nozzles. The free section for air flowing is blocked by ice after a while, and the water supply to the icicles is blocked. The required distances between the parallel nozzles are calculated for different air temperatures. Distances between the parallel nozzles have to be extended for increasing section for air flowing if water crystallization heat is used for ventilation systems or heat pumps.

The average thermal power of the installation with wire horizontal nozzles, which can be used to heat the air by the heat of water crystallization, has been determined. The average thermal power increases over time, which is associated with increasing heat exchange surface and part of the formed ice from the water that has fallen on the surface of the packing. For the first 30 min. of work, the average value of the share of formed ice is 8%. After 7 hours. work, up to 28% of the water falling on the nozzles turns into ice. From 1 to 4 kW of average thermal power can be got at air temperatures of -5...-10 °C of the area from 1 m² of the nozzles. The specified air heater does not require significant investment, consumes a minimum amount of electricity, does not require human labor to remove the finished product, and can be mechanized and automated. To increase the number of nozzles without the growth of adjacent rows, it is proposed to place the nozzles in a checkerboard pattern.

Key words: renewable energy sources, ice, icicle, heat air for ventilation, heat of crystallization, icicles formation, freezing ice rate.

Надійшла 13.11.2021

Received 13.11.2021

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

УДК 621.873-83(082)

DOI

О.О. Закладний, канд. техн. наук, доцент, ORCID: 0000-0003-2813-3692
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИЗНАЧЕННЯ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗАСОБАМИ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ ЇХ СТАНУ

Електродвигуни, як правило, розраховані на термін служби 15...20 років без капітального ремонту, за умови правильної їх експлуатації. Під правильною експлуатацією розуміється робота відповідно до номінальних параметрів, зазначених в паспортних даних електродвигуна. Однак на практиці має місце значне відхилення від номінальних режимів експлуатації. Це, передусім, низька якість напруги живлення й порушення правил технічної експлуатації: технологічні перевантаження, умови навколишнього середовища (підвищені вологість, температура), зниження опору ізоляції, порушення охолодження.

Наслідком таких відхилень є аварійні режими роботи електродвигунів. У окремих підгалузях промисловості аварійність електродвигунів коливається від 20 до 50% на рік. Вихід з ладу електродвигуна призводить до важких аварій і значних матеріальних збитків через простої обладнання, затрати на усунення наслідків аварій і ремонт електродвигуна, що вийшов з ладу. Ремонт електричної машини потужністю 1 кВт обходиться в 550-700 грн. Щоб оцінити вартість ремонту потужнішої машини, треба помножити цю цифру на потужність двигуна. Крім цього, робота на аварійних режимах призводить до підвищеного енергоспоживання та збільшення спожитої реактивної потужності.

Одним із перспективних видів захисту від аварійних режимів є застосування сучасних систем діагностування із функцією моніторингу за ознаками аварійних режимів. Тому актуальною задачею є усунення недоліків пристроїв захисту шляхом використання сучасних інтелектуальних систем діагностування їх стану.

Завдання полягає у визначенні сукупності діагностичних ознак аварійних електричних режимів асинхронних електродвигунів для застосування цих ознак в системах функціонального діагностування енергетичного і технічного стану двигуна і збільшення достовірності встановлення характерних видів ушкоджень.

У статті розглянуто сукупність ознак аварійних електричних режимів для різних видів ушкоджень асинхронних двигунів. Ці ознаки можуть бути використані в сучасних системах діагностування енергоефективності та технічного стану електромеханічних систем, які можуть також виконувати функцію захисту електродвигунів від аварійних режимів.

Ключові слова: діагностування, електродвигун, аварійні режими, короткі замикання.

Вступ. Значна частина промислових установок і механізмів на підприємствах України експлуатуються з перевищенням установленого строку служби, що призводить до їх високої аварійності та виходу з ладу асинхронних двигунів (АД) [1]. Аварії поділяються на технологічні – близько 35%, експлуатаційні (головним чином незадовільний захист АД) – 50% та конструкційні – 15% [2].

Щороку виходять з ладу до 20% АД у машинобудівній промисловості, 30% - у гірничодобувній, 15% - у металургійній, 55% - у будівництві, 20% - у машинобудуванні, 10 -15% - у хімічній [3].

Експлуатація установок і механізмів з АД, яка супроводжується численними ремонтами, призводить до того, що на підприємствах використовується асинхронні електроприводи, реальні

енергетичні показники якого значно нижчі декларованих виробником, а середній строк служби двигунів не перевищує 5-7 років.

Аварії електродвигунів поділяються на два основних типи: механічні та електричні. До механічних належать: деформація або поломка валу ротора, ослаблення кріплення осердя статора до станини, ослаблення обпресування осердя ротора, виплавляння бабіту в підшипниках ковзання, руйнування сепаратора, кільця або кульок у підшипниках кочення, поломка крильчатки, відкладення пилу й бруду в рухомих елементах тощо [1].

Причиною більшості механічних аварій є радіальна вібрація через асиметрію мережі живлення, механічні перевантаження на валу електродвигуна, виробничий брак комплектуючих елементів або неакуратне складання. До 10% всіх аварій електродвигунів мають механічне походження. З них 8% складає частка аварій, пов'язаних з асиметрією фаз, і лише 2% - аварії, пов'язані з механічним перевантаженням. Частка аварій, пов'язаних з браком є незначною, тому її можна не брати до уваги. На сьогодні оцінка ймовірностей виникнення механічних аварій відсутня. Більша їх частина має прихований характер і виявляється лише після відповідних випробувань або розбирання двигуна, однак постійний контроль мережевої напруги та струму електродвигунів дозволяє у більшості випадків звести цю ймовірність до мінімуму.

