

ISSN 1813-5420

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

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№4–2018

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

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія

Науковий журнал

№ 4 (54) - 2018

Виходить 4 рази на рік

Заснований у березні 2000 року

Енергетична ефективність та енергозбереження
Енергетичні системи та комплекси
Smart Grid системи та технології
Технології та обладнання в енергетиці
Моніторинг, діагностика та керування енергетичними
процесами та обладнанням
Системні еколого-енергетичні дослідження

Київ

КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

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*), Річард Стржелецькі (*Інститут електротехніки, Варшава, Польща*), П.Я. Екель (*Папський католицький університет Мінас Жерайс, Бразилія*), А.В. Кузнецов (*Університет штату Північна Кароліна, США*), В.І. Олещук (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*), О.В. Кузнецов (*Університет прикладних наук, Німеччина*), Карлос Ф. Пфайфер (*Університетський коледж Південно-Східної Норвегії*), А. Башкіс (*Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва*), Опітс Йоахім (*Інститут енергетики м. Хамм, Німеччина*), В.М. Постолатий (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*)

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 рішення Атестаційної колегії МОН України від 13 грудня 2016 р., затверджене наказом МОН України № 1604 від 22 грудня 2016 р. Журнал включено до баз даних «Наукова періодика України» НБУВ, Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, PИИЦ, Джерело, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, електронного архіву наукових матеріалів ELAKPI. Підписано до друку за рекомендацією Вченої ради Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (протокол № 3 від 14 березня 2019 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Комп'ютерна верстка П.В. Соколовський.

Відповідальний за випуск видання Н.О.Кравчук.

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

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

Видавець КПІ ім. Ігоря Сікорського ВПІ ВПК «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, 2019

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

POWER ENGINEERING

economics, technique, ecology

ENERHETYKA:
ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya

The Scientific Journal

№ 4 (54) – 2018

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Energy efficiency and energy saving
Smart Grid systems and technologies
Energy technologies and equipment
Monitoring, diagnostic and management of power processes and equipment
Environmental and energy system research

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2019

<i>Editor-in-chief-</i>	Yu.I. Yakymenko
<i>Deputy editors-in-chief-</i>	S.P. Denysiuk, O.S. Yandulskyi, E.M. Pysmennyi
<i>Deputy</i>	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 (<i>Institute of Power Systems and Power Economics of Dortmund Technical University, Germany</i>), Richard Strzelecki (<i>Electro technical Institute, Warsaw, Poland</i>), P.Y. Ekel (<i>Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil</i>), A.V. Kuznetsov (<i>North Caroline State University, USA</i>), V. Oleschuk (<i>Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova</i>), O. Kuznetsov (<i>University of Applied sciences, Germany</i>), Carlos F. Pfeiffer (<i>University College of Southeast Norway</i>), A. Baskys (<i>Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania</i>), Opitz H. Joachim (<i>EIH Energy Institute Hamm, Germany</i>), V. Postolati (<i>Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova</i>).
Technical secretary	N.O. Kravchuk
Website of the journal	http://energy.kpi.ua
Journal was registered	Certificate of State Registration Printed Media series KB №22857-12775ПП dated 14 June 2017

The Journal was registered by decision Attestation commission MES of Ukraine of December 13, 2016, approved by order of MES of Ukraine № 1604 of December 22, 2016 as an occupational edition. The Journal is included in databases «Scientific Periodicals of Ukraine», Google Scholar, Index Copernicus WorldCat, BASE, OpenAIRE, RSCI, Djerelo, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, electronic archive of research materials ELAKPI. Passed for printing under recommendation of Academic Council of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (protocol № 3 on March 14, 2019).

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

ISSN	1813-5420 (Print), 2308-7382 (Online).
Address of editorial office	03056, Ukraine, Kyiv, 115 Borschagivska str., office 315 tel. (38-044) 406-85-14, e-mail: kravkpi@ukr.net
The publisher	Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute IPP PPC "Politehnika", Kyiv, 14 Polytechnique str., b. 15.

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

© Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

В.І. Дешко, І.Ю. Білоус, О.Е. Максименко. Аналіз точкової індивідуальної термосанації огороджуючих конструкцій багатоквартирних житлових будинків.....	7
А.А. Хотян, В.П. Розен, О.В. Чермалих. Аналіз ефективності використання фотоелектричних модулів.....	14
Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, А.В. Тимошенко, С.М. Гончарук. Температурний режим помещения, обогреваемого двумя двухпанельными радиаторами	20

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

О.И. Александров, Д.О. Иванько, Т.Е. Жуковская. Применение теории катастроф для оценки существования режима электроэнергетической системы	27
--	----

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

В.Я. Жуйков, І.Ю. Бойко. Застосування лінеаризованої електро – вартісної моделі для дослідження характеру перехідних процесів у ізолюваній генеруючій системі	41
П.В. Соколовський, Р. Шарма. Оцінка ефективності роботи PV систем забезпечення електроенергією в умовах щільної міської забудови	50

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

Л.О. Кесова, Ю.М. Побіровський, П.П. Меренгер. Дослідження та вибір методів контролю витрати вугільного пилу на пальники діючих котлів ТЕС при різних технологіях пилоподачі в умовах змінних навантажень	60
Г.Б. Варламов, К.О. Романова, М.С. Мухін. Аеродинамічні та теплові переваги роботи камер згорання газових турбін при застосуванні мікрофакельної технології газоспалювання	67
В.О. Дьяков, А.В. Антонов, К.Р. Сфремова. Протикорозійний захист пристроїв контактної мережі в зоні стикування електрифікованих ділянок залізниць постійного та змінного струму	76

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

А.В. Волошко, Я.С. Бедрак. Оценка технического состояния силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше	84
О.Л. Тимошук, О.В. Вишневський, А.С. Стулішенко, Є.С. Ігнатюк. Аналіз високочастотних процесів в асинхронних двигунах з виспними обмотками на основі ланцюгових схем заміщення	92
Р.В. Вожаков, В.М. Кириленко. Інтелектуалізація оцінки надійності паросилової установки великого судна	98
Б.А. Кутний, А.М. Павленко. Дволанковий перетворювач частоти, як джерело гармонік Smart-мереж	105

СИСТЕМНІ ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

І.О. Рабош, О.В. Кофанова. Оцінювання ризиків для здоров'я населення внаслідок забруднення довкілля автотранспортом (на прикладі міста Києва).....	115
О.О. Борисов, О.Є. Кофанов. Екологічне навантаження з боку автотранспортних потоків на придорожні території рекреаційного призначення.....	124
В.А. Кондратюк, З.В. Іванов. Оцінка радіаційних наслідків при важких аваріях на атомних електричних станціях	134
Вимоги до оформлення статей.....	141

CONTENTS

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

- V. Deshko, I. Bilous, A. Maksymenko.** Analysis of domestic individual thermosanation of different structures of multi-apartment residential buildings..... 7
- A. Khotian, V. Rozen, O. Chermalykh.** Analysis of the efficiency of the use of photoelectric modules 14
- B. Basok, B. Davydenko, A. Timoshchenko, S. Goncharuk.** Temperature regime of the room, heated by two two-pane radiators..... 20
- O. Alexandrov, D. Ivanko, T. Zhukovskaya.** Application of the catastrophe theory for assessment of existence of the mode of electrical power system..... 27

SMART GRID SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

- V. Zhuikov, I. Boiko.** Using of linearized electro - cost model for a transient processes research in isolated generating system 41
- P. Sokolovskiy, R. Sharma.** Estimation of pv systems power production efficiency in the dense urban development conditions 50

ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- L. Kesova, Yu. Pobirovsky, P. Merenger.** Research and selection of methods for controlling coal dust consumption on burners of existing hpss in different a dust feed technologies under variable load conditions 60
- G. Varlamov, K. Romanova, M. Mukhin.** Gas turbine reception camera aerodynamic and thermal using advantages by microfacciology of gas discharge..... 67
- V. Diacov, A. Antonov, K. Yefremova.** Corrosion protection of contact network on the station splicing electrified railways dc and ac..... 76

MONITORING, DIAGNOSTIC AND MANAGEMENT OF POWER PROCESSES AND EQUIPMENT

- A. Voloshko, Ya. Bederak.** Complex statistical data analysis of electric power consumption, consumption of energy resources and production volumes..... 84
- O. Tymoshchuk, O. Vishnevsky, A. Stulyshenko, Ye. Ignatyuk.** Analysis of high-frequency processes in asynchronous motors with absorption welding on the basis of channel layering schemes 92
- R. Vozhakov, V. Kyrylenko.** Sustained temperature distribution (spreading) in cylindrical insulation in the presence of extraneous sources of heat 98
- B. Kutnyi, A. Pavlenko.** Mathematical modeling of phase-transfer processes in gas-liquid systems..... 105

ENVIRONMENTAL AND ENERGY SYSTEM RESEARCH

- I. Rabosh, O. Kofanova.** Assessment of the risks for the public health associated with the environmental pollution caused by automobile transport (on the Kyiv city example) 115
- O. Borysov, O. Kofanov.** Ecological load on the roadside recreational areas caused by traffic flows 124
- V. Kondratyuk, Z. Ivanov.** Assessment of radiation consequences of severe accident at nuclear power plant 134

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 697.1

В.І. Дешко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8218-3933

І.Ю. Білоус, асистент, ORCID 0000-0002-6640-103X

О.Е. Максименко, аспірант, ORCID 0000-0003-4099-2772

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

АНАЛІЗ ТОЧКОВОЇ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ТЕРМОСАНАЦІЇ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ БАГАТОКВАРТИРНИХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ

Сучасний стан багатоквартирних житлових будинків (ЖБ), побудованих до кінця 90-х років, потребує повної або часткової модернізації та значного підвищення енергоефективності. При термомодернізації ЖБ основна увага приділяється: вдосконаленню архітектурних та об'ємно-планувальних рішень будівель та їх приміщень; підвищенню ефективності роботи системи опалення, водопостачання та кондиціонування повітря; оптимальному використанню природного освітлення. Однак найбільш відповідальним етапом енергозбереження є термосанація зовнішніх огороджуючих конструкцій.

Слід відзначити, що вплив утеплення на опалення потребує додаткового вивчення. При цьому раціональним може бути поєднання експериментального визначення умов комфортності з математичним моделюванням теплових процесів у конструкції будівлі та системі опалення. Виходячи з цього, в роботі проведено аналіз впливу комплексного та «клаптикового» утеплення на температурні умови окремих приміщень та режимів системи опалення при експлуатації типових багатоквартирних будинків.

Ключові слова: теплове навантаження, витрата теплоносія, багатоквартирні будинки, точкова модернізація, умови комфортності, система опалення.

Вступ

Підвищення енергетичної ефективності об'єктів житлово-комунального господарства є одним із стратегічно важливих завдань державної політики України, адже на їх опалення витрачається більше 40% всіх паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) [1]. Досягти зниження витрат ПЕР можна тільки при системному підході до управління та аналізу ефективності.

На сьогодні відбувається гармонізація нормативної бази України з європейською, ведеться співпраця з міжнародними фінансовими організаціями для залучення іноземних інвестицій в рамках міжнародних проектів; активно використовуються інструменти співфінансування (Фонд енергоефективності, регіональні, місцеві програми), створюються муніципальні системи енергетичного менеджменту та енергомоніторингу [2]. Серед інструментів державного впливу на енергоефективність будівельного фонду можна вказати також наступні: удосконалення законодавчої та нормативно-правової бази, ліцензії, сертифікація діяльності (наприклад, енергоаудиторської), ціноутворення та тарифна політика (в тому числі на енергоносії), податкові та кредитні пільги тощо.

Значну частину будівельного фонду було зведено за часів масового серійного будівництва 90-х років, тому енергоемність комунальних послуг на сьогодні є дуже високою і майже вдвічі перевищує показники розвинених країн. Наприклад, Україна витрачає в п'ять разів більше енергії, ніж Німеччина, а в порівнянні з Польщею – витрачає в три рази більше енергії не лише на опалення, а й на освітлення і побутове споживання будівель [3].

Одним з інструментів досягнення енергоефективності у житловому секторі є впровадження заходів на рівні кінцевих споживачів, якими можуть бути як власники приватних будинків, так і ОСББ, ЖБК та інші форми об'єднання співмешканців.

При термомодернізації багатоквартирних житлових будинків основна увага приділяється: вдосконаленню архітектурних та об'ємно-планувальних рішень будівель та їх приміщень; підвищенню ефективності роботи системи опалення, водопостачання та кондиціонування повітря; оптимальному використанню природного освітлення.

Однак найбільш відповідальним етапом енергозбереження є термосанація зовнішніх огороджуючих конструкцій (ОК). Існує два види утеплення: комплексне та «клаптикове» («латкове»). Більшість помилок, що призводять до зниження теплозахисних властивостей і експлуатаційної надійності утеплених конструкцій пов'язано саме з «клаптиковим» утепленням, коли шар утеплювача монтується навколо однієї окремої квартири або декількох сусідніх квартир. Роблячи таке утеплення мешканці підвищують умови комфортності в квартирі, але якщо в ній відсутній прилад обліку тепла та можливість регулювання його споживання – це не вплине на плату за опалення. Слід відзначити, що вплив цього виду утеплення на

опалення потребує додаткового вивчення. При цьому раціональним може бути поєднання експериментального визначення умов комфортності з математичним моделюванням теплових процесів у конструкції будівлі та системи опалення. Можливими недоліками є також втрати тепла через сусідні неутеплені квартири і створення "містків холоду", які сприяють утворенню плісняви і грибка. Окрім вищезгаданого, «латкове» утеплення є ще й забороненим не лише в Україні [4], а й у країнах Західної Європи та Польщі.

Мета та завдання

Метою роботи є аналіз впливу комплексного та «клаптикового» утеплення на температурні умови окремих приміщень та режимів системи опалення (СО) при експлуатації типових багатоквартирних будинків.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання: 1) провести аналіз результатів енергоаудиту типової багатоквартирної будівлі; 2) розробити математичну модель для визначення теплового стану приміщень будівлі з вертикальною однотрубною системою опалення; 3) визначити вплив «клаптикового» утеплення на рівень параметрів опалення і температур приміщення.

Матеріал та результати досліджень

Опис об'єкту досліджень. Як об'єкт проведення енергоаудиту було вибрано окремо розташовану житлову багатоквартирну будівлю у м. Києві (1993 року забудови). Будівля являє собою 12-поверхову споруду, побудовану за індивідуальним проектом, з панельним перекриттям, цегляними стінами та лоджіями, без складних архітектурно-планувальних чи конструктивних рішень. Будинок має 4 під'їзди, сумарно 175 квартир (431 кімната), загальною опалювальною площею 12429 м². СО – вертикальна однотрубна, з проточною схемою підключення приладів опалення (радіатори типу МС–140), тепловий пункт з елеваторним вузлом та теплотічильником). В якості моделі обране житлове приміщення, характеристики ОК якого наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристика огорожувальних конструкцій об'єкту дослідження

Конструктивний елемент	Опис (товщини δ , м та коефіцієнти теплопровідності λ , Вт/м·°С)	Термічний опір R, (м ² ·°С)/Вт	Площі F, м ²
Зовнішні стіни	Плитка керамічна (0,02 ; 0,64) розчин бетонний (0,01 ; 0,93) цегла пориста (0,51 ; 0,58) шпаклівка (0,05 ; 0,81)	1,14	5,35
Зовнішня стіна з утеплювачем	Мінеральна вата (0,10 ; 0,058)	2,86	5,35
Вікна	Однокамерні склопакети з ПВХ профілем, дерев'яні (близько 20%)	0,34	1,8

Загальний вигляд зовнішніх огорожень будівлі показано на рис. 1.



Рисунок 1 – Загальний вигляд зовнішніх стін будівлі ОСББ

Проведено визначення фактичної температури подачі та зворотної води в СО будинку за отриманими даними теплотічильника протягом 1,5 року. Встановлено, що температурний графік подачі теплоносія не відповідає проектному і не забезпечує належних умов комфортності в приміщеннях, а також невідповідність фактичної температури води в зворотному трубопроводі СО, що свідчить про зменшення фактичної витрати теплоносія порівняно з проектною, майже в 1,2 рази, і недотримання комфортних умов у приміщенні.

Враховуючи цю ситуацію, деякі з перемикачів проводили точкову індивідуальну термосанцію огорожуючих конструкцій своїх квартир. Типовим є використання шару утеплювача мінвати товщиною 10 см, що не дозволяє досягти мінімально допустимого опору теплопередачі для зовнішніх стін, якщо становить $3,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ для I температурної зони [5]. Дана ситуація є типовою для багатоквартирних будинків, тому для її аналізу розроблена математична модель та проведено ряд розрахунків, які наведено далі.

Опис моделі. Для досягнення поставленої мети було створено математичну модель, реалізовану в програмному середовищі Mathcad. В моделі розглядається стояк одноконтурної СО з нерегульованими опалювальними приладами (ОП), який проходить через однакові житлові приміщення 12-типоверхового будинку. Ця модель дозволяє визначити температури теплоносія на вході та виході з ОП, тепловий потік від ОП та внутрішню температуру повітря в приміщеннях.

Модель представляє собою систему рівнянь теплового балансу: теплопередачі від приладу опалення до повітря у кімнаті (1), від кімнати назовні (2) та теплового потоку від води до ОП (3), записану для стояка одноконтурної СО. Приймалося, що внутрішні теплонаходження у приміщенні відсутні.

$$Q = Q_p \cdot \left[\frac{t_n + t_{3\text{в}} - t_{\text{вн}}}{70} \right]^{1,3}$$

$$Q = h \cdot (t_{\text{вн}} - t_{3\text{овн}}) \quad (1-3)$$

$$Q = m \cdot c \cdot (t_n - t_{3\text{в}})$$

де Q_p – номінальний тепловий потік ОП при $\Delta t = 70^\circ\text{C}$, $\text{кВт}/\text{м}^2$;

$\Delta t = \frac{t_n + t_{3\text{в}}}{2}$ – середня температура ОП, $^\circ\text{C}$;

t_n – температура теплоносія на вході в ОП, $^\circ\text{C}$;

$t_{3\text{в}}$ – температура теплоносія на виході з ОП, $^\circ\text{C}$;

$t_{\text{вн}}$ – внутрішня температура повітря в приміщенні, $^\circ\text{C}$.

$t_{3\text{овн}}$ – зовнішня температура повітря в приміщенні, $^\circ\text{C}$;

m – витрата теплоносія через стояк, $\text{кг}/\text{с}$;

$c = 4,183 \text{ кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$ – питома теплоємність теплоносія (води).

h – приведений коефіцієнт теплової провідності огороження, визначається згідно характеристик огорожувальних конструкцій, наведених в таблиці 2 та формулою (4) [6,7], $\text{Вт}/\text{К}$.

$$h = h_{tr} + h_{vent} \quad (4)$$

де h_{tr} – загальний коефіцієнт теплопередачі зовнішніх огорожувальних конструкцій, $\text{Вт}/\text{К}$;

h_{vent} – загальний коефіцієнт теплопередачі вентиляцією, $\text{Вт}/\text{К}$.

$$h_{tr} = \sum_{j=1}^m A_s \cdot \frac{1}{R_{se} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{is}} + U_w \cdot A_w \quad (5)$$

де $R_{is} = 0,17 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$ – тепловий внутрішній поверхневий опір [7];

$R_{se} = 0,043 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$ – тепловий зовнішній поверхневий опір [7];

$U_w = 2,94 \text{ Вт}/\text{(м}^2 \cdot \text{К)}$ – коефіцієнт теплопередачі світлопрозорого огороження [8];

A_s, A_w – площі світлопрозорих та непрозорих огорожень відповідно;

δ – товщина i -го шару елемента непрозорої конструкції, м;

λ – теплопровідність матеріалу i -го шару непрозорої конструкції, $\text{Вт}/\text{(м}^2 \cdot \text{К)}$;

n – кількість шарів конструкції;

i – порядковий номер шару конструкції;

m – кількість зовнішніх непрозорих елементів огорожень через які втрачається тепло;

j – порядковий номер зовнішніх непрозорих огорожень.

$$h_{vent} = 0,34 \cdot V \cdot n \quad (6)$$

де $V = 30,6 \text{ м}^3$ – внутрішній об'єм приміщення,

$n = 1 \text{ год}^{-1}$ – кратність повітрообміну.