Електричні аварії електродвигунів, у свою чергу, поділяються на три типи:

- мережеві аварії (аварії за напругою), пов'язані з аваріями в електромережі;
- струмові аварії, пов'язані з обривом провідників у обмотках статора, ротора або кабеля, міжвитковим і міжфазним замиканнями обмоток, порушенням контактів і руйнуванням з'єднань, виконаних за допомогою паяння або зварювання; аварії, пов'язані з пробоем ізоляції в результаті нагрівання, викликаного протіканням струмів перевантаження або короткого замикання (к.з.);
- аварії, пов'язані зі зниженням опору ізоляції внаслідок її старіння, руйнування або зволоження.

Постановка задачі дослідження. Для того, щоб захистити електродвигун від аварійних режимів, застосовують релейний захист: тепловий, струмовий, температурний і комбінований. Багаторічний досвід експлуатації електродвигунів показав, що більшість існуючих пристроїв захисту не гарантують їх безаварійної роботи [1]. Застосування надійного й ефективного захисту від аварійних режимів роботи дозволяє значно скоротити кількість і частоту аварійних ситуацій і подовжити термін служби електродвигунів, зменшити витрати електроенергії й втрати від зупинення технологічного процесу.

Переважає більшість існуючих пристроїв захисту асинхронних електродвигунів (АД) відрізняються один від одного за своїми функціональними можливостями і мають загальні недоліки: низьку точність встановлення струмів, спрацьовування за максимально допустимого струму, відсутність контролю напруги. Вони в повній мірі не вирішують завдання захисту АД від перевантажень, ушкоджень силового живильного кабелю, перекосу фазних струмів, пов'язаних із внутрішніми аваріями двигуна або з погіршенням опору ізоляції обмоток.

Одним із перспективних видів захисту від аварійних режимів є застосування сучасних систем діагностування із функцією моніторингу за ознаками аварійних режимів. Тому актуальною задачею є усунення недоліків пристроїв захисту шляхом використання сучасних інтелектуальних систем діагностування їх стану.

Завдання полягає у визначенні сукупності діагностичних ознак аварійних електричних режимів АД для застосування цих ознак в системах функціонального діагностування енергетичного і технічного стану двигуна і збільшення достовірності встановлення характерних видів ушкоджень.

Основні матеріали дослідження. Експлуатація установок і механізмів з АД має такі особливості: технічний стан і надійність їх роботи спричиняють критичний вплив на рівень виробничих ризиків (простої обладнання тощо); АД використовуються не в номінальних режимах роботи; фізична зношеність 60-90% і неефективність технологічного обладнання; високий рівень пошкоджуваності (підтримання працездатності АД забезпечується за рахунок ремонтів); витрати на технічне обслуговування і ремонт становлять значну частку загальної структури витрат; висока вартість нового устаткування, тривалі терміни пусконаладжувальних робіт; завищена встановлена потужність двигунів. Ці обставини призводять до зниження ефективності електромеханічного перетворення енергії та ККД.

Основні типи аварій АД – електричні.

Трифазні симетричні короткі замикання (табл. 1). Найпростішим випадком трифазного короткого замикання (КЗ) є одночасне замикання трьох фаз в одній точці. За умови рівності перехідних опорів замикання буде симетричним, за нерівності - несиметричним. Залежно від співвідношення реактивного $X_{\phi,к}$ і активного $R_{\phi,к}$ опорів фази від джерела живлення до місця КЗ між струмами й відповідними ЕРС утворюється зсув (рис. 1)

$$\varphi_k = \arctg \frac{X_{\phi,к}}{R_{\phi,к}}$$

відмінний від зсуву в нормальному режимі [4]. У кабельних мережах φ_k менший, а в повітряних лініях – більший кута зсуву між струмом і напругою в нормальному режимі.

Таблиця 1. Ознаки трифазних симетричних КЗ АД

Ознаки аварійного режиму	Вплив на електропривод і мережу
Струми фаз різко зростають (струм КЗ може перевищувати пусковий струм двигуна), фазні й лінійні напруги зменшуються. Між струмами й відповідними напругами встановлюється зсув відмінний від зсуву в нормальному режимі. Вектори струмів і напруг є симетричними й урівноваженими, у них відсутні складові зворотних і нульових послідовностей.	При зниженні напруги різко зменшується обертальний момент двигуна ($M \equiv U^2$), фазні обмотки статора перегріваються й згорають. Ударні струми являють велику небезпеку – викликають значні зусилля між струмопровідними частинами устаткування, руйнуючи його й викликаючи нагрівання, що у багато разів перевищує термічну стійкість ізоляції.

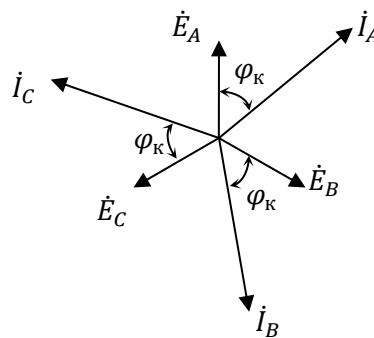


Рисунок 1 - Векторна діаграма ЕРС і струмів трифазного КЗ

Струм трифазного КЗ

$$I_k^{(3)} = \frac{E_\phi}{Z_{\phi,k}}$$

де E_ϕ – ЕРС фази; $Z_{\phi,k}$ – повний опір однієї фази.