Результати розрахунків. Розрахунки проведено для даних, представлених в таблиці 2. Фактична витрата води через стояк $0,084 \text{ кг}/\text{с}$. При температурі зовнішнього повітря відповідно -18°C та 0°C температура подачі теплоносія в стояк: $68,8^\circ\text{C}$ та $50,9^\circ\text{C}$ відповідає фактичному температурному графіку з урахуванням охолодження води в подавальному трубопроводі від тепlopункту.

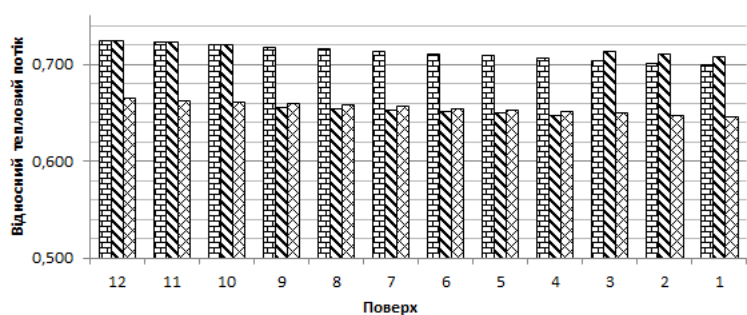
Таблиця 2 – Вихідні дані для розрахунків

Температура зовнішнього повітря $t_{зовн}, ^\circ\text{C}$	-18	0
Температура подачі теплоносія в стояк $t_n, ^\circ\text{C}$	68,8	50,9
Витрата теплоносія через стояк $m, \text{кг/с}$	0,084	
Коефіцієнт теплової провідності огороження $h, \text{Вт/К}$	17,6	
	14,4	

Проведено три варіанти розрахунків поперхового розподілу температур та теплових потоків в приміщеннях:

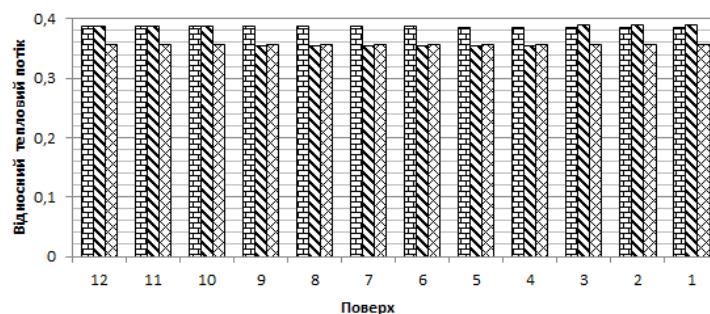
- 1) для коефіцієнта теплопровідності огорожень, розрахованого відповідно до норм забудови будинку;
- 2) для коефіцієнта теплопровідності огорожень, перерахованого для «клаптикового» утеплення стін з 9 по 4 поверх шаром мінвати 10см;
- 3) у випадку комплексного утеплення будинку з 1 по 12 поверхи.

Результати розрахунків теплових потоків у приміщеннях, у віднесенні до $Q_p=0,740$ кВт, що відповідає розрахунковим даним, наведено на рис.2.



■ за фактичними даними ■ при утепленні з 9 по 4 поверх ▨ при утепленні з 1 по 12 поверхи

а) при зовнішній температурі повітря -18°C



■ за фактичними даними
 ■ при "клаптиковому" утепленні з 9 по 4 поверхи
 ▨ при комплексному утепленні

б) при зовнішній температурі повітря 0°C

Рисунок 2 – Відносні теплові потоки ОП, які розташовані на різних поверхах в залежності від виду утеплення

При фактичних температурі подачі та витраті теплоносія відносне значення теплового потоку від ОП при $t_3 = -18^\circ\text{C}$ складає від 0,724 до 0,700 (рис. 2,а). За умови «клаптикового» утеплення цей потік зменшується від 0,718 до 0,655 на 9-му поверсі і від 0,707 до 0,647 – на 4-му. Тепловий потік у випадку комплексного утеплення – 0,665 ... 0,646.

Для середніх температур опалювального сезону відносне значення фактичного теплового потоку ОП майже не змінюється на першому поверсі в порівнянні з 12-м і становить 0,386 (рис. 2,б). При «латковому» утепленні спостерігається зменшення теплового потоку з 9 по 4 поверхи (0,355) і збільшення на нижніх поверхах – 0,389. При комплексному утепленні відбувається зниження теплового потоку на 8% в порівнянні з фактичними даними (0,357).

Аналогічний аналіз проводився для температур повітря в приміщеннях (рис.3). За фактичними даними, отриманим при енергоаудиті об'єкту встановлено, що температура повітря в приміщеннях при ($t_3 = 0^\circ\text{C}$) в середньому становить $16,2^\circ\text{C}$. За даними розрахунків при «клаптиковому» утепленні: з 12 по 10 поверх – температура залишається незмінною; з 9 по 4 – підвищується на $2,1^\circ\text{C}$; а з 3 по 1 – зменшується на

1,9°C. У випадку комплексної модернізації спостерігається підвищення температур повітря на 2,1°C порівняно з фактичними даними на всіх поверхах (18,3°C).



Рисунок 3 – Температури повітря в приміщеннях

Висновки

В роботі проведено аналіз впливу утеплення на умови комфортності та зниження енергоспоживання в типовій багатоквартирній будівлі. Розглянуто варіанти 50 % та 100% утеплення стін. В останньому випадку для розглянутих умов спостерігається економія теплової енергії на потреби опалення 8%. Ця економія могла би бути більшою при використанні світлопрозорих елементів конструкцій з кращими теплотехнічними показниками та зменшених втратах з повітрообміном.

«Клаптикове» утеплення з 9 по 4 поверхи додатково призвело до покращення показників комфортності на 3-1 поверсі (внутрішня температура зросла всього на 0,2°C). Отримані результати можуть бути використані при визначенні розподілу загальнобудинкової вартості опалення між окремими мешканцями. «Клаптикове» утеплення призводить до зменшення споживання для утеплених квартир (8%) та збільшення споживання енергії і, відповідно, плати мешканцями нижніх поверхів (понад 1% для середніх температур зовнішнього повітря).

Перспективи подальших досліджень. Врахування в моделі теплоінерційних особливостей, можливості перетоків між суміжними приміщеннями та врахування додаткових теплонадходжень.

Список використаної літератури

1. Лавінська З., Саницька О. Соціально-екологічні аспекти енергозбереження в житлово-комунальному секторі. "GEODESY, ARCHITECTURE & CONSTRUCTION 2009" (GAC-2009), 14-16 MAY 2009, LVIV, UKRAINE. P.75-77.
2. Шовкалюк М.М., Леконцева О.Е. Розвиток програм стимулювання підвищення енергоефективності будівель в Україні / Збірник наук. праць V Міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. у м. Києві 17-12.04.2018р., с.116-117.
3. Офіційний сайт НКРЕКП (Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг), [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua>
4. ЗУ «Про особливості здійснення права власності у багатоквартирних будинках» №417-8, від 10.06.2018 р., Цивільний кодекс України ч. 2 ст. 382 в редакції Закону № 417-8, від 14.05.2015.
5. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. К.: Мінбуд України, 2017. 37 с.
6. EN 12831:2003. Heating system in buildings – Method for calculation of the design heatload. – CEN. – European Committee for Standardization. – 2003.
7. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні [Уведений вперше; чинний від 2015.01.01]. К. Мінрегіонбуд України, 2016. 205 с.
8. ДБН В.2.6-31:2006. Конструкції будинків та споруд. Теплова ізоляція будівель [На заміну СНиП П-3-79; чинний від 2007.04.01]. К.: Мінбуд України, 2006. 64 с.

В.И. Дешко, д-р техн. наук, проф., **ORCID** 0000-0002-8218-3933

И.Ю. Белоус, ассистент, **ORCID** 0000-0002-6640-103X

А.Э. Максименко, аспирант, **ORCID** 0000-0003-4099-2772

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

АНАЛИЗ ТОЧЕЧНОЙ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ТЕРМОСАНАЦИИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МНОГОКВАРТИРНОГО ЖИЛОГО ДОМА

Современное состояние многоквартирных жилых домов (ЖД), построенных до конца 90-х годов, требует полной или частичной модернизации и повышения энергоэффективности. При термомодернизации ЖД основное внимание уделяется: совершенствованию архитектурных и объемно-планировочных решений зданий и их помещений; повышению эффективности работы системы отопления, водоснабжения и кондиционирования воздуха; оптимальному использованию естественного освещения. Однако наиболее ответственным этапом энергосбережения является термосанация наружных ограждающих конструкций.

Следует отметить, что влияние утепления на отопление требует дополнительного изучения. При этом рациональным может быть сочетание экспериментального определения условий комфортности с математическим моделированием тепловых процессов в конструкции здания и системе отопления. Исходя из этого, в работе проведен анализ влияния комплексного и «лоскутного» утепления на температурные условия отдельных помещений и режимов системы отопления при эксплуатации типовых многоквартирных домов.

Ключевые слова: тепловая нагрузка, расход теплоносителя, многоквартирные дома, точечная модернизация, условия комфортности, система отопления.

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

I. Bilous, TF, **ORCID** 0000-0002-6640-103X

A. Maksymenko, Ph.D. student, **ORCID** 0000-0003-4099-2772

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

ANALYSIS OF DOMESTIC INDIVIDUAL THERMOSANATION OF DIFFERENT STRUCTURES OF MULTI-APARTMENT RESIDENTIAL BUILDINGS

The current state of multi-apartment residential buildings built up to the end of the 1990s requires full or partial modernization and a significant increase in energy efficiency. At the thermo-modernization of the housing stock, the main attention is paid to: improvement of architectural and bulk-planning decisions of buildings and their premises; increase of efficiency of the heating system, water supply and air conditioning; optimal use of natural light. However, the most important stage of energy conservation is the thermal sensing of external enclosing structures.

There are two types of insulation: complex and "shred" ("patchy"). Most of the mistakes that lead to a decrease in the heat-shielding properties and operational reliability of the insulated constructions are due to the "shred" insulation. When doing such insulation, residents increase the comfort conditions in the apartment, but if the apartment doesn't have a heat meter and the possibility of regulating its consumption - it will not affect the payment for heating. It should be noted that the effect of insulation on the heating needs to be further studied. At the same time, a combination of experimental determination of comfort conditions with mathematical modeling of thermal processes in the construction of a building and heating system can be rational. Proceeding from this, in the work the analysis of the influence of complex and "shred" insulation on the temperature conditions of separate premises and modes of heating system during operation of typical multi-apartment buildings has been carried out.

Keywords: heat load, heat transfer volume, multi-apartment residential buildings, point modernization, comfort conditions, heating system.

References

1. Lavinska Z., Sanytska O. Cotsialno-ekolohichni aspekty enerhozberezhennia v zhytlovo-komunalnomu sektori. "GEODESY, ARCHITECTURE & CONSTRUCTION 2009" (GAC-2009), 14-16 MAY 2009, LVIV, UKRAINE. P.75-77.
2. Shovkaliuk M.M., Liekontseva O.E. Rozvytok prohram stymuliuvannia pidvyshchennia enerhoefektyvnosti budivel v Ukraini / Zbirnyk nauk. pratsV Mizhnar. nauk.-tekhn. ta navch.-metod. konf. u m. Kyievi 17-12.04.2018r., s.116-117.
3. Ofitsiyni sait NKREKP (Natsionalna komisiia, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuivannia u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh), [Elektroni resurs]. - Rezhym dostupu: <http://www.nerc.gov.ua>
4. ZU «Pro osoblyvosti zdiisnennia prava vlasnosti u bahatokvartyrnykh budynkakh» №417-8, vid 10.06.2018 r., Tsyvilnyi kodeks Ukrainy ch. 2 st. 382 v redaktsii Zakonu № 417-8, vid 14.05.2015.
5. DBN V.2.6-31:2016. Teplova izoliatsiia budivel. K.: Minbud Ukrainy, 2017. 37 s.
6. EN 12831:2003. Heating system in buildings – Method for calculation of the design heatload. – CEN. – European Committee for Standardization. – 2003.
7. DSTU B A.2.2-12:2015. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pry opalenni, okholodzhenni, ventyliatsii, osvitlenni ta hariachomu vodopostachanni [Uvedenyi vpershe; chynnyi vid 2015.01.01]. K. Minrehionbud Ukrainy, 2016. 205 s.
8. DBN V.2.6-31:2006. Konstruktsii budynkiv ta sporud. Teplova izoliatsiia budivel [Na zaminu SNyP II-3-79; chynnyi vid 2007.04.01]. K.: Minbud Ukrainy, 2006. 64 s.

Надійшла 20.01.2019

Received 20.01.2019

УДК 621.383.51

А.А. Хотян, магістр, ORCID 0000-0003-1676-0752

В.П. Розен, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-0440-4251

О.В. Чермалих, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-8609-7525

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

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

Дана стаття присвячена ефективності розвитку сонячної енергетики як альтернативного джерела енергії. У роботі розглянуто питання визначення чинників впливу на підвищення енергоефективності використання фотоелектричних модулів під час їхньої експлуатації. Наведено комплекс вимог до сучасних фотоелементів і панелей з них, сонячних енергетичних установок та сонячних електростанцій в цілому. Структуровано перелік основних факторів, що впливають на ефективність роботи сонячних панелей. До основних чинників впливу віднесені: конструкція та експлуатація, рівень інсоляції, рівень освітлення, втрати. Використано і поєднано сучасні методи аналізу для отримання адекватних результатів, які застосовуються в економіці. В літературному аналізі факторів впливу на роботу фотоелемента визначено 16 факторів, з яких до основних увійшли: кут падіння сонячних променів на модуль, якість фотоелектричного елемента, рівномірність освітлення, приріст температури фотоелемента, відбиття світлового променя від поверхні перетворювача, забруднення модуля, забруднення атмосфери. Для аналізу використано діаграму Ісікави та принцип Парето. Наведено стратегічні напрямки необхідні для розвитку і поширення енергетичних інновацій в Україні у довгостроковій перспективі.

Ключові слова: сонячна енергія, енергетика, сонячні батареї, діаграма Ісікави, діаграма Парето, фактори, ефективність використання.

Вступ

Сонячна енергетика є одним з перспективних напрямків відновлювальної енергетики, заснованих на безпосередньому використанні сонячного випромінювання з метою отримання енергії для опалення, електропостачання та гарячого водопостачання.

Сонце - невичерпне, екологічно безпечне і дешеве джерело енергії. Як заявляють експерти[1], кількість сонячної енергії, яка надходить на поверхню Землі протягом тижня, перевищує енергію всіх світових запасів нафти, газу, вугілля та урану. Причому, сонячна енергетика є «чистою» і тому не спричиняє негативного впливу на екологію планети.

Сонце забезпечує нас в 10 000 разів більшою кількістю безкоштовної енергії, ніж фактично використовується у всьому світі. Тільки на світовому комерційному ринку купується і продається трохи менше 85 трильйонів кВт • год енергії на рік [1]. Оскільки неможливо простежити за всім процесом в цілому, не можна з упевненістю сказати, скільки некомерційної енергії споживають люди (наприклад, скільки деревини і добрива збирається і спалюється, яка кількість води використовується для виробництва механічної або електричної енергії). Вважається, що така некомерційна енергія становить одну п'яту частину усієї використовуваної енергії. Але навіть якщо це так, то загальна енергія, споживана людством протягом року, становить лише приблизно одну семитисячну частину сонячної енергії, що потрапляє на поверхню Землі за той самий період.

У розвинених країнах, наприклад, в США, споживання енергії становить приблизно 25 трильйонів кВт • год на рік, що відповідає більш ніж 260 кВт • год на людину за день [1].

Аналіз попередніх досліджень та публікацій. Сучасні сонячні фотоелементи і панелі з них, сонячні енергетичні установки, сонячні електростанції повинні задовольняти комплексу вимог. Ось основні з них[2,5]:

- висока надійність при терміні експлуатації до 30 років;
- доступність сировини і можливість організації масового виробництва;
- прийнятні терміни окупності інвестицій на створення сонячних електростанцій;
- мінімальні витрати на експлуатацію та технічне обслуговування геліоенергетичних потужностей;
- висока ефективність роботи.

Мета статті. Підвищення рівня енергоефективності використання фотоелектричних сонячних модулів, шляхом запропонування перспективних напрямків розвитку сонячної енергетики.

Постановка завдання. Необхідно визначити фактори, що впливають на ефективність використання сонячних панелей, виявити головні чинники, які спричиняють найзначніший внесок до вирішення проблеми.

Матеріал і результати досліджень. На ефективність фотоелементів і сонячних панелей з них впливають цілий ряд факторів. У числі основних факторів, які мають переваги і недоліки:

- одна з головних переваг енергії Сонця - це відсутність плати за неї. Сонячні панелі виробляються з використанням кремнію, запасів якого необмежені;
- процес перетворення енергії відбувається без шуму, шкідливих викидів і відходів, впливу на навколишнє середовище.
- безпека і надійність: устаткування служить до 30 років, після 20–25 років використання фотоелементів відбувається зниження генерації електричної енергії на 20 відсотків;
- сонячні панелі повністю переробляються і можуть бути знову використані у виробництві;
- простота обслуговування: устаткування досить просто встановлюється і працює в автономному режимі;
- адаптовані для використання в приватних будинках;
- добре інтегруються в якості допоміжних систем енергопостачання.
- ефективність залежить від часу доби і погоди. Нерентабельно використовувати в високих широтах;
- потрібно акумулювати перетворену енергію;
- первинні капіталовкладення високі. Особливо це відчутно для звичайних споживачів при купівлі обладнання для приватного будинку;
- періодично потрібно очищати панелей від забруднення;
- для розміщення панелей потрібна велика площа.

Класифікація факторів, за якими доцільно проводити оцінку ефективності використання сонячних батарей, можна встановити за результатами побудови діаграми Ісікави (рис. 1) [3].