Двофазні (міжфазні) КЗ (табл. 2). Міжфазні КЗ в обмотках статора є основним видом ушкоджень у АД. Вони супроводжуються значними струмами, які викликають руйнування обмоток і сталі двигуна [5]. Найпростішим випадком двофазного КЗ є металічне замикання двох фаз в одній точці, а більш складним - замикання двох фаз через перехідні опори в одній або різних точках мережі.

Якщо знехтувати струмами навантаження, то при замиканні фаз В і С струм у фазі А дорівнює нулю, а струми в ушкоджених фазах дорівнюють двофазному струму короткого замикання (рис. 2,а). Вектор струму I_B відстає від ЕРС $E_{BC} = E_B - E_C$ на кут φ_k , а I_C спрямований протилежно I_B . Фазні напруги ушкоджених фаз у місці КЗ дорівнюють за модулем і збігаються за фазою. Напруга ушкодженої фази дорівнює половині напруги неушкодженої фази й протилежна їй за знаком

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A; \dot{U}_B = \dot{U}_C = -0,5\dot{U}_A; \dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AC} = 1,5\dot{E}_A; \dot{U}_{BC} = 0.$$

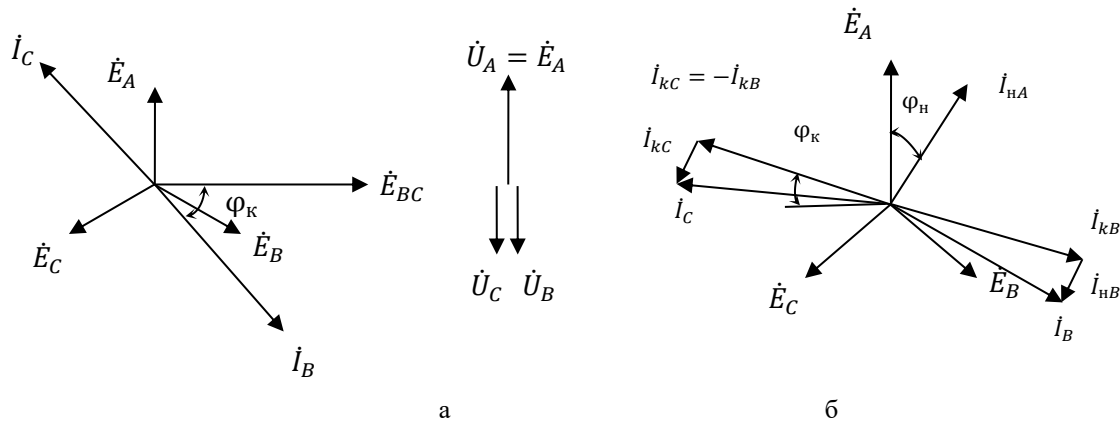


Рисунок 2 - Векторна діаграма ЕРС і струмів та діаграма напруг при двофазному КЗ без урахування навантаження (а), векторна діаграма ЕРС і струмів із урахуванням навантаження (б)

Ступінь і знак впливу струму навантаження на струм КЗ залежать від значень і кутів повних опорів навантаження й мережі. При позитивній різниці (рис. 2,б), тобто, при $\varphi_n > \varphi_k$ струм випереджальної фази I_B зменшується, а відстаючої фази I_C – збільшується (φ_n, φ_k – кути між ЕРС і струмом навантаження й короткого замикання). При $\varphi_n < \varphi_k$, що є характерним для мереж з поздовжньою або поперечною ємнісною компенсацією, відбувається зворотне явище. У практичних умовах, для мереж без компенсації різниця фазових кутів опорів навантаження й мережі не перевищує $55 - 60^\circ$.

Таблиця 2. Ознаки двофазних КЗ АД

Ознаки аварійного режиму	Вплив на електропривод і мережу
КЗв одній точці	
Струми значно перевищують номінальний струм двигуна. Якщо КЗ відбувається при навантаженні, то в неушкодженій фазі протікає лише струм навантаження, а в uszkodжених фазах струм навантаження накладається на струми КЗ, збільшуючи повний струм однієї фази й зменшуючи іншої. Фазні напруги в місці КЗ вищі нуля, одна міжфазна напруга знижується до нуля, а значення двох інших в 1,5 рази більше фазної. Вектори струмів і напруг утворюють несиметричну, але врівноважену систему, мають складові прямої і зворотної послідовностей, але не мають складових нульової.	Результуючий момент двигуна визначається різницею моментів, обумовлених полями прямої і зворотної послідовностей. При ковзанні $s=1$ результуючий момент дорівнює нулю. У міру росту швидкості момент двигуна залишається незначним, двигун може зупинитися і перегрітися. Найбільш важкий режим роботи двигуна настає при металічному КЗ, коли напруги прямої й зворотної послідовностей однакові й дорівнюють $0,5U_n$. Для мереж без компенсації різниця фазових кутів опорів навантаження й мережі не перевищує $55 - 60^\circ$.
КЗ із неоднаковим числом замкнутих витків окремих фаз	
Струми при такому uszkodженні визначаються за методом симетричних складових. Різниця кутів між струмами фаз перевищує 60° .	Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна.
КЗ на землю в мережі з ізольованою нейтраллю	
Значення струмів uszkodжених фаз, міжфазних напруг залишаються такими ж, як і при звичайному двофазному замиканні. Струм нульової послідовності відсутній. Ушкоджені фази в місці металічного КЗ вимушено набувають потенціалу землі. З'являється напруга нульової послідовності. Нейтраль системи (трансформатора) одержує відносно землі зсув $0,5$ ЕРС, а напруга неушкодженої фази зростає до $1,5$ ЕРС.	Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна.
КЗ на землю в мережі з глухозаземленою нейтраллю	
Сильне зниження міжфазних і фазних напруг uszkodжених фаз (у місці КЗ до нуля) і поява складових нульової послідовності не лише у фазних напругах, але й струмах. Напруга між uszkodженими фазами дорівнює нулю. Напруга неушкодженої фази залишається нормальною. Міжфазні напруги між uszkodженими фазами й неушкодженою знижуються до фазної напруги. Вектори струмів і напруг несиметричні й не врівноважені, з'являються складові прямої послідовності, зворотної і нульової.	Через різке зниження напруги в місці КЗ (режим має найменше значення напруги прямої послідовності) цей вид uszkodжень після трифазного КЗ є найважчим з точки зору збереження стійкості енергосистеми й споживачів.

При несиметричному КЗ фаз B і C маємо $R_A = \infty; R_B = R_C = 0$. Тоді фазні напруги та їх симетричні складові дорівнюють (рис. 3)

$$U_B = U_C = 0,5U_A; U_1 = U_2 = -0,5U_A; U_0 = 0.$$

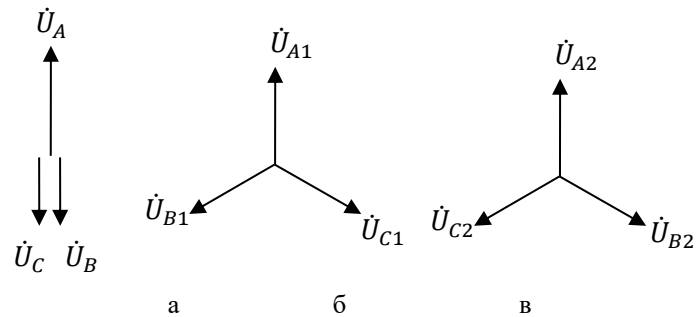


Рисунок 3 - Векторні діаграми напруг (а) у місці двофазного КЗ і їх симетричних складових (б, в)

Двофазне КЗ із неоднаковою кількістю замкнутих витків окремих фаз є одним з найбільш імовірних видів міжфазних КЗ (рис. 4) [6].

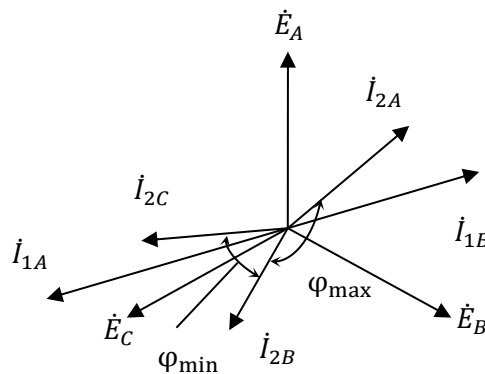


Рисунок 4 - Векторна діаграма двофазного КЗ із неоднаковим числом короткозамкнених витків

Різницю кутів між струмами фаз можна визначити як $\Delta\varphi = \varphi_{\max} - \varphi_{\min}$, де φ_{\max} , φ_{\min} максимальний і мінімальний кути зсуву між струмами фаз АД з боку живлення. Різниця кутів $\Delta\varphi$ при двофазному КЗ перевищує 60° . Отже, цей параметр є надійним критерієм виявлення двофазного КЗ із неоднаковою кількістю замкнутих витків окремих фаз.

Двофазні КЗ на землю. КЗ на землю в мережі з ізольованою нейтраллю відрізняються від звичайного двофазного тим, що ушкоджені фази, наприклад В і С, у місці металічного КЗ вимушено набувають потенціалу землі [7].

Симетричні складові фазних напруг $U_1 = U_2 = U_0 = \frac{1}{3} U_A$. Оскільки $R_A = \infty$, струм у неушкодженій фазі $I_A = I_1 + I_2 + I_0 = 0$, а струми в ушкоджених фазах $I_B = a^2 I_1 + a I_2$; $I_C = a I_1 + a^2 I_2$.

У мережі із глухозаземленою нейтраллю [7] у місці КЗ напруги ушкоджених фаз дорівнюють нулю $U_B = U_C = 0$. Напряга між ушкодженими фазами також дорівнює нулю $U_{BC} = 0$. Напряга неушкодженої фази U_A лишається нормальною. Міжфазні напруги між ушкодженими й неушкодженими фазами U_{AB} і U_{CA} знижуються до фазної напруги U_A . В ушкоджених фазах В і С протікають струми I_B і I_C , що замикаються через землю $I_K = I_B + I_C$ [8]. Сума струмів трьох фаз не дорівнює нулю (у неушкодженій фазі струм відсутній $I_A = 0$) $I_A + I_B + I_C = I_K = 3I_0$.

Подвійні замикання на землю можливі лише в мережах з ізольованими нейтраллями або з нейтраллями, заземленими через дугогасильний реактор. Вони виникають на приєднаннях з ослабленою ізоляцією за перенапруг, які з'являються при однофазних замиканнях на землю. Правилами технічної експлуатації допускається працювати із заземленою фазою протягом двох годин. При цьому струм в обмотці статора буде приблизно такий само, як при двофазному КЗ [5].