Рисунок 1– Діаграма Ісікави ефективності роботи сонячних батарей

Пояснення до схеми:

1. Конструкція та експлуатація:

1.1 - Форма фотоелемента; 1.2 - ККД модуля; 1.3 - Якість фотоелектричного елемента; 1.4 - Температура фотоелемента; 1.5 - Термін експлуатації 30-50 років; 1.6 - Кваліфікація обслуговуючого персоналу; 1.7 - Зниження показників ефективності з плином часу;

2. Рівень інсоляції:

2.1 - Географічне розташування; 2.2 - Клімат; 2.3 - Пору року; 2.4 -Висота над рівнем моря; 2.5 -Зміна дня і ночі; 2.6 - Кількість сонячних днів у році; 2.7 - Погодні умови; 2.8 - Хмарність;

3. Рівень освітлення:

3.1 - Рівномірність освітлення; 3.2 - Кут нахилу СБ; 3.3 - Спосіб кріплення СБ; 3.4 - Просторова орієнтація СБ; 3.5 - Відбивна здатність СБ; 3.6 -Час використання при Мах, міні освітленості; 3.7 - Запиленість повітря; 3.8 - Затінення від будівель, дерев та ін.; 3.9 - Забруднення;

4. Втрати:

4.1 - Проходження частини випромінювання через ФЕП без поглинання; 4.2 - Відбивання оптичного випромінювання від поверхні перетворювача; 4.3 - Втрати у провідниках; 4.4 - Втрати на нагрів панелі; 4.5 - Розсіювання на теплових коливаннях напівпровідникової ґратки надлишкової енергії фотонів (ріст температури); 4.6 - Не повне освітлення активної площі, що передбачає роботу на додатково створене власне навантаження та відповідно появу додаткового внутрішнього опору ;

Діаграма дає можливість виявити ключові взаємозв'язки між різними факторами та достеменно зрозуміти досліджуваний процес. Діаграма сприяє визначенню головних чинників, які спричиняють найзначніший внесок до проблеми, що розглядається, та дає наглядну картину для попередження або усунення їх дії.

За результатами аналізу та експертної оцінки факторів, якими оцінюється робота та ефективність фотоелемента, встановлюємо перелік основних параметрів, на які ми маємо змогу впливати, та ті, на які ми практично не спроможні вплинути.

Впорядкуємо перелік факторів на які має змогу впливати безпосередньо людина у їхній пріоритетності (табл.1).

Таблиця 1 – Перелік факторів впливу на роботу фотоелемента.

Причина	Оцінка в балах (40 max)
Кут падіння сонячних променів на модуль [5,6]	40
Якість фотоелектричного елемента [8]	38
Рівномірність освітлення [5,6]	35
Приріст температури фотоелемента [5,6]	33
Відбиття світлового проміння від поверхні перетворювача [5,6]	29
Забруднення модуля [5,8]	28
Забруднення атмосфери (смог, дим від пожежі) [5]	25
Затінення жорстке [10]	23
Затінення м'яке [10]	22
Втрати у провідниках [10]	18
Втрати на нагрівання провідників [10]	17
Географічне розташування встановлення СБ [10]	16
Проходження частини випромінювання через ФЕП без поглинання [10]	15
Відбивання оптичного випромінювання від поверхні перетворювача [10]	14
Розсіювання на теплових коливаннях напівпровідникової ґратки надлишкової енергії фотонів (ріст температури) [10]	13
Не повне освітлення активної площі, що передбачає роботу на додатково створене власне навантаження та відповідно появу додаткового внутрішнього опору перетворювача [10]	12

Отже, до категорії "найвагоміших" потрапили наступні фактори, представлені у табл. 2.

Таблиця 2 – Найвпливовіші фактори на роботу фотоелемента.

Причина	Оцінка в балах (40 max)
Кут падіння сонячних променів на модуль [5,6]	40
Якість фотоелектричного елемента [8]	38
Рівномірність освітлення [5,6]	35
Приріст температури фотоелемента [5,6]	33
Відбиття світлового проміння від поверхні перетворювача	29
Забруднення модуля	28
Забруднення атмосфери (смог, дим від пожежі)	25

Для виявлення і відокремлення найвпливовіших факторів застосуємо діаграму Парето [4]. Вона являє собою відображення закону Парето (принцип 80/20), кумулятивної залежності розподілу певних ресурсів або результатів від великої сукупності (вибірки) причин.

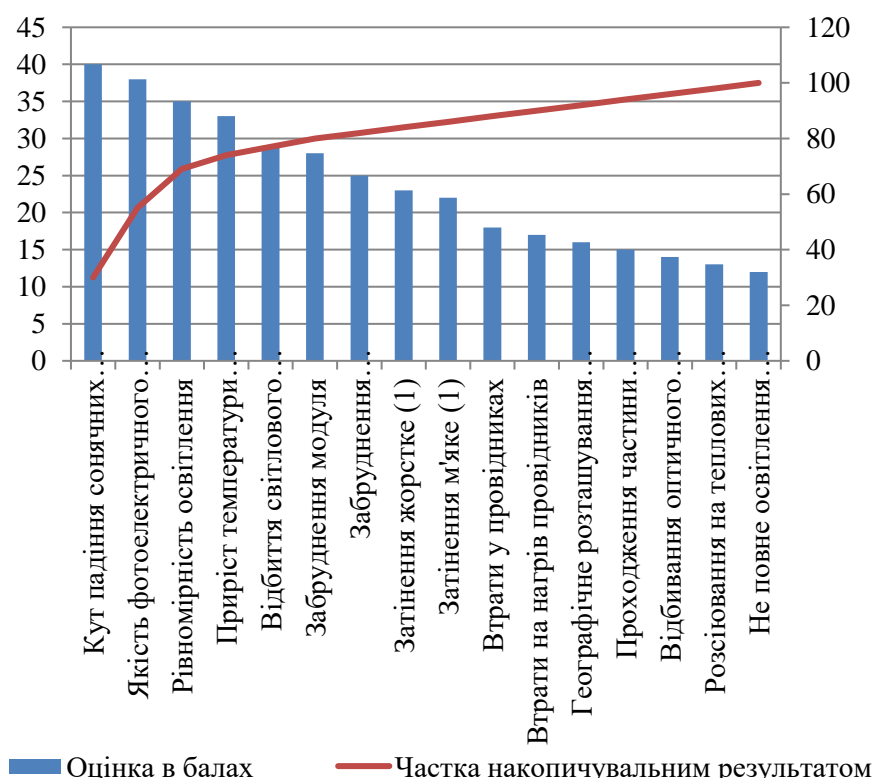


Рисунок 2 – Діаграма Парето (Принцип 80/20)

За допомогою діаграми (рис. 2) ми можемо розглянути, які чинники мають найбільший вплив на енергоефективність використання сонячного модуля.

Її основні особливості:

Кожен вертикальний стовпчик гістограми являє собою вагомий чинник, який оцінений від 0 до 40 та відкладається по лівій осі.

Графік у вигляді лінії являє собою частку з накопичувальним результатом.

На умовній межі в 80% зазвичай зображають граничну горизонтальну лінію для наочності. Всі чинники лівіше точки перетину цієї лінії з графіком накопичувального результату приносять 80% користі для покращення енергоефективності використання сонячних фотовольтаїчних установок; усі чинники правіше - решту 20%.

"Закон Парето" має величезну важливість з тієї причини, що він суперечить тому, що ми звикли вважати логічним.

Таким чином, принцип 80/20 стверджує, що диспропорція є невід'ємною властивістю співвідношення між причинами і результатами, вкладеними і отриманими засобами (коштами), зусиллями і винагородою за них.

Такий підхід до поставленої проблеми, а саме, поєднання двох вищенаведених інструментів[3,4], показує, що для підвищення енергоефективності використання сонячної енергії, за допомогою сонячного фотоелектричного модуля, рентабельно звернути увагу на такі напрямки розвитку:

- 1) Поворотні системи з системою автоматичного стеження за положенням Сонця.
- 2) Подальшу диверсифікацію щодо збільшення ККД, тобто зменшення незворотних втрат сонячної енергії в процесі взаємозв'язку сонячного світла і речовини, з якого виготовлені фотоелементи.

Також варто додати, що для підвищення ефективності роботи сонячних модулів потрібно звернути увагу на застосування спеціального контролера управління фотоелектричними системами для узгодження внутрішніх опорів, навантажень, що забезпечить оптимальний режим роботи сонячних панелей. Крім того необхідно регулярно вживати заходи з очищення поверхні сонячних батарей від пилу і бруду. Іноді поверхню сонячних панелей покривають спеціальним складом, що зменшує ступінь забруднення поверхні сонячної батареї.

Висновки

1. Виконано аналіз досліджень факторів, що впливають на ефективність використання сонячних панелей, та встановлено вимоги до них. Їхня структуризація дала змогу виявити ключові взаємозв'язки, а в

подальшому визначити головні чинники, які спричиняють найзначніший внесок до проблеми, що розглядається, шляхом побудови діаграми Ісікави.

2. Проведений аналіз дає змогу виявити найважливіші шляхи розвитку сонячної енергетики і в свою чергу також вказує важливі аспекти у подальшому її освоєнні. Під час виконання даного аналізу було використано два з семи основних інструментів вимірювання, оцінювання, контролю та покращення якості виробничих процесів, що входять до «родини інструментів контролю якості», а саме такі, як діаграма Парето та діаграма Ісікави.

В якості основного аналітичного інструменту було застосовано діаграму Ісікави, яка використовується для перегляду можливих факторів та виокремлення найважливіших причин, дія яких піддається керуванню. А також застосовано діаграму Парето, яка являє собою емпіричне правило, яке стверджує, що для багатьох явищ 80 відсотків наслідків спричинені 20 відсотками причин, оскільки ця ідея знайшла застосування у багатьох галузях.

Список використаної літератури

1. Грешкина Е.В. Методические рекомендации к самостоятельной работе студентов по дисциплине «Альтернативные источники энергии»; URL: <http://science-start.ru/ru/article/view?id=631> (дата звернення: 20.09.2018)
2. Муравьёва В. Исследование применения солнечных электростанций как альтернативного источника электроэнергии в г. Комсомольск-на-Амуре // Старт в науке. – 2017. – № 3. – С. 48-51; URL: <http://science-start.ru/ru/article/view?id=631> (дата звернення: 23.09.2018)
3. Діаграма Ісікави : [Електронний ресурс] // Вікіпедія – вільна енциклопедія. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Діаграма_Ісікави
4. Діаграма Парето : [Електронний ресурс] // Вікіпедія – вільна енциклопедія. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Діаграма_Парето
5. Солнечная энергия : [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.rea.org.ua/dieret/Solar/solar.html#PHOTOVOLTAICS>
6. Кенжаев З. Т. Преимущество и недостатки фотопреобразователей // Молодой ученый. — 2017. — №36. — С. 3-5. — URL <https://moluch.ru/archive/170/45596/> (дата обращения: 24.10.2018)
7. Кожем'яко В. П. Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики / В. П. Кожем'яко, В. Г. Домбровський, В. Ф. Жердецький, В. І. Маліновський, Г. В. Прутуляк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. - 2011. - № 2. - С. 142-157. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/oeiet_2011_2_20
8. Основні параметри сонячних панелей : [Електронний ресурс] // Кворум. – Режим доступу:<https://kwozum.com.ua/osnovni-parametri-sonjachnih-panalej>
9. Дероган Д.В., Щокін А.Р. Перспективи використання енергії та палива в Україні з нетрадиційних та відновлюваних джерел.//Бюл. "Новітні технології в сфері нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії", Київ: АТ "Укренергозбереження", 1999.- №2, - С.30-38
10. Типы Солнечных Батарей: Монокристаллические, Поликристаллические и Тонкопленочные: [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://sunalt.ru/stati/poleznoe/kak-ten-vliyaet-na-rabotu-solnechnoj-paneli.html>

A. Khotian, Master, ORCID 0000-0003-1676-0752,

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

O. Chermalykh, PhD. Sc. Science, Assoc. prof., ORCID 0000-0001-8609-7525,

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

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE USE OF PHOTOELECTRIC MODULES

This article is devoted to the efficiency of the development of solar energy as an alternative source of energy. The paper considers the issues of determining the factors influencing the energy efficiency of the use of photovoltaic modules during their exploitation. The set of requirements for modern photocells and panels from them, solar power plants and solar power stations in general is presented. A list of the main factors influencing the efficiency of solar panels is structured. The main factors of influence include: design and exploitation, level of insolation, level of illumination, losses. Modern methods of analysis are used and combined to obtain adequate results that are used in the economy. In the literary analysis of the factors of influence on the work of the photocell, 16 factors were identified, of which the main ones included: the angle of incidence of sun rays on the module, the quality of the photoelectric element, the uniformity of illumination, the increase in the temperature of the photocell, the reflection of the light beam from the surface of the converter, the pollution of the module, pollution of the atmosphere. For analysis, Ishikawa diagram and Pareto principle are used. Strategic directions are required for the development and distribution of energy innovations in Ukraine in the long run.

Keywords: solar energy, power engineering, solar panels, Ishikawa diagram, Pareto chart, factors, efficiency of use.

References

1. Greshkina E.V. Methodical recommendations for independent work of students on discipline "Alternative sources of energy"; URL: <http://science-start.ru/ru/article/view?id=631> (Last accessed: 20.09.2018)
2. Muraveva V. Research on the use of solar power plants as an alternative source of electricity in the city of Komsomolsk-on-Amur // Start in science. – 2017. – № 3. – С. 48-51; URL: <http://science-start.ru/ru/article/view?id=631> (Last accessed: 23.09.2018)
3. Ishikawa Diagram: [Electronic resource] // Wikipedia is a free encyclopedia. - Access mode: https://uk.wikipedia.org/wiki/Діаграма_Ісікаві
4. Pareto Diagram: [Electronic resource] // Wikipedia is a free encyclopedia. - Access mode: https://uk.wikipedia.org/wiki/Діаграма_Парето
5. Solar energy: [Electronic resource] - Access mode: <http://www.rea.org.ua/dieret/Solar/solar.html#PHOTOVOLTAICS>
6. Kenzhaev Z. T. The Advantage and Disadvantages of Photoconverters // Young Scientist. — 2017. — №36. — С. 3-5. — URL <https://moluch.ru/archive/170/45596/> (Last accessed: 24.10.2018)
7. Kozhemyako V.P. Analytical review of modern technologies of photovoltaic converters for solar energy / VP Kozhemyako, VG Dombrovsky, VF Zherdetsky, VI Malinovsky, GV Prytulyak // Optoelectronic information and energy technologies. - 2011. - № 2. - С. 142-157. - Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/oeiet_2011_2_20
8. Basic Parameters of Solar Panels: [Electronic Resource] // Quorum. - Access mode: <https://kwordum.com.ua/osnovni-parametri-sonjachnih-panalej>
9. Derohan D.V., A.R. Shchokin Prospects for the use of energy and fuel in Ukraine from non-traditional and renewable sources // Bül. "Advanced technologies in the field of non-traditional and renewable energy sources", Kyiv: JSC "Ukrenergosaving", 1999. - №2, - С.30-38
10. Types of Solar Batteries: Monocrystalline, Polycrystalline, and Thin Film: [Electronic Resource] - Access Mode: <http://sunalt.ru/stati/poleznoe/kak-ten-vliyaet-na-rabotu-solnechnoj-paneli.html>

Надійшла 20.11.2018

Received 20.11.2018

Б.И. Басок, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8935-4248
 Б.В. Давыденко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-8738-7612
 А.В. Тимошенко, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-6840-5491
 С.М. Гончарук, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-5609-7337
 Институт технической теплофизики НАН Украины

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОМЕЩЕНИЯ, ОБОГРЕВАЕМОГО ДВУМЯ ДВУХПАНЕЛЬНЫМИ РАДИАТОРАМИ

Представлены результаты расчетных исследований воздушно-температурного режима помещения, обогреваемого двухпанельными радиаторами в зимний период года. Исследуются особенности формирования воздушных потоков и температурных полей в помещении в зависимости от температуры радиаторов. Рассматривается помещение с двумя окнами и двумя радиаторами, установленными под окнами. Результаты получены путем численного решения системы уравнений турбулентного переноса импульса и энергии в воздушном потоке. На внутренних поверхностях помещения задаются граничные условия четвертого рода, учитывающие радиационно-конвективный теплообмен данных поверхностей с воздушной средой и радиаторами. По полученным данным построены распределения скорости и температуры в объеме помещения, а также распределения плотностей тепловых потоков по поверхности наружной стены. Из представленных результатов следует, что около наружной стены течение воздуха – опускное, а над радиатором – подъемное. В результате взаимодействия этих потоков в объеме помещения, обогреваемого двухпанельными радиаторами, образуются области циркуляционные течения воздушной среды. Вследствие этого формируется также распределение температуры в объеме помещения. Температура внутри помещения повышается в направлении от пола к потолку.

Ключевые слова: температурный режим, радиатор, численное моделирование, тепловой поток, радиационно-конвективный теплообмен.

Введение

Формирование микроклимата в помещении в зимний период года происходит в результате взаимодействия аэродинамических и теплообменных процессов, которые сопровождают перенос теплоты от нагревательных приборов в окружающее пространство через ограждающие конструкции здания. Температурный режим в помещении зависит как от эффективности нагревательных приборов, так и от теплоизолирующих характеристик ограждающих конструкций [1]. В настоящее время в качестве нагревательных устройств часто используются однопанельные или двухпанельные радиаторы. От данных устройств теплота в помещение поступает естественной конвекцией и излучением. Лучистый тепловой поток поступает от радиатора на стены, пол и потолок. Теплота конвекцией передается непосредственно воздушной среде помещения [2]. Температура радиатора влияет не только на значение средней температуры, но и на распределение скорости конвективных потоков в помещении.

Цель и задача работы состоит в численном исследовании особенностей воздушно-температурного режима помещения, обогреваемого двумя двухпанельными радиаторами, и влияния температуры радиаторов на данный режим.

Постановка задачи и результаты исследований

Особенности воздушно-температурного режима помещения, обогреваемого двухпанельными радиаторами, рассматриваются на примере комнаты с двумя окнами и двумя радиаторами, установленными под окнами. Высота помещения $H=3$ м; длина $L=5,6$ м; ширина $B=6,3$ м. Толщина внешней бетонной стены 0,24 м. Внутренние стены, пол и потолок также выполнены из бетона. Толщина внутренних стен — 0,12 м. Окна в комнате - однокамерные. Толщина стекол 3 мм. Расстояние между стеклами 60 мм. Площади панелей радиаторов 0,5 м². Ширина каждой панели 10 мм. Расстояние между панелями 100 мм. Температура панелей радиаторов $t_p = 50$ °С. Температура наружного воздуха $t_n = -10$ °С. Со стороны внешней воздушной среды задается значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_n = 23$ Вт/(м²К). Температурный режим помещения с одним окном и одним отопительным прибором рассматривался в [3].

Конвективное движение воздушной среды в помещении, возникающее за счет неравномерного распределения температуры, описывается системой уравнений динамики турбулентного течения совместно с уравнением энергии. Данная система дополняется уравнениями k - ε модели турбулентности. Температурное поле в ограждающих конструкциях описывается уравнением теплопроводности. На внутренних поверхностях помещения задаются граничные условия четвертого рода в виде.

$$-\lambda_w \frac{\partial T}{\partial n_w} \Big|_{w=0} = -\lambda_{air} \frac{\partial T}{\partial n_w} \Big|_{w=0} - \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_\delta} - 1} \int \left[\left(\frac{T_\delta}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \frac{\cos(\psi_{w-n_w}) \cdot \cos(\psi_{p-n_\delta})}{\pi r^2} dF_\delta$$

где r - расстояние между точкой на поверхности стены и точкой на поверхности радиатора, n_w - нормаль к поверхности стены, n_p - нормаль к поверхности радиатора; ψ_{w-n_w} - угол между радиусом-вектором, проведенным из точки на поверхности стены к точке на поверхности радиатора, и нормалью к поверхности стены; ψ_{p-n_p} - угол между радиусом-вектором, проведенным из точки на поверхности радиатора к точке на поверхности стены, и нормалью к поверхности радиатора; ε_w ; ε_p - степени черноты поверхностей стен и радиаторов, значения которых принимаются равными 0,8.