Однофазні замикання на землю (табл. 3). Ушкодження ізоляції обмотки статора призводить до замикання фази на заземлений корпус АД. Існує кілька причин, що викликають замикання на землю. Перша пов'язана з поступовим погіршенням ізоляції до пробоя під дією напруги, друга - пробій у результаті комутаційних перенапруг.

Однофазні КЗ є найчастішим видом ушкоджень у мережах із глухозаземленими нейтраллями, що характерно для чотирипровідних мереж напругою до 1кВ. Мережі із заземленою нейтраллю дозволяють, наприклад, при чотирипровідній системі, забезпечити живлення 380В для двигунів і 220В для освітлення.

Замикання фази на землю в мережі 380В становить небезпеку для АД і є однофазним КЗ, що характеризується протіканням великих струмів сумірних зі струмами міжфазних КЗ [5].

Векторні діаграми напруг і струмів мають наступні особливості: струми й напруги несиметричні й нерівноважені, ушкоджена фаза в місці КЗ набуває потенціалу землі (рис. 5) [8].

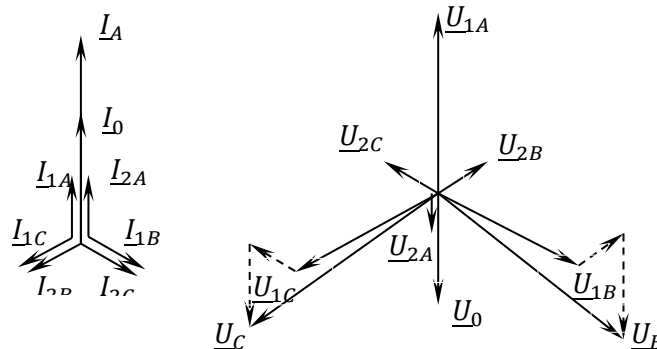


Рисунок 5 - Векторні діаграми струмів і напруг при однофазному КЗ у мережах із глухозаземленою нейтраллю трансформатора

Таблиця 3. Ознаки однофазних КЗ АД

Ознаки аварійного режиму	Вплив на електропривод і мережу
КЗ на землю в мережі з глухозаземленою нейтраллю	
Характеризуються протіканням великих струмів сумірних зі струмами міжфазних КЗ. Ушкоджена фаза в місці КЗ вимушено набуває потенціалу землі. Струми й напруги несиметричні і нерівноважені, внаслідок чого з'являються складові прямих, зворотних і нульових послідовностей.	Однофазні КЗ є найчастішим видом ушкоджень у мережах із глухо заземленими нейтраллями, що характерно для чотирипровідних мереж напругою до 1кВ. Замикання фази на землю в мережі 380В становить небезпеку для двигуна й характеризується протіканням великих струмів сумірних зі струмами міжфазних КЗ.
КЗ на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю	
Не викликають КЗ, оскільки ЕРС ушкодженої фази не шунтується з'єднанням, що з'явилося з землею, і для струму пошкодження відсутнє замкнуте коло від місця пошкодження до нейтралі трансформатора. Струм замикається через ємність проводів непошкоджених фаз мережі щодо землі й має невелике значення. Напруга пошкодженої фази стосовно землі дорівнюватиме нулю, а напруги двох інших фаз збільшаться в $\sqrt{3}$ раз і дорівнюватимуть міжфазним напругам мережі, які залишаються незмінними.	Однофазне замикання на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю не порушує роботу споживачів, однак викликає перенапругу в мережі. Перенапруги, у свою чергу, викликають порушення ізоляції обмоток щодо землі двох неушкоджених фаз двигуна й переходу однофазного замикання на землю в міжфазне КЗ або подвійне замикання на землю.
Однофазні виткові замикання	
Є несиметричними ушкодженнями, що призводять до спотворення діаграми струмів і напруг. Різко зростає струм прямої послідовності, струм зворотної послідовності лишається практично без зміни. Коротке замикання всього 3-5% витків однієї фази обмотки статора АД призводить до неприпустимого перегрівання, що викликає руйнування ізоляції.	Знижується момент обертання двигуна, і він перегрівается. Ступінь зниження моменту залежить від співвідношення потужностей ушкодженого двигуна й живильної мережі, відносного числа витків, що замкнулися і т. ін. При виткових замиканнях двигун слід негайно вимкнути.

Точне визначення струму I_k можна зробити за методом симетричних складових. При однофазних КЗ $R_{пА} = 0; R_{пВ} = R_{пС} = \infty$. При цьому

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 0; \dot{U}_1 = -(\dot{U}_2 + \dot{U}_0); \\ \dot{U}_2 &= \dot{I}_2 \frac{z_{C2} z_{H2}}{z_{C2} + z_{H2}}; \dot{U}_0 = \dot{I}_2 z_{C0}. \end{aligned}$$

Для знаходження повних струмів окремих фаз урахується умова $R_{ПВ} = R_{ПС} = \infty$ $\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = \dot{I}_K$; $\dot{I}_B = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_0$; $\dot{I}_C = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_0$.

У мережах з ізольованою нейтраллю однофазне замикання на землю безпосередньої небезпеки для АД й мережі не являють. Небезпека замикань полягає в тому, що вони можуть переходити в подвійні замикання на землю, а струми ушкодження можуть досягати значення струму двофазного КЗ [9].