Представленное условие учитывает радиационный теплообмен на поверхностях стен. Предполагается, что радиационный тепловой поток поступает на внутренние поверхности помещения только со стороны радиатора. Радиационный теплообмен между самими поверхностями не учитывается. На поверхностях стекол однокамерного стеклопакета условия четвертого рода записываются в аналогичной форме. В этом случае данное выражение вместо температуры радиатора T_p будет содержать температуру поверхности противоположного стекла. Предполагается, что теплоперенос из данного помещения в соседние помещения отсутствует.

Система уравнений динамики и теплопереноса совместно с граничными условиями решается методом контрольного объема [4]. Результаты расчета полей скорости и температуры ($^{\circ}\text{C}$) в трех взаимно перпендикулярных сечениях помещения представлены на рис.1 - рис.3. Горизонтальное сечение А-А, параллельное полу, расположено от него на расстоянии 1,5 м (рис. 1). Вертикальное сечение В-В, параллельное боковым стенам, пересекает панели одного из радиаторов посередине (рис. 2). Вертикальное сечение С-С, параллельное наружной стене помещения, расположено на расстоянии 1,6 м от внутренней поверхности наружной стены (рис. 3).

Как видно из рис.1, на высоте $z=1,5$ м от пола распределение температуры близко к равномерному ($t \sim 22^{\circ}\text{C}$). Над радиаторами температура увеличивается до 24°C , а возле наружной стены понижается до 16°C .

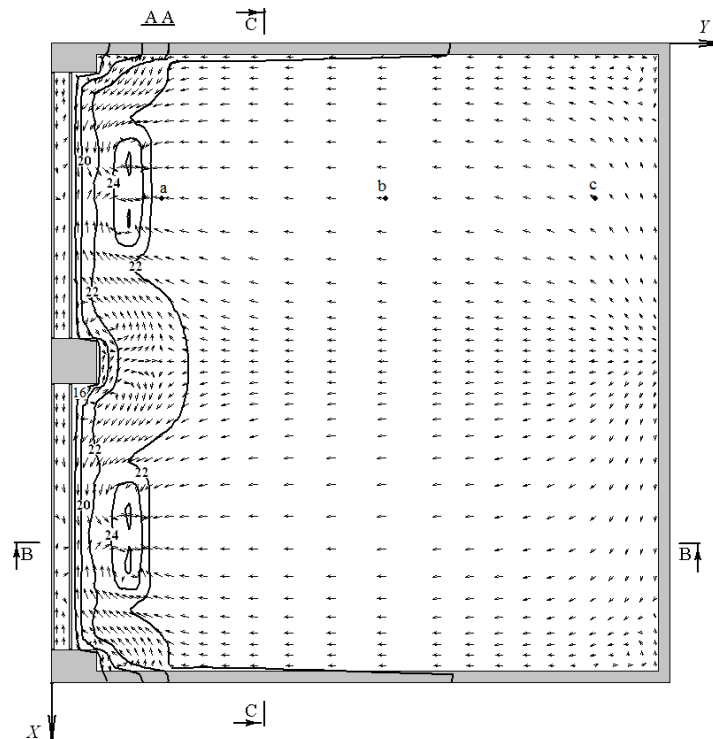


Рисунок 1 – Распределение скорости воздуха и температуры в горизонтальном сечении А-А

Из рис. 2 видно, что в верхней и нижней части помещения образуются два разнонаправленных циркуляционных течения. Около потолка циркуляция воздуха вызывается направленным вверх свободно конвективным потоком от радиатора. Около пола циркуляционное течение образуется за счет опускного течения воздуха около холодной наружной стены и окна. Указанный холодный поток распространяется на значительное расстояние от наружной стены вовнутрь помещения.

Направления воздушных потоков формируют распределение температуры по высоте помещения. Вследствие этого температура внутри помещения повышается в направлении от пола к потолку. Над полом температура изменяется от 16°C до 20°C и уменьшается по направлению к наружной стене. На высоте $z=1,5$ м температура увеличивается до 22°C . В пространство под потолком поступает нагретый воздух от радиатора. Поэтому около потолка температура составляет 24°C (рисунки 2, 3). В горизонтальных сечениях помещения распределения температуры близки к равномерным (рис. 3).

В области воздушной прослойки между оконными стеклами также имеет место подъемно - опускное течение. Поскольку внутреннее стекло имеет более высокую температуру, чем наружное, у поверхности внутреннего стекла, обращенной вовнутрь камеры стеклопакета, течение воздуха - подъемное. У более холодной поверхности наружного стекла, обращенной вовнутрь камеры стеклопакета, течение воздуха - опускное (рис. 2).

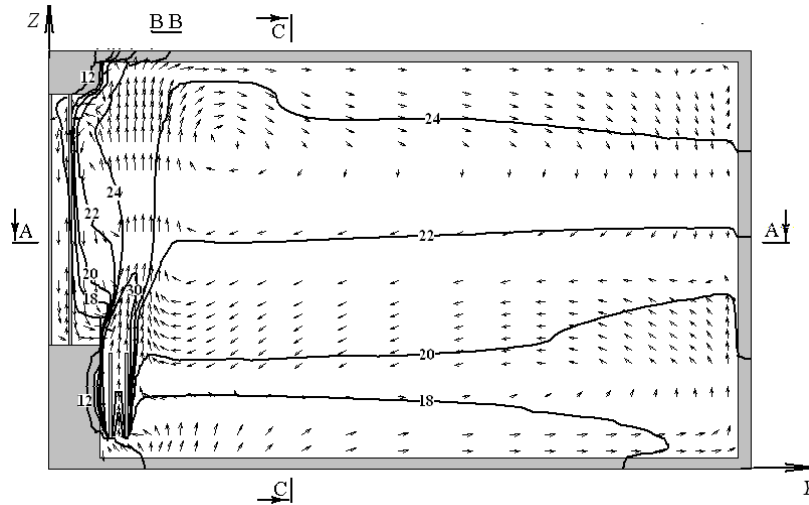


Рисунок 2 – Распределение скорости воздуха и температуры в вертикальном сечении В-В при $t_p = 50\text{ }^\circ\text{C}$; $t_n = -10\text{ }^\circ\text{C}$

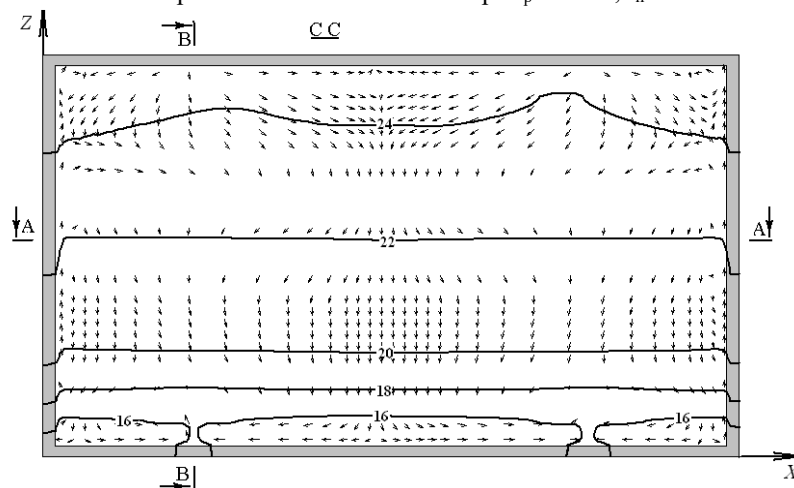


Рисунок 3 – Распределение скорости воздуха и температуры в вертикальном сечении С-С при $t_p = 50\text{ }^\circ\text{C}$; $t_n = -10\text{ }^\circ\text{C}$

Характерные особенности распределений по высоте помещения горизонтальной скорости u_y и температуры видны также из рис.4. Распределения скорости и температуры по высоте строятся по трем вертикальным линиям, расположение которых видны из рис.1. На этом рисунке точками *a*, *b*, и *c* указаны места, в которых строятся указанные распределения. Данные три точки лежат на плоскости, проходящей через середину радиатора. Как видно из рис. 4 а, максимальные положительные значения скорости u_y соответствуют нижней части вертикальной линии, проходящей через точку *a*. Эта линия располагается ближе всего к наружной стене и к окну, где происходит наиболее интенсивное опускное течение холодного воздуха. На этой же линии на расстоянии 0,2 м от пола наблюдается минимальное значение температуры $t=14\text{ }^\circ\text{C}$. На самом полу температура оказывается несколько выше ($t=16\text{ }^\circ\text{C}$) из-за влияния лучистого теплового потока от радиатора. По мере удаления от наружной стены максимальные значения скорости течения воздуха над полом уменьшаются. Становятся также менее выраженными минимальные температуры над полом. С увеличением высоты z над полом значения температуры увеличиваются. Распределения температуры вдоль линий *a*, *b* и *c*, при $z > 0,8$ м практически совпадают (рис. 4 б). На интервале $0,6\text{ м} < z < 2,4\text{ м}$ наблюдается течение воздуха в обратном направлении ($u_y < 0$). Данный характер распределения скорости по высоте соответствует наличию двух разнонаправленных вихревых потоков, о которых уже упоминалось выше.

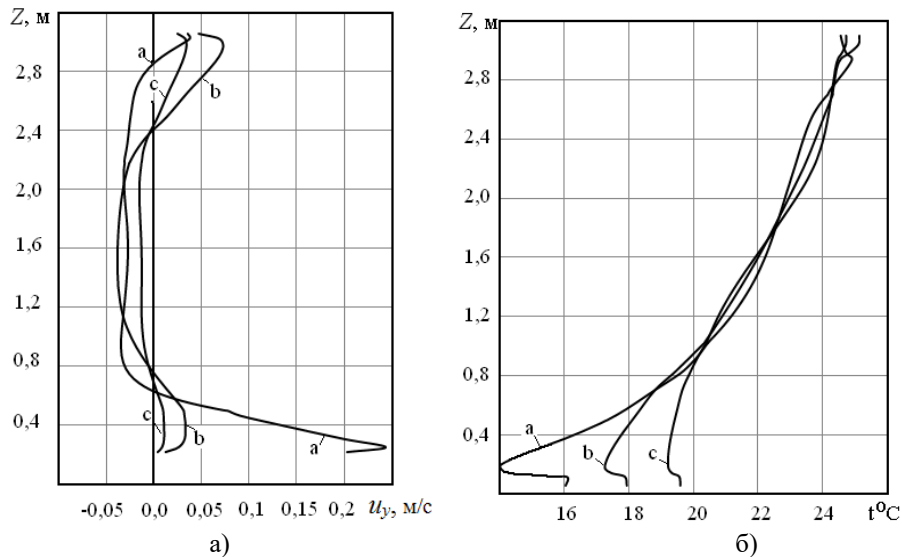


Рисунок 4 – Распределение горизонтальной скорости воздуха (а) и температуры (б) по высоте помещения

На рис.5 представлено распределение плотностей тепловых потоков по наружной поверхности внешней стены. Как видно из рисунка, под окнами в области расположения радиаторов плотности тепловых потоков превышают 100 Вт/м^2 . На наружных поверхностях окон плотности тепловых потоков увеличиваются снизу вверх. В верхней части окна их значения превышают 150 Вт/м^2 , а в нижней части окна они составляют 50 Вт/м^2 . Данная особенность теплопереноса через окно объясняется наличием подъемных и опускающих течений в газовой прослойке между стеклами [5, 6]. Над окнами плотности тепловых потоков оказываются выше 100 Вт/м^2 . Суммарные потери теплоты через наружную стену данного помещения составляют при этом $Q=1835 \text{ Вт}$.

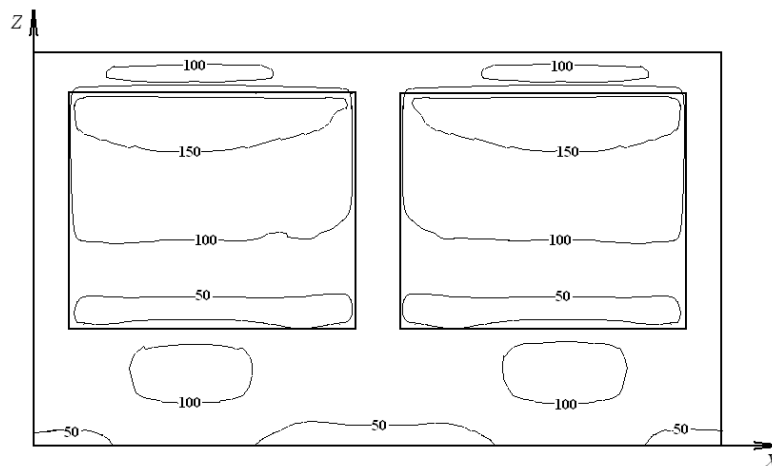


Рисунок 5 – Распределение плотностей тепловых (Вт/м^2) потоков по наружной поверхности наружной стен

Для оценки теплового режима помещения и эффективности его обогрева двумя двухпанельными радиаторами определяется значение среднеобъемной температуры воздуха в помещении. Осреднение температуры производится в той части объема помещения, которая отстоит от наружной стены на расстоянии $0,3 \text{ м}$, т.е. в той части объема помещения, в которой обычно находятся люди. Для рассматриваемого случая, при котором $t_p = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_n = -10 \text{ }^\circ\text{C}$, средняя температура в помещении составляет $t_{cp} = 21,2 \text{ }^\circ\text{C}$, что соответствует нормативным условиям для зимнего периода.

При уменьшении температуры радиатора до $t_p = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ при температуре наружного воздуха $t_n = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ температура в помещении значительно снижается. Результаты расчета распределения температуры и скорости внутри помещения при этих условиях представлены на рис. 6 и рис. 7. Как видно из данных рисунков, температура в верхней части помещения снижается при этом до $t \sim 16 \text{ }^\circ\text{C}$, а в нижней - до $t \sim 12 \text{ }^\circ\text{C}$. Средняя температура в объеме помещения уменьшается до значения $t_{cp} = 16,1 \text{ }^\circ\text{C}$, которое значительно ниже нормативного. Суммарный тепловой поток через наружную стену данного помещения составляет при этом $Q=1376 \text{ Вт}$.

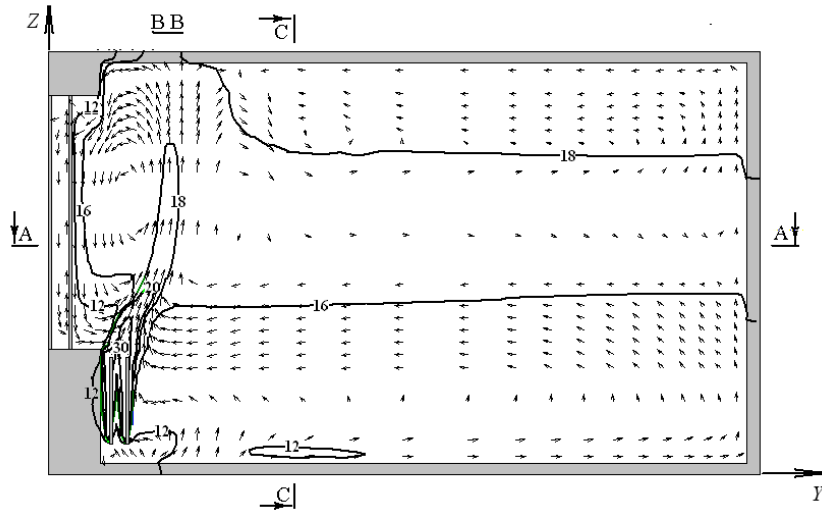


Рисунок 6 – Распределение скорости воздуха и температуры в вертикальном сечении В-В при $t_p = 40\text{ }^\circ\text{C}$; $t_n = -10\text{ }^\circ\text{C}$.

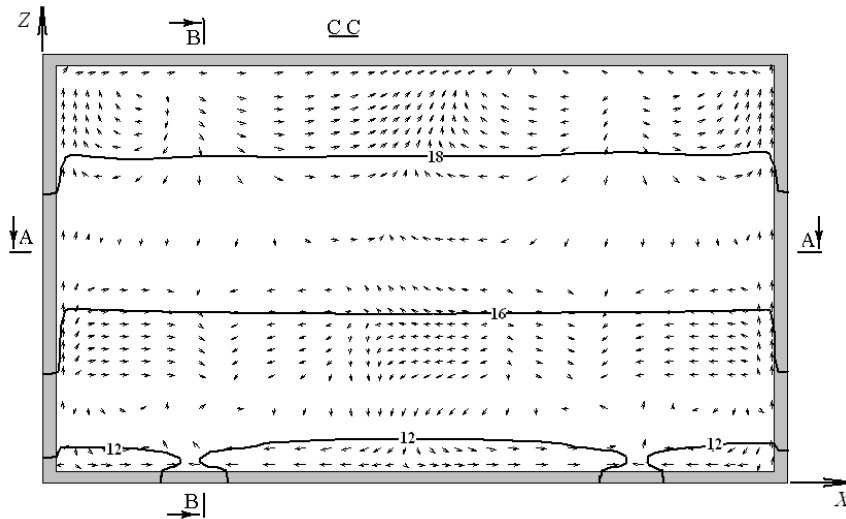


Рисунок 7 – Распределение скорости воздуха и температуры в вертикальном сечении С-С при $t_p = 40\text{ }^\circ\text{C}$; $t_n = -10\text{ }^\circ\text{C}$

Выводы

Как следует из представленных результатов, при использовании в качестве отопительных приборов двухпанельных радиаторов, распределение температуры в объеме помещения оказывается неравномерным по высоте. Возле окна и наружной стены образуется поток охлажденного воздуха, направленный вниз. Около пола данный поток распространяется вглубь помещения. Вследствие этого, нижняя часть помещения оказывается переохлажденной. Нагретый от радиатора воздух направляется вверх к потолку. Таким образом, температура в помещении увеличивается в направлении от пола к потолку. При обеспечении в помещении нормативной среднеобъемной температуры (например, $t_{cp} = 21\text{ }^\circ\text{C}$ при $t_p = 50\text{ }^\circ\text{C}$), область пространства помещения под потолком оказывается перегретой ($t \sim 24\text{ }^\circ\text{C}$). В нижней же части помещения температура оказывается на 2...3 $^\circ\text{C}$ ниже, чем среднеобъемная температура воздуха.

Поскольку рассматриваемое помещение не имеет наружного утепления, а окна в помещении - однокамерные, уменьшение температуры радиатора до $40\text{ }^\circ\text{C}$ приводит к значительному снижению среднеобъемной температуры воздуха, которая оказывается значительно ниже нормативной.

Список использованной литературы

1. Басок Б. И. Температурный режим отапливаемого помещения. Приближенная теплофизическая модель / Б. И. Басок, Б. В. Давиденко, С. М. Гончарук, О. М. Лысенко // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т.35, № 4. – С. 23-30.
2. Басок Б.И. Моделивання тепловіддачі від двохпанельного радіатора / Б.І. Басок, Б.В. Давиденко, С.М. Гончарук, В.Г. Новиков // Будівельні конструкції. – 2013. – В. 77. – С. 60-64.

3. Басок Б.И. Численное моделирование температурного режима в помещении с двухпанельным радиатором / Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, Г.Г. Фаренюк, С. М. Гончарук // Инженерно-физический журнал.- 2014.-Т.87, №6.- С. 1375 – 1379.

4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости/ Сухас Патанкар. - М., «Энергоатомиздат», 1984, 152 с.

5. Басок Б.И. Численное моделирование теплопереноса через двухкамерный стеклопакет/ Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, С.А. Исаев, С.М. Гончарук, Л.Н. Кужель // Инженерно-физический журнал.- 2016.- Т.89, № 5. - С. 1288-1295.

6. Басок Б. І. Експериментальні дослідження теплопередачі через енергоефективні склопакети з низькоемісійним м'ягким покриттям / Б. І. Басок, Б. В. Давиденко, Л. М. Кужель, С. М. Гончарук, Т. Г. Беляєва.// Промислова теплотехніка.- 2017.- Т. 39, №1. - С.41–48.

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

Б.В. Давиденко, д-р техн. наук, проф., **ORCID** 0000-0001-8738-7612

А.В. Тимошенко, канд. техн. наук, **ORCID** 0000-0001-6840-5491

С.М. Гончарук, канд. техн. наук, **ORCID** 0000-0002-5609-7337

Інститут технічної теплофізики НАН України

ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ ПРИМІЩЕННЯ, ЩО ОБІГРІВАЄТЬСЯ ДВОМА ДВОХПАНЕЛЬНИМИ РАДІАТОРАМИ

Представлені результати розрахункових досліджень повітряно-температурного режиму приміщення, що обігрівається двоохпанельний радіаторами в зимовий період року. Досліджуються особливості формування повітряних потоків і температурних полів в приміщенні в залежності від температури радіаторів. Розглядається приміщення з двома вікнами і двома радіаторами, встановленими під вікнами. Результати отримані шляхом чисельного розв'язання системи рівнянь турбулентного перенесення імпульсу та енергії повітряним потоком. На внутрішніх поверхнях приміщення задаються граничні умови четвертого роду, що враховують радіаційно-конвекційний теплообмін даних поверхонь з повітряним середовищем і радіаторами. За отриманими даними побудовані розподілу швидкості і температури в об'ємі приміщення, а також розподіли густини теплових потоків по поверхні зовнішньої стіни. З наведених результатів випливає, що біля зовнішньої стіни рух повітря - опускний, а над радіаторами - підйомний. В результаті взаємодії цих потоків в об'ємі приміщення, що обігрівається двоохпанельними радіаторами, утворюються області циркуляційної течії повітряного середовища. Внаслідок цього формується також розподіл температури в об'ємі приміщення. Температура всередині приміщення підвищується в напрямку від підлоги до стелі.

Ключові слова: температурний режим, радіатор, чисельне моделювання, тепловий потік, радіаційно-конвекційний теплообмін.

B. Basok, Doct. Tech. Sc., **ORCID** 0000-0002-8935-4248

B. Davydenko, Doct. Tech. Sc., **ORCID** 0000-0001-8738-7612

A. Timoshchenko, Cand. Tech. Sc., **ORCID** 0000-0001-6840-5491

S. Goncharuk, Cand. Tech. Sc., **ORCID** 0000-0002-5609-7337

Institute of engineering thermophysics

TEMPERATURE REGIME OF THE ROOM, HEATED BY TWO TWO-PANE RADIATORS

The results of computational studies of the air and temperature regime of a room heated by two-pane radiators in the winter period of the year are presented. The features of the air flow and temperature fields' formation in the room, depending on the temperature of the radiators, are researching. A room with two windows and two radiators installed under the windows is considered. The results were obtained by numerical solution of the system of equations for the turbulent transfer of momentum and energy in airflow. On the inner surfaces of the room the boundary conditions of the fourth kind, which taking into account the radiation - convective heat transfer of these surfaces with the air medium and radiators are set. According to the data obtained, the distribution of velocity and temperature in the volume of the room, as well as the distribution of the heat fluxes densities on the surface of the outer wall were constructed. From the presented results it follows that near the outer wall the air flow is downward, and above the radiator - upward. As a result of the interaction of these flows in the volume of the room, heated by two-pane radiators, areas of circulating air flow are formed. Also due to this temperature distribution is formed in the room area. Temperature inside the room increases from the floor to the ceiling.

Keywords: temperature regime, radiator, numerical simulation, heat flux, radiation-convective heat transfer.

References

1. Basok B.I. Temperature Regime of the Heated Room. An Approximate Thermophysical Model / B.I. Basok, B.V. Davydenko, S.M. Goncharuk, O.N. Lysenko // *Promyshlennaya teplotekhnika.* – 2013. – V. 35, № 4, P. 23–30.
2. Basok B.I. Modeling of Heat Transfer From a Two-Panel Radiator / B.I. Basok, B.V. Davydenko, S.M. Goncharuk, V.G. Novikov // *Building constructions.*- 2013.- Is. 77. – P 60-64.
3. Basok B. I. Computational Modeling of the Temperature Regime in a Room with a Two-Panel Radiator/ B. I. Basok, B. V. Davydenko, G. G. Farenuyk, S. M. Goncharuk // *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal.* - 2014, V. 87, No 6, P. 1375 – 1379.
4. Patankar S. . Numerical Heat Transfer and Fluid Flow/ Suhas Patankar.-M.: Energoatomizdat, 1984, 152 p.
5. Basok B. I. Numerical Modeling of Heat Transfer Through a Triple-Pane Window/ B. I. Basok, B. V. Davydenko, S. A. Isaev, S. M. Goncharuk, L. N. Kuzhel'// *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal.*- 2016.- V. 89, No 5, P. 1288-1295
6. Basok B.I. Experimental Studies of Heat Energy Efficient Glass Units with Low Soft Surface/ B.I. Basok, B.V. Davydenko, L.M. Kuzhel, S.M. Goncharuk, T.G. Belyaeva // *Promyshlennaya teplotekhnika.*- 2017.- V. 39, No 1. - P.41–48.

Надійшла 15.02.2019
Received 15.02.2019

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.311.153.2.001.24

О.И. Александров, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-5608-8131

Белорусский государственный технологический университет

Д.О. Иванько, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0002-4348-6624

Норвежский университет науки і техніки

Т.Е. Жуковская, аспирант,

Белорусский национальный технический университет

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ ДЛЯ ОЦЕНКИ СУЩЕСТВОВАНИЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

При вариации режимных параметров электроэнергетическая система (ЭЭС) может переходить из одного равновесного состояния в другое. Исследование нестационарных режимов сложной ЭЭС сводится к решению систем уравнений переходных процессов. Вариация активных или пассивных режимных параметров энергосистемы в момент возникновения различных нестационарных процессов зависит от динамики процессов в рассматриваемой системе и ведет к изменению равновесных состояний самой энергосистемы. При этом вызывает определенный интерес в изучении плавного перехода количественных величин в качественное изменение поведения системы. В статье сформулирован подход и аналитический метод, позволяющий выполнить оценку активных параметров, опасных по условию существования режимов в сложной ЭЭС. Рассматриваются области устойчивости ЭЭС, которые отражают состояние энергетического баланса, определяемого многообразием скачкообразных изменений (бифуркаций). Математической основой для исследования данных процессов применялись элементы теории катастроф (ТК). Сама проблема принятия решений может быть сформулирована в виде задачи составления оптимального суточного графика отключений, которая представляет собой многокритериальную задачу математического программирования с большим количеством ограничений топологического, организационно-технологического и режимного характера.

Ключевые слова: энергосистема, устойчивость, переходные процессы, теория бифуркаций, катастрофы, параметры режима, топология, особые точки, однопараметрическое семейство функций.

Введение.

При решении многих задач электроэнергетики часто возникает необходимость расчета установившегося режима (УР), т.е. необходимость определения управляемых режимных параметров в зависимости от топологии электрической схемы и нагрузок узлов основной сети. Расчет совокупности уравнений УР представляет собой сложную задачу, так как зиждется на недостаточно достоверной прогнозируемой информации, кроме того, часто отсутствует гарантия сходимости итерационных процессов и получения однозначных результатов. Основные вычислительные трудности при автоматизации решения этой задачи обусловлены необходимостью многократной проверки режимных ограничений. Поэтому процесс решения целесообразно разбить на два этапа. Вначале определяется оптимальный суточный график отключений без учета режимных ограничений, а затем проводится их проверка и соответствующая коррекция этого графика.

Для преодоления указанных трудностей целесообразно применять специальные приемы решения совокупности уравнений, соответствующих хронологической последовательности режимов за рассматриваемый отрезок времени. В качестве эффективного метода для исследования указанных задач могут быть использованы принципы ТК [1,2]. Имеется ряд приложений этих методов в дифференциальной геометрии, квантовой механике, термодинамике, теоретической электротехнике и т.д. В электроэнергетике инженерное приложение соответствующих методов теории катастроф рассмотрено, прежде всего, в работе [3], затем очень интересные решения были изложены в работах [4-7]. В данной статье приводится методика расчета совокупности физически реализуемых (устойчивых) режимов, определяемых с учетом переменной топологии и нагрузок узлов сети в плане суточного графика ЭЭС.

Исследования нестационарных режимов сложной ЭЭС сводятся к решению систем уравнений переходных процессов (ПП). Вариация активных или пассивных режимных параметров энергосистемы в момент возникновения различных нестационарных процессов ведет к изменению равновесных состояний самой энергосистемы. При этом вызывает определенный интерес в изучении плавного перехода количественных величин в качественное изменение поведения системы. В статье сформулирован подход и аналитический метод, позволяющий выполнить оценку активных параметров, опасных по условию существования режимов сложной ЭЭС.

При решении задач краткосрочного планирования режимов ЭЭС в составе АСДУ часто возникает необходимость расчета УР, соответствующих моментам изменения нагрузок узлов основной сети, управляемых режимных параметров, схем вариационных коммутаций электрических соединений. Сложность достоверной оценки параметров указанной совокупности УР объясняется громоздкостью расчета каждого отдельного режима, не единственностью решений уравнений УР, отсутствием гарантии сходимости итерационного процесса, неточностью прогнозирования суточных графиков нагрузок узлов основной сети. Для преодоления этих трудностей целесообразно изыскать специальные приемы решения совокупности уравнений, соответствующих хронологической последовательности режимов на рассматриваемые сутки.

Постановка задачи и ее формализация. Методы ТК позволяют определить местонахождение всех вырожденных, критических точек энергетических функций, которые описывают качественные изменения в поведении системы (бифуркации положений равновесия, изменение количества и типа критических точек при варьировании управляющих параметров). Сама проблема обычно описывается с помощью определенного числа уравнений, связывающих совокупность зависимых и независимых переменных, вариация которых формирует равновесное состояние исследуемого процесса. Состояние равновесия можно рассматривать как поверхность определенного числа измерений в пространстве управляющих параметров при скачкообразном их изменении. При этом управляемая система переходит в другое равновесное состояние, определяемое совокупностью режимных ограничений, позволяя найти их предельные значения. В глобальном смысле проблема сводится к исследованию устойчивости нелинейных систем.

В качестве примера можно рассмотреть, явление неустойчивости состояний равновесия в простейшей феррорезонансной цепи на падающем участке вольт–амперной характеристики (рис.1). При определенном сочетании параметров для одного и того же напряжения схема имеет три стационарных состояния, два из которых устойчиво, а одно (на падающем участке ВАХ) неустойчиво [1]. Даже для такой схемы вопрос существования режима и определения его устойчивых состояний не всегда очевиден и однозначен. Решение находят обычно путем упрощающих допущений, чаще всего, путем линеаризации. Адекватная математическая модель такой системы представляет собой дифференциальное уравнение, в котором нелинейный элемент представлен в виде кусочно–линейных аппроксимаций. Процедура поиска стационарного решения для такой задачи заключается в поиске смены условий кусочно–линейных аппроксимаций ВАХ нелинейного элемента.

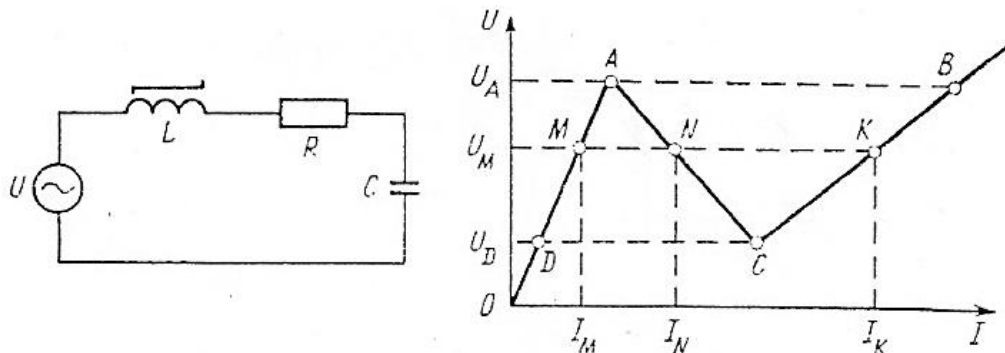


Рисунок 1 – Схема последовательной R–L–C цепи с нелинейной индуктивностью и ее вольт–амперная характеристика

Таким образом, в соответствии с первым методом Ляпунова сначала выбирается математическая модель системы, затем осуществляется ее линеаризация в точке равновесия и исследуется известными методами на устойчивость уже линейная система, относя к исходной, нелинейной, допуская их динамическое сродство в окрестности малых отклонений переменных [2]. Кроме указанного примера определенный интерес представляет пример исследования переходных процессов в динамической системе «источник питания–электрическая дуга», когда возгорание дуги возникает при плавном нарастании тока, и устойчивых режимах горения устанавливается при определенных условиях перехода количественных величин в качественное состояние устойчивого процесса горения дуги [3]. Здесь на первый план выходят такие свойства этой системы, как нелинейность и диссипативность, которые проявляются в виде бифуркаций движения динамической системы в фазовой плоскости и появления автоколебаний в автономных системах.

Поведение любой динамической системы можно измерить переменными x, y, z, \dots и которая «управляется» другим набором переменных a, b, c, \dots . Переменные x, y, z, \dots – это координаты пространства поведения (внутренние переменные). Поведение системы задается ее потенциалом (или энергией) $W = (x, y, z, \dots; a, b, c, \dots)$, подчиненный лишь таким условиям, которые позволяют применить к функции W операции дифференциального и интегрального исчисления. В ТК доказано, что все события в физическом мире можно

описывать при помощи четырех переменных; трех пространственных координат и одной переменной. Поэтому, если иметь в виду физические применения, достаточно ограничиться 4-мерным пространством управления. Кроме того доказано, что в динамической системе с четырьмя внешними переменными могут встретиться ровно 7 типологически различных типов скачка, т.е., по сути дела, любое физическое нарушение непрерывности относится к одному из 7 типов. Эти 7 типов получили название элементарных катастроф [4]:
Таблица 1 – Поведение системы

Название	Потенциал W
Морщина	$\frac{1}{3}x^3 + ax$
Складка	$\frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2 + bx$
Ласточкин хвост	$\frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{3}ax^3 + \frac{1}{2}bx^2 + c$
Бабочка	$\frac{1}{6}x^6 + \frac{1}{4}ax^4 + \frac{1}{3}bx^3 + \frac{1}{2}cx^2 + d$
Гиперболическая омбилика	$x^3 + y^3 + ax + by + cxy$
Эллиптическая омбилика	$x^3 - 3xy^2 + ax + by + c(x^2 + y^2)$
Параболическая омбилика	$x^2y + y^4 + ax + by + cx^2 + dy^2$

Методы и представления ТК наиболее применимы к таким системам, действительное состояние которых может быть определено в точке фазового пространства минимумом некоторой энергетической функции, или функции Ляпунова. Такой подход к анализу состояния равновесия системы осуществим, когда эта функция может быть приведена к каноническому виду одной из семи элементарных катастроф. Предположим, что система имеет плавную потенциальную функцию для описания динамики и имеет n переменных состояния и m параметров контроля. В соответствии с ТК количество различных качественных конфигураций разрывов, которое может возникнуть, зависит не от количества переменных состояния, а от количества параметров контроля. Т. е., если количество параметров контроля не больше четырех, тогда существует 7 основных или элементарных катастроф, и ни одна из них не включает более двух переменных состояния.

Качественные изменения в поведении системы (бифуркация положений равновесия, изменение количества и типа критических точек при варьировании управляющих параметров) описываются встречаемыми вырожденными, критическими точками энергетической функции. Метод ТК позволяет определить местонахождение всех вырожденных точек и получить их геометрическую интерпретацию.

Считаются известными дискретные моменты времени $t_i, I = \overline{1, N}$, периода планирования $T = [t_1, t_{N+1}]$, в которые происходят изменения схемы основной сети ЭЭС и (или) режимных параметров. Для каждого момента времени предполагаются заданными: схема сети, прогнозы активных и реактивных мощностей потребителя в узлах, коэффициенты трансформации трансформаторов, управляемые режимные параметры в узлах примыкания к сети электрических станций (ЭС) или энергорайонов (ЭР), содержащих ЭС.

Таким образом, определена хронологическая последовательность уравнений УР:

$$F_{t_i}(x) = 0, F_{t_i} : R^n \rightarrow R^n, i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где $x \in R^n$ – вектор параметров состояния основной сети ЭЭС.

Задача состоит в отыскании совокупности физически реализуемых неизвестных X_{t_i} этих уравнений, если они существуют при всех $i = \overline{1, N}$; в противном случае необходимо определить интервалы времени $\Delta T \subset T$ такие, что при $t_i \in \Delta T$ уравнения $F_{t_i}(x) = 0$ не имеют физически реализуемых решений, и произвести коррекцию схем сети и (или) управляемых режимных параметров, обеспечивающую существование таких решений.

Для определения понятия физической реализуемости решения уравнений $F_{t_i}(x) = 0, t_i \in T$, предположим, что:

- а) имеется семейство уравнений, параметризованное непрерывным параметром $t \in T$:

$$F(x, t) = 0, F(x, t) : R^{n \times T} \rightarrow R^n; \quad (2)$$

б) на некотором интервале времени $[t_0, t_1]$, предшествующем периоду планирования T , в ЭЭС фактически были реализованы статически устойчивые режимы, образующие непрерывную траекторию $X(t)$ в пространстве R^{n+1} и являющиеся решением уравнений $F(x, t) = 0, t \in [t_0, t_1]$;

с) функция $F(x, t)$ непрерывна по совокупности переменных x, t на множестве $R^n \times [t_0, t_1] \subset R^{n+1}$. Тогда решение x_{t_i} уравнения $F_{t_i}(x) = 0, t_i \in T$, является физически реализуемым, если выполняется одно из следующих условий:

1) существуют решения уравнений $F(x, t) = 0$ при $t \in (t_1, t_i)$, образующие непрерывное продолжение траектории $x(t)$ в R^{n+1} , реализованной в ЭЭС при $t \in [t_0, t_1]$, до точки (X_{t_i}, t_i) ;

2) решение X_{t_i} соответствует статически устойчивому режиму ЭЭС и существует такая его окрестность в R^n , что найдется $t, t_0 < t < t_i$, при котором уравнение $F(x, t) = 0$ не имеет в этой окрестности решений, обладающих указанным свойством.

В действительности при планировании суточного режима ЭЭС вместо континуального семейства (2) задана дискретная последовательность (1).

Пусть

$$F_{ii}(x) = \Phi(r_i, \bar{S}_i, x), i = 1, \bar{N}, \quad (3)$$

где r_i, \bar{S}_i – векторы исходных режимных и схемных параметров в момент $t_i \in T$. Можно ввести в рассмотрение аппроксимацию семейства (2) с помощью линейных гомотопий на дискретных интервалах периода T :

$$F(x, t) = \Phi(r_i \lambda(t) + r_{i+1}(1 - \lambda(t)), \bar{S}_i \lambda(t) + \bar{S}_{i+1}(1 - \lambda(t)), x), \quad (4)$$

где

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{t_{i+1}-t}{t_{i+1}-t_i}, & \text{при } t \in [t_i, t_{i+1}], i = \overline{1, N-1}; \\ 1, & \text{при } t \in [t_N, t_{N+1}]. \end{cases} \quad (5)$$

Если функция $\Phi(r_i, \bar{S}_i, x)$ непрерывна по совокупности переменных (а это действительно справедливо при любой форме уравнений УР в технически допустимой области параметров), то семейство (4) удовлетворяет условиям п. 2.