Виткові замикання обмоток статора АД є поширеним видом ушкоджень. Коротке замикання 3-5% витків однієї фази обмотки статора АД призводить до неприпустимого перегрівання, що викликає руйнування ізоляції.

Виткові замикання АД можуть бути одно-, дво- і трифазні; симетричні й несиметричні, металічні й неметалічні тощо. Основною причиною виникнення виткових замикань є зниження електричної міцності ізоляції обмоток. Виткові замикання є несиметричними ушкодженнями, що призводять до спотворення діаграми струмів і напруг нормального режиму й супроводяться зниженням обертального моменту двигуна (рис. 6). При виткових замиканнях двигуни підлягають негайному відключенню.

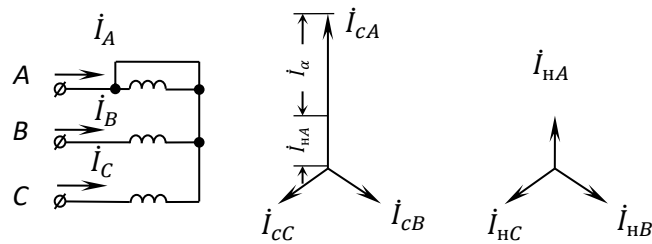


Рисунок 6 - Схема й векторні діаграми струмів при замиканні всіх витків фази А

Обрив фази живильної мережі (робота трифазних двигунів у однофазному режимі) (табл. 4). Причинами виникнення такого режиму можуть бути перегорання одного із запобіжників, обрив фазного проводу в мережі, порушення контакту у фазі, обрив фази в обмотці статора, порушення контакту у вивідній коробці тощо. Відомо, що пуск АД в такому режимі неможливий, і двигун відключається захистом від перевантаження.

Ураховуються такі фактори: схема сполучення обмоток двигуна; робочий стан двигуна в момент втрати фази (до або після ввімкнення двигуна, під час роботи під навантаженням, ступінь завантаження двигуна); число двигунів, які працюють зі втратою фази та їх взаємний вплив [10]. Якщо неповнофазний режим виник під час роботи АД, то захист може виявитися неефективним, оскільки при малому завантаженні двигуна струми в обмотках статора можуть виявитися нижчими, ніж уставка захисту від перевантаження.

При сполученні обмоток статора в зірку й обриві лінійного проводу А дві послідовно з'єднані обмотки двигуна виявляються включеними на лінійну напругу (рис. 7,а). При загальмованому роторі напруга на фазах В й С дорівнює половині лінійної напруги U_{BC} , а напруга на фазі А, дорівнює нулю. При швидкості обертання близькій до синхронної на обмотках відновлюється симетрична система трифазної напруги, а напруга нейтралі зірки дорівнює нулю. Для струмів I_A , I_B й I_C одержимо $\dot{I}_A = 0$; $\dot{I}_B = -\dot{I}_C = \dot{I}_{06}$, де I_{06} – струм статора двигуна в однофазному режимі.

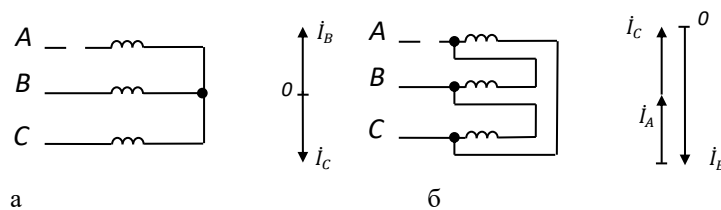


Рисунок 7 - Схеми й векторні діаграми струмів АД, з'єданого відповідно в Y (а) і Δ (б) при обриві лінійного проводу

Таблиця 4. Ознаки обриву фази живильної мережі АД

Ознаки аварійного режиму	Вплив на електропривод і мережу
Сполучення обмоток статора в зірку	
Дві сполучені послідовно обмотки двигуна виявляються включеними на лінійну напругу. При загальмованому роторі напруга на неушкоджених фазах дорівнює половині лінійної напруги, а напруга на uszkodженій фазі – нулю. Якщо втрата фази відбулася до вмикання двигуна, то пусковий струм становить 86% від пускового при трифазному живленні, тобто в понад 5 раз перевищує номінальний. За короткий час такий струм перегріє обмотки. У випадку втрати фази після вмикання двигуна в роботу величина струму збільшується на 75%.	В однофазному режимі в обмотці статора проходить однофазний струм, що створює пульсуюче магнітне поле. Поле змінюється в часі, але не переміщується по колу статора. Якщо втрата фази відбулася до включення двигуна в мережу, то він не може запуститися навіть за відсутності навантаження на валу. При переході двигуна із трифазного режиму роботи в однофазний на ходу утвориться обертальний момент. Якщо швидкість двигуна близька до номінальної, обертальний момент достатній для продовження роботи з невеликим зниженням
Сполучення обмоток статора в трикутник	
Обмотка однієї фази виявляється ввімкненою на лінійну напругу, а обмотки двох інших фаз - послідовно на ту саму напругу. Напруги між uszkodженою фазою й неушкодженими залежать від швидкості обертання ротора. При загальмованому роторі ці напруги дорівнюють половині лінійної, при синхронній швидкості вони дорівнюють лінійній напрузі. У пусковому режимі при втраті фази пусковий струм в одній з фаз дорівнює пусковому струму при трифазному живленні, а лінійний струм зростає менш інтенсивно. У випадку втрати фази після введення двигуна в роботу струм у найбільш навантаженій фазі збільшиться вдвічі, а лінійний – в 1,73 рази.	швидкості. При швидкості обертання близької до синхронного на обмотках відновлюється симетрична система трифазної напруги. На відміну від трифазного симетричного режиму з'являється характерне гудіння. В іншому зовнішні прояви аварійного режиму не спостерігаються. Перевантаження по струму при обриві лінійного проводу настає при $P \geq 0,5P_n$, тому двигун у цьому режимі може працювати, не виходячи за межі допустимого нагрівання, тільки при зниженні потужності на валу до 50-60% номінальної.