В соответствии с (4) – (5) необходимо еще найти вектор X_{t_0} параметров состояния практически реализованного устойчивого режима в момент $t_0 < t_1$ и продолжить семейство (4) до значений параметра $t \in [t_0, t_1]$. Пусть t_0 – ближайший к t_1 момент времени, для которого имеется вектор \tilde{V} измеренных значений параметров режима ЭЭС, причем состав компонентов этого вектора обеспечивает топологическую наблюдаемость режима, тогда вектор X_{t_0} определяется как решение задачи статистического оценивания состояния:

$$(\tilde{V} - V(x))^* R^{-1} (\tilde{V} - V(x)) \rightarrow \min, x \in D, \quad (6)$$

где* – символ транспонирования (все векторы здесь и в дальнейшем представляются в виде столбцов); R^{-1} – матрица весовых коэффициентов; $V(x)$ – теоретическая зависимость вектора измененных параметров от вектора параметров состояния; $D \subset R^n$ – допустимая область изменения параметров.

Алгоритм решения задачи. В соответствии с определением понятия *переменных состояний* по вектору X_{t_0} могут быть однозначно определены любые режимные параметры УР, в частности параметры:

$$r_0 = r(x_{t_0}), \quad (7)$$

необходимые для формирования уравнения

$$F_{t_0}(x) = \Phi(r_0, \bar{S}_0, x) = 0. \quad (8)$$

Тем самым, в соответствии с (4) - (5) будет определено и семейство уравнений $F(x, t) = 0$ при $t \in [t_0, t_1]$.

Согласно теореме об обратной функции [8] достаточным условием того, чтобы существовала непрерывная траектория $x(t)$ решения уравнений семейства

$$F(x, t) = 0; F(x, t) : R^n \times [t_0, t_N] \rightarrow R^n \quad (9)$$

в окрестности X_{t_0} решения уравнения (9) является невырожденность матрицы Якоби в этой точке, т.е.

$$\det F_{(x)}(x, t) \neq 0; t = t_0; X = X_{t_0}. \quad (10)$$

Отсюда следует существование непрерывной траектории $X(t)$ физически реализуемых решений на некотором отрезке $[t_0, \tau]$, а также возможность практического построения этой траектории при помощи любого локально сходящегося итерационного процесса, поскольку при достаточно малом шаге t дискретизации семейства (9) решение X_t уравнения $F(x, t) = 0$ будет находиться в области принятия решения $x_{t+\Delta t}$ уравнения $F(x, t + \Delta t) = 0$. Траектория $X(t)$ может быть продолжена до тех пор, пока не будет выполнено одно из следующих условий:

$$\tau = t_{N+1}; \tag{11}$$

$$x\tau \in D \tag{12}$$

$$\det F'_{(x)}(x, t) = 0, t = \tau, x = x\tau. \tag{13}$$

Пусть в схеме замещения основной сети ЭЭС для расчета УР имеем m узлов примыкания ЭС или ЭР, содержащих ЭС. Предполагая, что таким ЭС или ЭР соответствуют эквивалентные синхронные генераторы, для которых считается выполненным одно из условий

$$E_q = \text{const}; E'_q = \text{const}; U_\Gamma = \text{const}, \tag{14}$$

можно записать уравнение их движения в виде

$$\mathbf{T}_j P^2 \delta = \varphi(\delta), \tag{15}$$

где $\delta \in R^m$ – вектор углов роторов относительно синхронно вращающейся оси; P^2 – оператор двукратного дифференцирования по времени; $\varphi(\delta)$ – вектор избытков активных мощностей; \mathbf{T}_j – диагональная матрица постоянных инерции.

Для того, чтобы исходные данные, принятые при расчетах P основной сети, не противоречили условиям (14), задающие реактивные мощности инъекций или модули напряжений в указанных выше узлах должны быть заданы не постоянными значениями, а функциональными зависимостями от векторов x параметров состояния сети. Вид этой зависимости для каждой эквивалентной машины однозначно определяется условием (14), если при решении задачи статического оценивания состояния ЭЭС для исходного момента времени $t = t_0$ в число оцениваемых параметров, наряду с вектором x , были включены соответствующие величины E_q, E'_q или U_Γ . Сформированное указанным образом семейство (9) уравнений УР однозначно определяет семейство динамических систем

$$\mathbf{T}_j (P^2, \delta) = \varphi(\delta, t), \varphi(\delta, t) : R^m \times [t_0, t_N] \rightarrow R^m. \tag{16}$$

Если пренебречь потерями активной мощности при передаче мощности от эквивалентных генераторов к соответствующим узлам примыкания, то можно показать, что:

а) решениям $x_t \in R^n$ уравнения УР основной сети $F(x, t) = 0, t \in [t_0, t_N]$, взаимно однозначно соответствуют положения равновесия $\delta_t \in R^m$ динамической системы $\mathbf{T}_j (P^2, \delta) = \varphi(\delta, t)$;

б) для соответствующих друг другу x_t и δ_t справедливо:

$$\det \varphi'_{(\delta)}(\delta, t) = 0 \Leftrightarrow \det F'_{(x)}(x, t) = 0, \delta = \delta_t; x = x_t. \tag{17}$$

Введением новых переменных $P\delta = S$ семейство (16) динамических систем приводится к нормальной форме

$$PY = \Psi(Y, t); \Psi(Y, t) : R^{2m} \times [t_0, t_N] \rightarrow R^{2m}, \tag{18}$$

$$\text{где } Y \begin{bmatrix} \delta \\ s \end{bmatrix}; \Psi(Y, t) = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_j^{-1} \varphi(\delta, t) \\ S \end{bmatrix}. \tag{19}$$

Вследствие того, что для каждой системы из семейства (19) в любом положении равновесия Y_t имеет место $S_t = 0$, это семейство не является семейством общего положения в соответствующем функциональном пространстве.

Для характеристических чисел $\lambda[\Psi_{(Y)}(Y, t)]$, $P[\mathbf{T}_j^{-1} \varphi'_{(\delta)}(\delta, t)]$ при любом $Y=(\delta, s)$, и $t \in [t_0, t_N]$ справедливо соотношение

$$\lambda = P^2; \tag{20}$$

откуда следует, что необходимое условие устойчивости положения равновесия $Y_t = (\delta_t, 0)$ системы $PY = \Psi(Y, t)$ — мнимость всех характеристических чисел линеаризованной системы выполняется тогда и

только тогда, когда все характеристические числа матрицы $T_j^{-1}\varphi'_{(\delta)}(\delta, t)$ при $\delta = \delta(t)$ лежат в левой комплексной полуплоскости. Кроме того,

$$\det \Psi'_{(\varphi)}(Y, t) = 0 \Leftrightarrow \det \varphi'_{(\delta)}(\delta, t) = 0, Y = Y_t, \delta = \delta_t. \quad (21)$$

Эти соотношения позволяют при исследовании статической устойчивости рассматривать вместо семейства (18) общего положения семейство вида:

$$P_\delta = T_j^{-1}\varphi(\delta, t), \varphi(\delta, t) : R^m \times [t_0, t_N] \rightarrow R^m, \quad (22)$$

являющегося семейством общего положения в соответствующем функциональном пространстве. Семейства общего положения представляют собой в определенном смысле типичные случаи, которые рассматриваются в теории катастроф.

Некоторое свойство является типичным для элементов пространства (метрического, топологического), если множество элементов, обладающих этим свойством, всюду плотно в этом пространстве. Это означает, что любой нетипичный элемент малым шевелением может быть переведен в типичный. Следовательно, в практических задачах имеет смысл рассматривать только типичные элементы — объекты общего положения.

При любом формировании $t \in [t_0, t_N]$ динамической системы из семейства (22) соответствует векторное поле:

$$\varphi_t(\delta) = \varphi(\delta, t) : R^m \rightarrow R^m, \quad (23)$$

а семейству (22) – семейство векторных полей. Вектор δ_t , удовлетворяющий уравнению

$$\varphi_t(\delta) = 0, \quad (24)$$

соответствует положению равновесия динамической системы $P_\delta = T_j^{-1}\varphi(\delta, t)$, называемой *особой точкой* векторного поля $\varphi_t(\delta)$.

Особые точки семейства векторных полей УР. Траектория $\delta(t)$ положения равновесия систем семейства (22) в R^{m+1} называется *кривой особых точек семейства векторных полей*. Значения параметра t , при которых сливается несколько особых точек и соответствующие точки $(\delta_t, t) \in R^{m+1}$ называются *бифуркационными*. Для однопараметрических семейств векторных полей общего положения, определенных на компактном фазовом пространстве, бифуркационные значения параметра изолированы, и в соответствующих бифуркационных точках происходит слияние (исчезновение либо появление) двух особых точек.

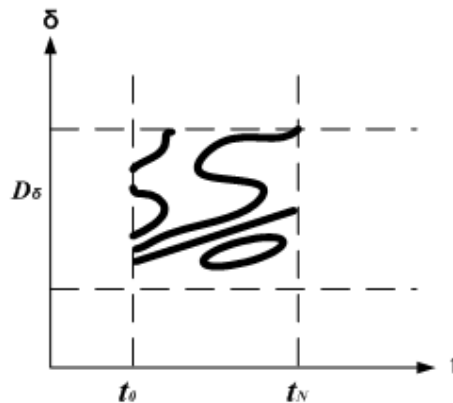


Рисунок 2 – Типичные кривые особых точек

На рис.2 условно в R^2 показаны типичные кривые особых точек. D_δ – допустимая область значений фазовой переменной. Необходимым условием того, чтобы значение параметра было бифуркационным, является вырожденность особой точки векторного поля, соответствующего данному значению параметра, т.е. вырожденность матрицы Якоби в этой точке. Согласно (17), для семейств векторных полей бифуркационными являются одни и те же значения параметра в силу утверждения (16), что кривые особых точек этих полей топологически эквивалентны:

$$F(t): D \times [t_0; t_N] \rightarrow R^n, \quad (25)$$

$$(\delta, t): D_\delta \times [t_0; t_N] \rightarrow R^m, \quad (26)$$

Семейство векторных полей (25) в силу наличия однозначной зависимости порождает семейство (26). Кроме того, можно показать, что при любых $\varphi(\delta, t)$ матрице Якоби поля $\mathbf{F}(x, t)$.

$$\delta = H(x), \quad (27)$$

Разобьем векторы $\mathbf{F}(x)$ и \mathbf{X} на блоки

$$\mathbf{F}(x) = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_\delta(x) \\ \mathbf{F}_\alpha(x) \end{bmatrix}; \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}' \\ \mathbf{X}'' \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Здесь $\mathbf{F}_\delta(x)$ – вектор, определяемый значениями левых частей уравнений баланса активных мощностей в узлах примыкания ЭС или ЭР, содержащих ЭС, к основной сети ЭС, где положительными считаются инъекции мощности в узел; \mathbf{X}' – вектор такой же размерности как $\mathbf{F}_\delta(x)$. Тогда

$$\varphi'_\delta = (\mathbf{F}'_\delta(x') - \mathbf{F}'_\delta(x'') (\mathbf{F}'_\alpha(x''))^{-1} \mathbf{F}'_\alpha(x')) (\mathbf{H}'(x') - \mathbf{H}'(x'') (\mathbf{F}'_\alpha(x''))^{-1} \mathbf{F}'_\alpha(x'))^{-1},$$

где $\mathbf{F}'_\delta(x')$, $\mathbf{F}'_\delta(x'')$, $\mathbf{F}'_\alpha(x')$, $\mathbf{F}'_\alpha(x'')$, $\mathbf{H}'(x')$, $\mathbf{H}'(x'')$ – соответствующие блоки матриц $\mathbf{F}'(x)$, $\mathbf{H}'(x)$. Тогда отсюда можно вывести, что для любых:

$$t \in [t_0, t_N], x_t \in D, \delta_t \in D_\delta,$$

$$\det \mathbf{F}'_{(x)}(x, t) = 0 \Leftrightarrow \det \varphi'_{(\delta)}(\delta, t) = 0. \quad (30)$$

Соотношение (30) сохраняется при любых формах уравнений УР, в частности, не обязательно включающих в себя условие баланса активных мощностей в узлах. Согласно [2] в окрестности особой вырожденной точки δ_τ , где появляются два положения равновесия, однопараметрическое семейство динамических систем общего положения (22) посредством замены координат $t(\varepsilon): R \rightarrow R$:

$$\delta(U, v, z): R^m \rightarrow R^m, 0 \rightarrow \delta_\tau, \quad (31)$$

может быть представлено в виде

$$P_U = U^2 + \varepsilon, U \in R;$$

$$P_v = -v, v \in R^{m-};$$

$$P_z = Z, z \in R^{m+}. \quad (32)$$

Здесь m_-, m_+ – количество характеристических чисел матрицы $\varphi'_{(\delta)}(\delta, t)$ при $t = \tau$, $\delta = \delta_\tau$ соответственно в левой и правой комплексной полуплоскости

$$\backslash m_- + m_+ = m - 1. \quad (33)$$

Для семейства (32) матрица Якоби в нулевом положении равновесия при $\varepsilon = 0$, что соответствует бифуркационной точке семейства (22), и имеет единственное нулевое характеристическое число. Следовательно, в типичном случае бифуркации только одно характеристическое число матрицы $\varphi'_{(\delta)}(\delta, t)$ проходит через нуль.

Если $m_+ = 0$, то при подходе к бифуркационному значению параметра $\varepsilon = 0$, т.е. при достаточно малых по модулю $\varepsilon < 0$ системы из семейства (32) имеют вблизи точки $(U, v, z) = 0$ устойчивое положение равновесия в точке $(-\sqrt{|\varepsilon|}, 0, \dots, 0)$ и неустойчивое в точке $(+\sqrt{|\varepsilon|}, 0, \dots, 0)$.

Отсюда следует, что для семейства (22) в случае, если положение равновесия δ_{t_0} устойчиво, то и вся траектория $(t), t \in [t_0, \tau]$, решений уравнения УР из семейства (9) определяют статически устойчивые режимы ЭЭС. Из (17) вытекает, что в рассматриваемом типичном случае:

$$\det \mathbf{F}'_{(x)}(x, t) = 0, t = \tau, x = x_\tau; \quad (34)$$

$$\det \mathbf{F}'_{(x)}(x, t) \neq 0, t \in [t_0, \tau], x = x(t). \quad (35)$$

Этим определяется физически реализуемое решение уравнений УР.

Согласно теореме о гомотопных векторных полях [7] на каждой ветви траектории $\delta(t), t \in [t_0, \tau]$ сохраняются индексы особых точек:

$$\text{ind}(\varphi, \delta_t) = \text{sign} \det \varphi'_{(\delta)}(\delta, t) = \text{const}. \quad (36)$$

Так как свободный член характеристического уравнения каждой динамической системы из семейства (22) связан с якобианом соотношением

$$a_m = (-1)^m \det [\mathbf{T}_j^{-1} \Phi'_\delta(\delta, t)], \quad (37)$$

то из (36) следует, что для якобианов на устойчивой ветви траектории $\delta(t)$ справедливо:

$$(-1)^m \det \Phi'_\delta(\delta, t) > 0. \quad (38)$$

В соответствии с (31), (32) при $t = \varepsilon$, когда выполняется условие (34), имеет место предельный режим ЭЭС по апериодической устойчивости. Далее необходимо исследовать семейство уравнений УР $t \in [\tau, t_N]$ с целью выявления момента возникновения статически устойчивых режимов.

Рассмотрим семейство функций

$$f(x, t) = \mathbf{F}^*(x, t), \mathbf{F}(x, t), f(x, t): R^n X [t_0, t_N] \rightarrow R. \quad (39)$$

Известно, что корни x_t уравнений УР из семейства (9) являются критическими точками (минимумами) функций $f(x, t)$:

$$f'_{(x)}(x, t) = 0, t \in [t_0, \tau], x = x_t, \quad (40)$$

которые не вырождены при ненулевом и вырождены при нулевом якобиане вектор-функции $\mathbf{F}(x, t)$:

$$\det \mathbf{f}''_{(x)}(x, t) \neq 0; t \in [t_0, \tau], x = x_t; \quad (41)$$

$$\det \mathbf{f}''_{(x)}(x, t) = 0; t = \tau, x = x_\tau. \quad (42)$$

Из теории катастроф известно, что в типичном случае однопараметрическое семейство гладких функций в окрестности вырожденной критической точки с помощью некоторых замен и сдвигов начала координат может быть приведено к виду

$$g(U, \varepsilon) = U_1^3 + \varepsilon U_1 \pm U_2^2 \dots \pm U_n^2, U \in R^n, \quad (43)$$

где функции, имеющей вырожденную критическую точку, соответствует

$$g(U, 0) = U_1^3 \pm U_2^2 \pm \dots \pm U_n^2, \quad (44)$$

где ε – параметр; n – размерность области определения семейства.

Однопараметрическому семейству функций соответствует кривая критических точек в R^{n+1} , проекция которой на U_1 – ось (U_1, ε) в типичном случае имеет в соответствии с (43) вид, показанный на рис. 3.

На одной из ветвей кривой критические точки являются минимумами по U_1 , на другой – максимумами. Такая бифуркация критических точек, как на рис.3, в начале координат называется *катастрофой складки*. В частном случае семейства (39) из того, что в окрестности вырожденной критической точки $f(x, t) \geq 0$ и ε – левая ветвь кривой критических точек, где $f(x, t) = 0$, можно вывести, что семейство приводится к виду:

$$g(U, \varepsilon) = U_1^4 + \varepsilon U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2. \quad (45)$$

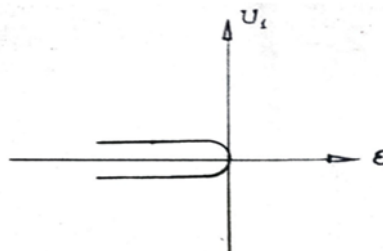


Рисунок 3 – Проекция кривой критических точек в R^{n+1} на плоскость (U_1, ε)

Вместо катастрофы складки, в вырожденной критической точке имеет место слияние трех точек минимума и появление одного максимума по U_1 , как показано на рис. 3. Максимумы по U_1 функций $g(U, \varepsilon)$ вида (45) являются минимумами по $x \in R^n$ функций $f(x, t)$, максимумы по $(U_1 - 1)$ – седлами функций $f(x, t)$.

Минимумы $f(x, t)$ на одной из ветвей являются корнями уравнений $F(x, t) = 0$ согласно принятому выше условию $f(x, t) = 0$, а из теории о постоянстве вращения гомотопных векторных полей вытекает, что существует единственная другая ветвь критических точек $f(x, t)$, на которой они являются корнями уравнений $F(x, t) = 0$.

Оси абсцисс на рис. 3 соответствует траектория $x(t)$ таких критических точек функции $f(x, t)$, которые при $t \in [t_0, \tau]$ являются ее минимумами, а при $t > (\tau - 1)$ – седлами. Из того, что эти критические точки не являются корнями уравнений $F(x, t) = 0$, вытекает вырожденность матриц $\mathbf{F}'_{(x)}(x, t)$ в этих точках. Потому траектория $x(t)$ называется критической линией нулевого якобиана семейства векторных полей (25). В силу (30) ей соответствует критическая линия $\delta(t)$ нулевого якобиана семейства векторных полей (26).

Критические линии $x(t)$, $\delta(t)$, $t \geq \tau$ нулевых якобианов существуют в силу того, что при $t = \tau$ одно из характеристических чисел матрицы $\Phi'_{(\delta)}(\delta, t)$ приняло нулевое решение и сохраняет его при $t > \tau$. Можно показать, что в типичном случае на линии $\delta(t)$ при $t > \tau$ не происходит переход через нуль других характеристических чисел $\Phi'_{(\delta)}(\delta, t)$. Действительно, в пространстве R^{m+1} точки, в которых нулевое характеристическое число имеет кратность 2, образуют многообразие коразмерности 2, заданное уравнениями:

$$\left[\Phi'_{(\delta)}(\delta, t) \right] L_1(\delta, t) = 0, \left[\Phi'_{(\delta)}(\delta, t) \right]^2 L_2(\delta, t) = 0, \quad (46)$$

где $L_1(\delta, t), L_2(\delta, t)$ – линейно независимые векторы ядра матрицы $\Phi'_{(\delta)}(\delta, t)$, являющегося двумерным линейным подпространством в R^m . Коразмерность линии $\delta(t)$, в R^{m+1} равна m . Следовательно, необходимое условие трансверсальности пересечения многообразия (46) с $\delta(t)$ не выполнено.

Таким образом, все ненулевые характеристические числа матрицы $\Phi'_{(\delta)}(\delta, t)$, $t = \tau, \delta = \delta_\tau$ сохраняют на критической линии $\delta(t)$ нулевого якобиана свои знаки. Движение по соответствующей критической линии $x(t)$ нулевого якобиана при достаточно малом шаге Δt дискретизации интервала (τ, t_N) может быть определено при помощи любого локально сходящегося метода минимизации функций $f(x, t)$.

Если при движении по критической линии $x(t)$ нулевого якобиана в некоторый момент $\bar{t}, \tau < \bar{t} < t_N$ происходит вырождение критической точки функции $f(x, t)$, т.е.

$$\det \mathbf{f}''_{(x)}(x, t) = 0, t = \bar{t}, x = x(\bar{t}), \quad (47)$$

что соответствует решению уравнения УР, соответствующего предельному по апериодической устойчивости режиму.

При этом для выбора траектории статически устойчивых режимов среди двух ветвей решений уравнений УР, начинающихся в точке $t = \bar{t}, x = x(\bar{t})$, достаточно испытать одно из двух решений уравнения $F(x, t) = 0, t > \tau$, имеющих в окрестности указанной точки, по критерию (38), где $\Phi'_{(\delta)}(\delta, t)$ определяется по (23). Существование при данном векторном поле других статически устойчивых решений уравнений УР при сколько-нибудь большой размерности фазового пространства динамической системы (22) крайне маловероятно (принцип “хрупкости хорошего” в теории катастроф). Для этого необходимо, чтобы в другой области пространства знаки характеристических чисел матрицы $\mathbf{T}_j^{-1} \Phi_8^{-1}(\delta, t)$ образовали единственное сочетание из огромного количества возможных [8]. Этим обосновывается определение понятия физически реализуемого режима.

После построения траекторий $x(t), \bar{x}(t)$ статически устойчивых режимов соответственно на интервалах $[t_0, \tau), (\bar{t}, t_N], \tau, \bar{t} < t_N$ для определения интервала $\Delta T = [t^{(w)}, t^{(w)}]$, на котором требуется корректировать исходные данные для расчетов УР, необходимо решить уравнения:

$$\|x(t^{(w)} - x(\tau))\| = k_3; \|x(t^{(w)} - \bar{x}(\bar{t}))\| = k_3,$$

где k_3 – заданный коэффициент запаса устойчивости по норме вектора параметров состояния основной сети ЭЭС.

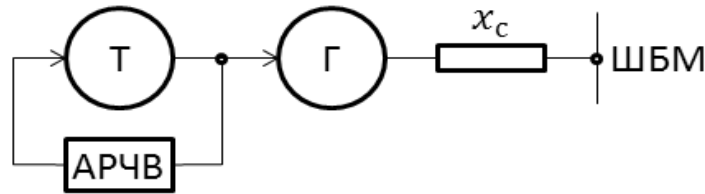


Рисунок 4 – Упрощенная схема исследуемой ЭЭС

Для иллюстрации этого метода была рассмотрена математическая модель упрощенной ЭЭС (рис.4), в которой система дифференциальных уравнений, описывающая динамику ЭЭС, содержит уравнение электромагнитных переходных процессов в обмотке возбуждения генератора и уравнение АРЧВ [5]. Для оценки динамической устойчивости обычно используется зависимость $\delta = f(t)$ во время переходного процесса, которую можно получить путем решения дифференциального уравнения движения ротора:

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_0 - P_m \sin \delta.$$

Однако даже в простейшем случае данное уравнение из-за нелинейной зависимости активной мощности генератора от величины δ представляет значительные трудности, и в общем случае не всегда можно получить решение. В ряде случаев динамическую устойчивость системы можно проверить без решения дифференциальных уравнений, рассматривая лишь энергетические соотношения, возникающие в переходном процессе. Наилучшие результаты были получены при совместном использовании метода площадей и последовательных интервалов.

Работа, совершаемая ротором

$$A = \int_{\delta_0}^{\delta_1} \Delta P d\delta = f_A(A_a > A_d) \text{ или } f_A(A_a < A_d),$$

где $\Delta P = P_0 - P_m \sin \delta$.

Здесь δ – угол между векторами ЭДС генератора и вектором напряжения шин приемной. Обозначения других величин не отличаются от общепринятых в теории переходных электромеханических процессов.

Интегрируем систему дифференциальных уравнений следующего вида

:

$$T_{J_i} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{T_i} - P_{Э_i},$$

где $P_{Э_i} = y_{ii} E_i^2 \sin a_{ii} - \sum_{m \neq i} y_{im} E_i E_m \sin(\delta_i - \delta_m - a_{im}), i=1, 2, \dots, n$.

После чего от системы n уравнений второго порядка можно перейти к системе $2n$ уравнений первого порядка

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i; T_{J_i} \frac{d\omega_i}{dt} = P_{T_i} - P_{Э_i}.$$

Затем заменяя дифференциалы приращениями угла генератора на каждом шаге интегрирования, решаем систему алгебраических уравнений первого порядка.

Таким образом, после замены переменных с учетом уравнения связи между E и E'_q , система уравнений (48) была приведена к системе дифференциальных уравнений, записанной в форме Коши. В качестве функции Ляпунова для такой системы была сформулирована функция, в которой составляющие элементы соответствовали кинетической и потенциальной энергии. Множество критических точек этой функции, т.е. положений равновесия системы совпадало с множеством критических точек потенциальной энергии. Здесь функция энергии представлялась в виде многообразия набора бифуркаций, который соответствовал области динамической устойчивости ЭЭС. Таким образом, была получена геометрическая интерпретация положений равновесия исследуемой ЭЭС в виде многообразия стандартной катастрофы сборки.

Пусть семейство функций представлено в виде:

$$F : S \times C \rightarrow R,$$

где S – многообразие R^n , а C – другое многообразие R^n . Обычно предшествующий R^n называется пространством состояния, а последний R^r – пространством контроля.

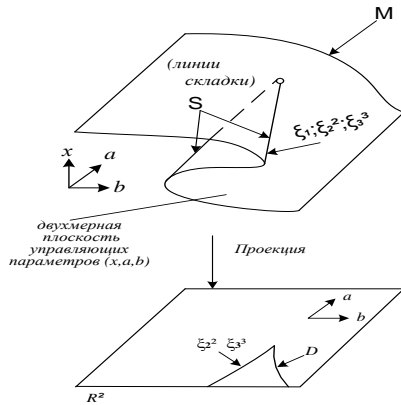


Рисунок 5 – Многообразие катастрофы сборки M поверхность со сборкой, представляющее множество критических точек энергетической функции

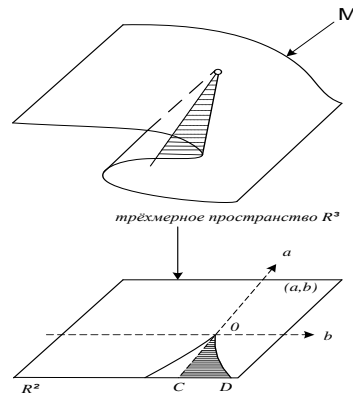


Рисунок 6 – Области равновесия (заштрихованы) исследуемых ЭЭС на многообразии M и в плоскости управления $B(a,b)$

Следовательно, F – отображение плавной функции $R^n \times R^r \rightarrow R^1$. Число r – разворачивающееся измерение, которое в стандартной универсальной форме совпадает с коразмерностью в начале раскрытия функции. Набор всех критических точек потенциалов F_c в семействе F , в котором

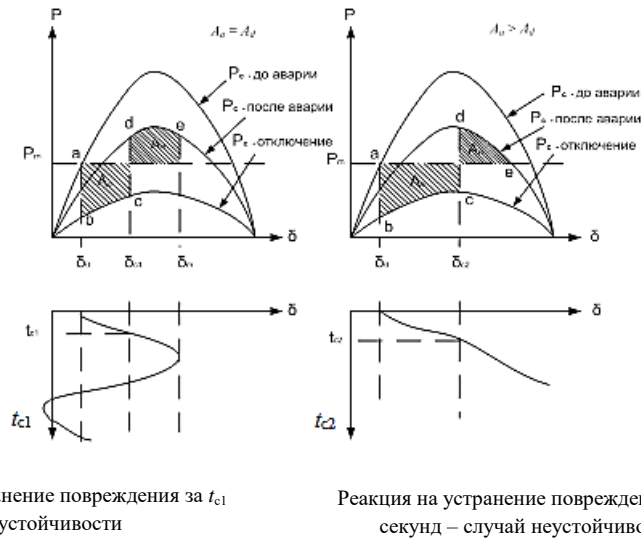
$$DF_c(x) = 0$$

является множеством $R^n \times R^r$ и определяется из многообразия катастроф. Проекцией является $X: R^n \times R^r \rightarrow R^1$. Множество особых точек x в M , в котором x является особой, т.е. ранг её производной меньше, чем r , представляет собой множество особенности S . Изображение $x(S)$ в C называется бифуркационным множеством B . Это множество B является наиболее важным, поскольку оно находится в области контроля, т.е. все скачки происходят на нем в соответствии с вариацией параметров контроля. Эти параметры в зависимости от изменений равновесных состояний самой ЭЭС (работа АРВ, регуляторов частоты и напряжения, коммутационные вариации, атмосферные перенапряжения, работа системой автоматики и т.д.). В стационарном состоянии выходная электрическая мощность P_e определяется как:

$$P_e = \frac{E_q V}{X_d} \sin \delta - V^2 \frac{X_q - X_d}{2X_q X_d} \sin 2\delta = P_m \sin \delta - A \sin 2\delta, \quad (49)$$

$$P_m = \frac{E_q V}{X_d}; \quad A = \frac{X_q - X_d}{2X_q X_d}.$$

Для критерия равной площади устойчивости, представленного на рисунке 5, необходимо, чтобы член $\int_{\delta_0}^{\delta_2} P_a d\delta$ равнялся нулю [9]. Считаем δ_0 фиксированным и представляющим собой минимальный угол колебаний, когда входная мощность (механическая мощность P_1) плавно отходит от начального значения P_0 с помощью регулятора входной мощности контрольной системы. Затем по уравнению (49) может быть вычислен максимальный угол колебаний δ_2 при каждом значении P_1 , который будет сохранять систему устойчивой, в зависимости от другого параметра P_m , который является пределом устойчивости.



Реакция на устранение повреждения за t_{c1} секунд – случай устойчивости

Реакция на устранение повреждения за t_{c2} секунд – случай неустойчивости

Рисунок 7 – Площадки ускорения и торможения для исследуемой системы

Этот параметр можно отслеживать с помощью автоматического контроля тока возбуждения и реактивного сопротивления. Тогда в соответствии с теорией катастроф энергетическая функция получит вид:

$$F = \int_{\delta_0}^{\delta_2} [P_i - (P_m \sin \delta - A \sin 2\delta)] d\delta.$$

Далее определяются критические точки, в которых функция F стремится к нулю для $\delta_1 < \delta_2 < \pi - \delta_0$ с воздействием параметра контроля. Из последнего уравнения следует:

$$F = P_1(\delta_2 - \delta_0) + P_m \cos \delta_{\delta_0}^2 - \frac{1}{2} A \cos 2\delta_{\delta_0}^2.$$

После этого можно определить устойчивые рабочие точки и их расположение на многообразии катастроф M (бифуркационные узлы). Многообразие катастроф M является набором всех критических точек F_c в семействе F . Затем, чтобы получить набор бифуркаций B , набор сингулярности S проецируется на пространство контроля R^r , устраняя переменные состояния с помощью уравнений (48) и (49). Набор бифуркаций обеспечивает проецирование области устойчивости функции $V(x, c)$, т.е. он содержит все невырожденные критические точки функции V .

Если в энергосистеме отключилась одна из линий, ротор будет ускоряться и вырабатывать кинетическую энергию. Если проблема устранена в критический период отключения, кинетическая энергия, возникшая в связи с аварией, будет поглощаться системой и накопленная энергия в конце периода будет равна нулю; система будет считаться устойчивой. Энергетическая функция в различные моменты отключения представлена на рисунке 6. С точки зрения ТК рисунок 6 может быть рассмотрен как равновесная энергетическая поверхность или как многообразие катастроф, при котором кинетическая энергия системы равна потенциальной. Все невырожденные критические точки лежат на энергетической равновесной поверхности, что соответствует критическим периодам отключения [10].

После замены переменных и преобразования энергетической функции можно получить классическое уравнение *ласточкин хвост* в виде одной из элементарных катастроф, в которой коэффициенты при неизвестных соответствуют параметрам уравнений (48 и 49):

$$y^4 + uy^2 + vy + w = 0,$$

где $u = -6(2 + \beta^2); \quad v = -8\beta^2 + 24 \frac{k_1}{k_2};$

$$w = 3\beta^2(4 - \beta^2) + 24 \left(1 + \frac{k_4 + k_1\beta}{k_2}\right).$$

Таким образом, значение областей динамической устойчивости может быть представлено набором бифуркаций многообразия катастрофы не только с точки зрения скорости и точности, но и позволяет

определить пределы динамической устойчивости сети после аварии (рис. 7). Выполненные исследования показали, что ТК может быть успешно использована для точного определения областей динамической устойчивости и максимальной механической мощности в системе до возникновения переходного процесса.

Коррекция планируемых режимов может быть выполнена также и увеличением ЭДС эквивалентных генераторов [11] в технически допустимых пределах, повторной оптимизацией режима ЭЭС по активной мощности на интервале ΔT с введением ограничений по перетокам активной мощности или углам расхождения напряжений по концам слабых связей, а также сезонным запретом отключений в ремонт связей с наибольшей пропускной способностью.

Выводы:

1. Проблема принятия решений при планировании суточного режима электроэнергетической системы может быть сформулирована в виде многокритериальной задачи математического программирования с большим количеством ограничений топологического, организационно-технического и режимного характера.

2. Система ограничений формирует область существования реального процесса при переходе системы из одного устойчивого состояния в другое. Автоматизация решения этой задачи обусловлена необходимостью многократной проверки ограничений при планировании перспективных и текущих режимов энергосистем.

3. Множество областей переходных режимов может быть представлено набором бифуркаций многообразия катастрофы и позволяет определить пределы динамической устойчивости сети после аварии.

Список использованной литературы

1. Постон, Т. Теория катастроф и её приложения / Т. Постон, Я. Стюарт. – М.: Мир, 1980. – 387 с.
2. Джилмор, Р. Теория катастроф для ученых и инженеров / Р. Джилмор. – М.: Мир, 1983. – 484 с.
3. Гурский, С.К. Применение теории катастроф к расчету установившегося режима ЭЭС / С.К. Гурский, Б. Б., Новицкий // Тез. докл. к Всесоюз. НТК “Моделирование электроэнергетических систем” – Баку: – 1982. – С. 45-46.
4. Сидорец, В.Н. Бифурационные процессы в RC-цепях с электрической дугой / В.Н. Сидорец, В.В. Кирилук, С.И. Тупицын // Киев. Техническая электродинамика. – 1989. №2. -- С.29 – 55.
5. Sallam, A.A. Catastrophe Theory as a Tool for Determining Synchronous Power System Dynamic Stability / A. A. Sallam, J. L. Dineley // Trans. – IEEE Power App. And Syst., 1983, v. PAS-102, № 3, p.622-630.
6. Кубарева, Т.С. Параметры электроэнергетической системы, предельные по условию статической устойчивости / Т.С. Кубарева // Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт. – 1986. - №1. – С. 46-52.
7. Завьялов, В.И. Методы исследования устойчивости нелинейных систем / В.И. Завьялов // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1986.– №4. – С.70 – 79.
8. Васин, В.П. Определение узлов электрической сети, опасных по условию существования режима сложной электроэнергетической системы / В. П. Васин, Ю.В. Кишкин, Г.И. Чертова // Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт. 1990. – № 2. – С. 27 – 34.
9. Vijayakumar, K. Multiobjective Optimization Methods for Congestion Management in Deregulated Power Systems / K. Vijayakumar // Hindawi Publishing Corporation Journal of Electrical and Computer Engineering, Volume 2012, Article ID 962402, 8 pages, doi: 10. 1155/ 2012 / 962402.
10. Kareem, J. Transient Stability Assessment of Multi-Machine Power System Using Swallowtail Catastrophe Theory // Comput. Eng. Inf. Technol. -- 2014, № 3. P. 6–16.
11. Александров, О.И. Оценка режимных параметров электроэнергетической системы с позиций теории катастроф / О.И. Александров, М.Ш. Мисриханов, Ю.С. Бампи // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Сборник научных статей. Выпуск 66. – Минск. – 2015. – С. 302-307.

O. Alexandrov, Cand.Sc. (Eng), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2813-3692,

Belarusian State Technological University;

D. Ivanko, Cand.Sc. (Eng), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2813-3692,

Norwegian University of Science and Technology

T. Zhukovskaya, PhD, student,

Belarusian national technical university

APPLICATION OF THE CATASTROPHE THEORY FOR ASSESSMENT OF EXISTENCE OF THE MODE OF ELECTRICAL POWER SYSTEM

The research of the nonstationary modes of the composite electrical power system (EES) comes down to the solution of sets of equations of transition phenomenons. The variation of the fissile or passive regime parameters of a power supply system at the time of emergence of various nonstationary processes leads to change of equilibrium states of the power supply system. At the same time attracts particular interest in studying of the smoothly varying transition of quantities to high-quality change of behavior of system. In article the approach and an analytical method allowing to execute assessment of the fissile parameters dangerous on a condition of existence of the mode of the composite EES is formulated. Areas of stability of EES which reflect a condition of the energy balance determined by variety of saltatory changes (bifurcations) are considered. The mathematical basis for a research of these processes applied elements of the theory of accidents.

Keywords: power supply system, stability, transition phenomenons, theory of bifurcations, accidents, mode parameters, topology, singular points.

Надійшла 12.08.2018

Received 12.08.2018

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

УДК 621.314:657

В.Я. Жуйков, д-р. техн. наук, проф.,
І.Ю. Бойко, асп.

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

ЗАСТОСУВАННЯ ЛІНЕАРИЗОВАНОЇ ЕЛЕКТРО – ВАРТІСНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ІЗОЛЬОВАНІЙ ГЕНЕРУЮЧІЙ СИСТЕМІ

На основі положень сучасної економічної теорії, приймаючи концепцію «електроенергія – це товар» та враховуючи динамічну зміну електротехнічних параметрів генератора було створено нелінійну динамічну електро-вартісну модель ізольованої електротехнічної системи із дизель-генератором. Однак при незначному відхиленні параметрів від деякого статичного значення можна дослідити перехідні процеси, використовуючи лінеаризовану модель. У статті розглянуто приклад ізольованої системи, що складається із дизельного генератора та споживача. Отримана у результаті лінеаризації математична модель дозволяє досліджувати вплив економічних параметрів на характер перехідного процесу ізольованої системи при зміні рівня потужності генератора.