При сполученні в трикутник і обриві лінійного проводу у фазі A , обмотка фази C виявляється ввімкненою на лінійну напругу U_{BC} , а обмотки фаз A і B увімкнені послідовно на ту само лінійну напругу (рис. 7, б). Напруги на виводах AB й CA будуть залежати від швидкості обертання ротора. При загальмованому роторі напруги на виводах AB й CA дорівнюють половині лінійної. При синхронній швидкості відновлюється симетрична система напруг, і напруги на виводах AB й CA дорівнюють лінійній напрузі [8]. Для лінійних струмів справедливі співвідношення $I_{\Delta A} = 0$; $I_{\Delta B} = -I_{\Delta C} = I_{o6}$, а для фазних струмів $I_A = -\frac{1}{3}I_{o6}$; $I_B = -\frac{1}{3}I_{o6}$; $I_C = \frac{2}{3}I_{o6}$; $I_A = I_B = -0,5I_C$.

Визначення заклинювання ротора здійснюється за допомогою контролю струмів фаз. Критерієм настання аварії є перевищення струмом максимально припустимого в статичному режимі значення протягом певного часу. Відмінність від режиму пуску, що не відбувся, полягає в протіканні по фазах двигуна припустимих струмів до моменту виникнення аварії.

Висновки

1. Розглянуто ознаки аварійних режимів (трифазні симетричні КЗ, двофазні КЗ в одній точці, двофазні КЗ із неоднаковою кількістю замкнутих витків окремих фаз, двофазні КЗ на землю в мережі з ізольованою і з глухозаземленою нейтраллю, однофазні КЗ на землю в мережі з глухозаземленою та з ізольованою нейтраллю, однофазні виткові замикання, обрив фази живильної мережі) і вплив на АД й мережу (характер змін у роботі двигуна й мережі).

2. Визначені ознаки є надійним критерієм виявлення електричних ушкоджень АД. Їх застосування для засобів функціонального діагностування енергетичного й технічного стану двигуна дозволить автоматизувати процес і збільшити достовірність встановлення характерних видів ушкоджень.

Список використаної літератури

1. Соркінд М. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Аварийные режимы работы / М. Соркінд // «Новости Электротехники», №2(32), 2005.

2. *Сивокобыленко В.Ф.* Тепловая защита асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при несимметрии питающего напряжения / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2009. – Вип. 3(56), ч.2. – С. 74-78.
3. *Синчук О.Н.* Тепловая модель кранового АД для диагностирования и настройки цифровой защиты от перегрузок / О.Н. Синчук, В.В. Чумак, С.Л. Михайлов // Электротехника, 2003. - №3. – С. 61-66.
4. *Гимоян Г.Г.* Релейная защита горных электроустановок / Г.Г. Гимоян. – изд. 2, перераб. и доп. М.: «Недра», 1978, 349 с.
5. *Сыромятников И.А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников Под ред. Л.Г. Мамакочанца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с., ил.
6. *Корогодский В.И.* Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В.И. Корогодский, С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно – М.: Энергоатомиздат, 1987 – 248 с.
7. *Коваленский И.В.* Релейная защита электродвигателей высокого напряжения / И.В. Коваленский, - Л.: Энергия, 1964 – 81 с.
8. *Сушко В.* Защита низковольтных электродвигателей совершенных устройств / В. Сушко // «Новости Электротехники», №5(35), 2005.
9. *Чернобровов Н.В.* Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов, Семенов В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.: ил.

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

DETERMINATION OF EMERGENCY REGIMES OF ELECTRIC MOTORS BY MEANS OF MODERN SYSTEMS OF DIAGNOSING THEIR CONDITION

Electric motors are usually designed for a service life of 15... 20 years without major repairs, provided they are properly operated. Proper operation means operation in accordance with the nominal parameters specified in the passport data of the motor. However, in practice there is a significant deviation from the nominal modes of operation. These are, first of all, low quality of supply voltage and violation of rules of technical operation: technological overloads, environmental conditions (high humidity, temperature), decrease in insulation resistance, cooling disorders.

The consequence of such deviations are emergency modes of operation of electric motors. In some subsectors of the industry, the accident rate of electric motors ranges from 20 to 50% per year. Failure of the motor leads to severe accidents and significant material damage due to downtime, the cost of troubleshooting and repair of the failed motor. Repair of an electric car with a capacity of 1 kW costs 550-700 UAH. To estimate the cost of repairing a more powerful machine, you need to multiply this figure by the engine power. In addition, operation in emergency modes leads to increased energy consumption and increased reactive power consumption.

One of the promising types of protection against emergencies is the use of modern diagnostic systems with the function of monitoring the signs of emergencies. Therefore, the urgent task is to eliminate the shortcomings of protection devices through the use of modern intelligent systems for diagnosing their condition.

The task is to determine the set of diagnostic features of emergency electric modes of induction motors for the application of these features in the systems of functional diagnostics of energy and technical condition of the engine and increase the reliability of establishing the characteristic types of damage.

The article considers a set of signs of emergency electrical modes for different types of damage to induction motors. These features can be used in modern systems for diagnosing energy efficiency and technical condition of electromechanical systems, which can also perform the function of protecting electric motors from emergency modes.

Key words: *diagnosing, electric motor, emergency modes, short circuits.*

Refereneecs

1. Sorkind M. Asynchronous motors 0.4 kV. Emergency operating modes / M. Sorkind // "Electrical Engineering News", №2 (32), 2005.

2. Sivokobylenko V.F. Thermal protection of an asynchronous motor with a short-circuited rotor with asymmetry of the supply voltage / V.F. Sivokobylenko, SN Tkachenko // Bulletin of the KSPU them. M. Ostrogradsky. - 2009. - No. 3 (56), part 2. - P. 74-78.
3. Sinchuk ON Thermal model of crane AD for the diagnosis and adjustment of digital overload protection / ON. Sinchuk, V.V. Chumak, S.L. Mikhailov // Electrical Engineering, 2003. - №3. - pp. 61-66.
4. Gimoyan GG Relay protection of mountain electrical installations / G.G. Himoyan. - ed. 2, rework. and ext. M.: Nedra, 1978, 349 p.
5. Syromyatnikov IA Modes of operation of asynchronous and synchronous motors / IA Syromyatnikov Ed. L.G. Mamikoyanets. - 4th ed., Reworking. and ext. - M.: Energoatomizdat, 1984. - 240 pp., Ill.
6. Korogodsky VI Relay protection of motors above 1 kV / VI Korogodsky, S.L. Kuzhekov, L.B. Paper - M.: Energoatomizdat, 1987 - 248 p.
7. Kovalensky IV Relay protection of high voltage electric motors / IV. Kovalensky, L.: Energy, 1964 - 81 p.
8. Sushko V. Protection of low-voltage electric motors of perfect devices / V. Sushko // «Electrical Engineering News», №5 (35), 2005.
9. Chernobrov NV Relay protection of power systems: Textbook. manual for technical schools / NV Chernobrov, VA Semenov - M.: Energoatomizdat, 1998. - 800 p.: Ill.

Надійшла 03.04.2022
Received 03.04.2022

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для подання рукопису до журналу автори повинні дотримуватись всіх встановлених вимог, які вказані нижче.

У разі невідповідності поданих матеріалів статті пунктам цих вимог, а також якщо вони не відповідають тематиці наукового журналу, редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання!

Обсяг статті

Загальний обсяг статті – від 6 до 10 сторінок формату А4. Сторінки повністю заповнені текстом. Схеми, рисунки, таблиці й формули повинні бути пронумеровані та розміщені в тексті після посилань на них. Матеріал має бути викладений стисло, без повторювань даних таблиць і рисунків у тексті. Неприпустимо використовувати елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонтитули.

Стаття має бути ретельно перевірена авторами та відповідати всім пунктам вимог до оформлення!!!!

Текстовий редактор

Стаття набирається в текстовому редакторі Microsoft Word (версії 2007 та вище) і зберігається з розширенням *.doc або *.docx.

Обов'язково надсилається стаття, збережена у форматі *.pdf !!!

Загальне оформлення:

1) Мова. Статті приймаються до друку двома мовами: українською та англійською.

2) Параметри сторінки:

- Поля: зліва, справа, зверху, знизу – **2,5 см.**
- Вирівнювання основного тексту – **за шириною.**
- Перші рядки всіх абзаців – **з відступом 1,0 см!!!**
- Шрифт – **Times New Roman, кегль 10, міжрядковий інтервал 1.**
- Назва статті друкується великими (Caps Lock) напівжирними літерами (Ж) – **кегель 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. Рекомендуються 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 англomовної версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

Для надання відомостей про авторів англійською слід використовувати загальноприйнятну лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

Англomовна анотація за обсягом рекомендується більшою за українську 1700-2000 знаків, оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

У разі відсутності або низького рівня перекладу англomовної анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:

(Анкети подаються 2 мовами (укр., англ.). Вказується повна назва організації або установки, вказати місце де працює автор. Якщо всі автори статті працюють або навчаються в одній установі, можна не вказувати місце роботи кожного автора окремо.)

Прізвище, ім'я, по-батькові автора (повністю, без скорочень)	
Вчений ступінь, вчене звання, посада	
Місце роботи кожного автора в називному відмінку (повна назва без скорочень)	
Поштова адреса місця роботи, з поштовим індексом	
Контактний телефон	
Електронна адреса	
ORCID	

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку статей.

Редакція журналу здійснює перевірку на плагіат за допомогою спеціального програмного забезпечення!!!

Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" та не пройшли перевірку на плагіат, будуть повернуті на доопрацювання.

Увага!!! На електронну адресу журналу надсилається:

- стаття версія в форматі *.doc або *.docx;
- стаття версія в форматі *.pdf (ОБОВ'ЯЗКОВО);
- анкета відомостей про авторів;
- акт експертизи про можливість оприлюднення матеріалів у засобах масової інформації.

Контакти:

тел.: +38(044) 204-82-37; сайт: <http://energy.kpi.ua>; e-mail: kravkpi@ukr.net