Ключові слова: Smart Grid; ізольована система; лінеаризована електро-вартісна модель; рівняння Фішера.

Вступ.

Інноваційний шлях розвитку електроенергетики провідних країн світу реалізується за рахунок положень концепції Smart Grid, зокрема, сучасних енергетичних та інформаційно-комунікаційних технологій, розосереджених джерел енергії, комплексних систем і сервісів інтелектуальної енергетики, побудованих на відкритій мережевій архітектурі з використанням інформаційно-комунікаційних технологій [1, 2]. Необхідність вироблення концепції Smart Grid розвитку електроенергетики обумовлена як необхідністю економічного зростання, нерозривно пов'язаного зі зростанням обсягів енергоспоживання, підвищенням вимог до якості електроенергії та рівня надійності енергопостачання (якості енергопостачання), так і з істотними обмеженнями технологічного, економічного та екологічного планів.

На сьогодні фахівці визначають два статуси поняття «електроенергії» як базового елемента концепції Smart Grid: електроенергія – це товар (продукт); електроенергія – це одна з складових кінцевого продукту / послуги (світло, тепло, зв'язок тощо) [3]. Вибір того чи іншого трактування поняття «електроенергії» визначає ціннісну складову електроенергії як предмета товарно-ринкових відносин, а також можливі варіанти розвитку цих відносин та технологій, що підтримують ці відносини. Надалі будемо розглядати електроенергію як товар, яким можна торгувати. Цілком закономірним у цьому випадку є розвиток технологій торгівлі, зокрема, біржева торгівля, ф'ючерси, опціони, страховий ринок тощо.

У цьому випадку надійність і ефективність роботи електроенергетичних та електротехнічних систем і ключова роль оперативного-диспетчерського керування не піддається сумніву. При прийнятті концепції «електроенергія – товар» до ключових аспектів розвитку концепції Smart Grid можна віднести [3]:

1) облік електроенергії (як і в будь-яких товарно-грошових відносинах здійснюється облік товару від стадії виробництва до стадії споживання; необхідність врахування кількості, якості, характеру походження товару);

2) зберігання електроенергії (більшість товарів від стадії виробництва до стадії споживання проходять етапи зберігання; електроенергія в цьому плані не має бути виключенням);

3) надійний, гнучкий високошвидкісний зв'язок між споживачем і постачальником;

4) широкий спектр первинних енергоресурсів для виробництва електроенергії, а також методів виробництва (для сталого розвитку ринкових відносин і можливості формування більш гнучких пропозицій як за ціною, так і за характером постачання електроенергії повинні бути доступні широкі можливості щодо використання різних типів джерел генерації);

5) надійна поставка електроенергії (використання всього спектру технологічних рішень: силове обладнання, засоби автоматизації тощо), які сприяють надійному гарантованому постачанню товару – електроенергії;

© В.Я. Жуйков, І.Ю. Бойко, 2019

б) розвинена інфраструктура, сервіси: (продаж, збут, зокрема, біржа, фінансові інструменти); страхування, наприклад, від збоїв у електропостачанні або поганій якості електроенергії; обслуговування.

Впровадження технологій Smart Grid наразі дозволяє у реальному часі оцінювати попит і пропозицію, а також швидко регулювати електротехнічні параметри генеруючої системи [1, 2]. Інтелектуальні сенсорні технології дають можливість постачати електроенергію більш ефективно за допомогою динамічного аналізу попиту і пропозиції на цей вид товару. Використання інтелектуальних систем дає змогу корегувати тарифну ціну відповідно до використання електроенергії в режимі реального часу.

Для локальних генеруючих систем актуальними є розробка та застосування моделей динамічної тарифікації, що включатимуть наявність перехідних процесів при зміні режимів роботи генератора та їх вплив на відхилення реальних значень економічних параметрів системи. Динамічний вплив електротехнічних параметрів генеруючої системи на економічні є визначним фактором для впровадження динамічної тарифікації у режимі реального часу.

Хоча наразі обладнання та можливості програмної реалізації для цього завдання легко доступні, теоретичні моделі досі потребують подальшого розвитку. Тому актуальним є створення динамічної математичної моделі, що дозволить дослідити вплив електротехнічних параметрів системи на економічні, при наявності перехідних процесів.

Мета та завдання дослідження. Враховуючи вплив тривалості та характеру перехідних процесів на відхилення реальних витрат пального та якості виробленої енергії, наступним актуальним завданням є дослідження впливу параметрів генеруючої системи із дизель-генератором на характеристики перехідних процесів. При досить незначному відхиленні параметрів від деякого статичного значення можна дослідити перехідні процеси, використовуючи математичну модель генеруючої системи, створену на основі лінійних диференційних рівнянь.

Динамічна електро-вартісна модель ізольованої енергогенеруючої системи. Систему «виробник – споживач електроенергії» схематично представлено на рис.1 як замкнену макроекономічну систему [3], яка поєднує динамічну та економічну частини ізольованої системи.

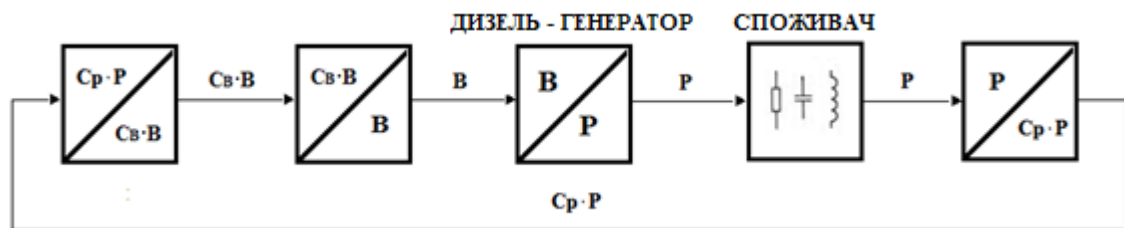


Рисунок 1 – Замкнена макроекономічна система

Споживач отримує певний обсяг електроенергії $P \cdot T$, за яку сплачує її вартість $K_P = C_P \cdot P \cdot T$, де C_P , [грн / Вт · с] – ціна одиниці електроенергії. Певна кількість сплачених коштів $K_B = C_B \cdot B$ витрачається на закупівлю пального у кількості B , де C_B – ціна одиниці пального. Економічну складову наведеної системи доцільно розглядати як замкнену макроекономічну систему, баланс якої описується рівняннями Фішера [4]: $M \cdot V = C \cdot Q$, де M – грошова маса, що робить один оберт за час T_V , [грн], $V = T / T_V$ – швидкість обороту коштів, тобто кількість обертів грошової маси M за певний період часу T , C та Q – ціна одиниці продукції та кількість продукції відповідно. Для генеруючої системи рівняння Фішера матиме вигляд:

$$M \cdot V = K_B + K_P.$$

Швидкість обороту залежить від обсягів економічної активності при заданій грошовій масі. Якщо інтервал часу заявлений, швидкість може бути представлена числом. В іншому випадку показник повинен бути заданий у формі числа за період часу [5]. Для розробки математичної моделі динамічної тарифікації доцільно розглядати інтервал часу T як одну секунду. У такому випадку $K_P = C_P \cdot P \cdot 1c = C_P \cdot P$, з урахуванням того що C_P має нову розмірність [грн/Вт]. Кількість коштів, що витрачається на закупівлю пального, розраховується як певна частина отриманих коштів за вироблену енергію, через коефіцієнт β , обернено пропорційний прибутку системи. У такому разі $M \cdot V = K_P \cdot \beta + K_P$.

Прийнявши зміну тарифної ціни як ΔC_P та враховуючи, що $\Delta C_P = \frac{dC_P}{dt} \cdot \Delta t$ при достатньо малому значенні Δt [6], отримано рівняння:

$$\frac{dC_P}{dt} = \frac{M \cdot V}{P} - C_P \cdot (1 + \beta) - \Delta B_P \cdot C_B \quad (1),$$

яке описує динамічну зміну C_P в залежності від потужності, що забезпечує посекундну тарифікацію при $\Delta t = 1$ сек. Величина ΔB_P – кількість пального, необхідна для переходу генератора на новий, заданий рівень потужності.

Рівняння, що відображає зміну потужності для дизельного генератора, можна отримати аналогічним чином із виразу для перетворення потужності згораючого пального у вироблену потужність. Із виразу для ККД дизель-генератора отримаємо наступне співвідношення:

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

де η_B – ККД генератора; τ – стала часу генератора; P_T – потужність згораючого пального. Приймавши приріст потужності за одну секунду як $\frac{\Delta P}{\Delta t}$ та виразивши потужність згораючого пального через його кількість B , отримаємо:

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

де γ – коефіцієнт перетворення пального у вироблену потужність. Замінивши різницею вираз на похідну отримаємо рівняння приросту потужності для дизельного генератора:

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau} + \frac{\eta_B}{\tau} \cdot \gamma \cdot B. \quad (2),$$

Рівняння (1) та (2) складають динамічну електро - вартісну модель ізольованої енергогенеруючої системи:

$$\begin{cases} \frac{dC_P}{dt} = \frac{M \cdot V}{P} - C_P \cdot (1 + \beta) - \Delta K_B; \\ \frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot (\beta \cdot C_P \cdot P)}{\tau \cdot C_B} + \Delta P_\tau, \end{cases} \quad (3),$$

у якій $\Delta K_B = \Delta B_P \cdot C_B$ та $\Delta P_\tau = \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}$ – відповідно впливи, що задають величину динамічного

приросту тарифної ціни та потужності генератора. Отримана математична модель поєднує електротехнічні та економічні параметри ізольованої енергогенеруючої системи із дизель-генератором та дозволяє розраховувати динамічну зміну тарифної ціни при зміні рівня генерованої потужності [7 – 9].

Перехідні процеси, що виникають під час зміни режимів роботи генератора, мають суттєвий вплив на економічні параметри ізольованої системи. При незначному відхиленні виробленої потужності P від деякого статичного значення можна розглядати перехідні процеси в системі у малому, виконавши перехід від нелінійних диференціальних рівнянь до лінеаризованих у околі певного значення часу. Лінеаризація отриманої раніше системи дозволяє отримати характеристичні рівняння, за допомогою яких можна дослідити вплив ключових параметрів системи на характер перехідних процесів.

Дослідження характеру перехідних процесів у малому. Для спрощення системи була виконана заміна:

$$M \cdot V = A; \quad 1 + \beta = B; \quad \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{\tau \cdot C_B} = F; .$$

Тоді система для динамічно-вартісної моделі набуває вигляду:

$$\begin{cases} \frac{dC_P}{dt} = \frac{A}{P} - C_P \cdot B - \Delta K_B \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau} + C_P \cdot P \cdot F + \Delta P_\tau. \end{cases} \quad (5)$$

При розкладенні нелінійностей в околі певної точки t_0 у ряд Тейлора, з урахуванням лише лінійних складових ряду, отримано:

$$C_P \cdot P = a \cdot C_P + b \cdot P, \text{ де } a, b - \text{ константи, } \frac{1}{P} = \frac{1}{t_0} - \frac{P - t_0}{t_0^2}.$$

Із рівняння (5) системи, з урахуванням проведених заміни та розкладання нелінійностей, отримаємо:

$$\frac{dP}{dt} = a \cdot F \cdot C_P + b \cdot F \cdot P - \frac{P}{\tau} + \Delta P_\tau,$$

$$\text{звідки } C_P = \frac{\frac{dP}{dt} + \frac{P}{\tau} - \Delta P_\tau - b \cdot F \cdot P}{a \cdot F}. \quad (6)$$

Здійснивши перехід до $\frac{dC_P}{dt} = \frac{d^2P}{dt^2} \cdot \left(\frac{1}{a \cdot F}\right) + \frac{1}{\tau \cdot a \cdot F} - \frac{b}{a}$ та підставляючи вираз для C_P та

$\frac{dC_P}{dt}$ у рівняння (4), отримаємо лінійне диференційне рівняння другого порядку

$$\frac{d^2Y}{dt^2} \cdot a_1 + \frac{dY}{dt} \cdot a_2 + Y \cdot a_3 + a_4 = 0,$$

розв'язавши яке відносно P , отримаємо корені характеристичного рівняння

$$\lambda_{1,2} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} \quad (7)$$

Продиферинціювавши вираз для P та підставивши отримані значення P та $\frac{dP}{dt}$ у рівняння (6), отримаємо:

$$C_P = C_1 \cdot \left(\frac{\lambda_1}{a \cdot F} + \frac{1}{a \cdot \tau \cdot F} - \frac{b}{a}\right) \cdot e^{t \cdot \lambda_1} + C_2 \cdot \left(\frac{\lambda_2}{a \cdot F} + \frac{1}{a \cdot \tau \cdot F} - \frac{b}{a}\right) \cdot e^{t \cdot \lambda_2} - \left(\frac{a_4}{\tau \cdot a_3 \cdot a \cdot F} + \frac{\Delta P_\tau}{a \cdot F} - \frac{b \cdot F \cdot a_4}{a_3 \cdot a \cdot F}\right).$$

Дане рівняння необхідно сприймати як оцінку впливу електротехнічних параметрів системи на можливе відхилення тарифної ціни, що може бути використана власником генеруючої системи для зміни поточного тарифу.

Для порівняння лінеаризованої динамічної моделі та нелінійної було виконано симуляцію перехідних процесів у системі за допомогою нелінійної моделі. Параметри системи наведені у таблиці 1, результати моделювання показано на рис. 2.

Таблиця 1 – Параметри системи

Параметр	M	V	P_0	C_{P0}	β	ΔB	C_B	η_B	γ	τ
Випадок 1	1000 грн	10	500 Вт	10 грн/Вт	1	0 л	50 грн/л	0,5	1 Вт/л	15 с

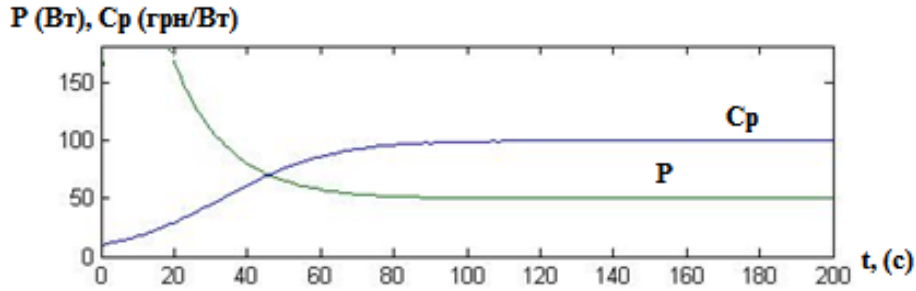


Рисунок 2 – Перехідні процеси у динамічній моделі

Лінеаризація диференціальних рівнянь виконана у околі трьох точок, обраних на початку, середині та після завершення перехідного процесу. У результаті розв'язання рівнянь отримані наступні дійсні корені, що визначають експоненційно затухаючий перехідний процес при відповідних параметрах:

$t_{01} = 20$ с: $\lambda_1 = -0.7840$, $\lambda_2 = -1.2160$; $t_{02} = 80$ с: $\lambda_1 = -0.0901$, $\lambda_2 = -1.9099$; $t_{03} = 140$ с: $\lambda_1 = -0.0710$, $\lambda_2 = -1.9290$.

Результати моделювання, наведені на рис. 2, підтверджують відповідний характер перехідного процесу.

За допомогою отриманих рівнянь визначаються параметри системи, що призводять до виникнення коливань у перехідному процесі. Наявність коливань може призвести до додаткових витрат пального а також відхилення реальних електротехнічних та економічних параметрів системи від прогнозованих. Необхідно правильно оцінити вплив зміни економічних параметрів на коливання у перехідному процесі. Відомо, що комплексно-спряжені корені характеристичного рівняння відповідають експоненційному перехідному процесу із коливальними складовими. Із рівняння (7) видно, що для наявності комплексних коренів дискримінант $D = a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3$ повинен бути меншим нуля. Повертаючись до попередніх замін:

$$\left(\frac{B}{a \cdot F}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{1}{a \cdot F} \cdot \left(\frac{B}{a \cdot F \cdot \tau} - \frac{b \cdot B}{a} + \frac{A}{t_0^2}\right)\right) < 0 ;$$

$$\left(\frac{B}{a \cdot F}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{1}{a \cdot F} \cdot \left(\frac{B}{a \cdot F \cdot \tau} - \frac{b \cdot B}{a} + \frac{A}{t_0^2}\right)\right) = \left(\frac{B}{a \cdot F}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{B \cdot t_0^2 - b \cdot B \cdot F \cdot \tau \cdot t_0^2 + A \cdot a \cdot F \cdot \tau}{(a \cdot F)^2 \cdot \tau \cdot t_0^2}\right) =$$

$$= \frac{B^2 \cdot \tau \cdot t_0^2 - 4 \cdot B \cdot t_0 + 4 \cdot b \cdot B \cdot F \cdot \tau \cdot t_0^2 - 4 \cdot A \cdot a \cdot F \cdot \tau}{(a \cdot F)^2 \cdot \tau \cdot t_0^2}$$

Враховуючи, що $(a \cdot F)^2 \cdot \tau \cdot t_0^2 = \left(a \cdot \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{\tau \cdot C_B}\right)^2 \cdot \tau \cdot t_0^2 > 0$, маємо:

$$(1 + \beta)^2 \cdot \tau \cdot t_0^2 + \frac{4 \cdot b \cdot (1 + \beta) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta \cdot t_0^2}{C_B} < 4 \cdot (1 + \beta) \cdot t_0 + \frac{4 \cdot M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{C_B} \quad (8)$$

При виконанні зазначеної умови корені характеристичного рівняння є комплексними. Із нерівності (8) отримано вираз для максимальної величини конкретних економічних параметрів системи, перевищення якої призведе до наявності коливань у перехідному процесі.

Одними із суттєвих параметрів, що мають безпосередній вплив на електро-вартісну модель енергогенеруючої системи є грошова маса M та оборотність V . Приймавши M_{\max} як максимально допустиму величину грошової маси, при якій дискримінант $D = 0$ та перехідний процес ще залишається експоненційно затухаючим отримано:

$$M_{\max} = \frac{(1 + \beta) \cdot t_0^2 \cdot (\tau \cdot C_B \cdot (1 + \beta) + 4 \cdot b \cdot \beta \cdot \eta_B \cdot \gamma - 4 \cdot C_B)}{4 \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}$$

Аналогічним чином можна отримати рівняння для граничного значення оборотності коштів V . Так, із нерівності (8) отримано максимально допустиму величину оборотності V_{\max} :

$$V_{\max} = \frac{(1 + \beta) \cdot t_0^2 \cdot (\tau \cdot C_B \cdot (1 + \beta) + 4 \cdot b \cdot \beta \cdot \eta_B \cdot \gamma - 4 \cdot C_B)}{4 \cdot M \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}$$

Для системи із параметрами, наведеними у табл. 1 отримаємо:

$$M_{\max} = 1056 \text{ грн.}, \text{ для випадку лінеаризації у околі точки } t_0 = 20 \text{ с.}$$

При перевищенні цієї величини корені характеристичного рівняння є комплексними. Наприклад, прийнявши грошову масу $M = 2000$ грн., отримано корені характеристичного рівняння $\lambda_1 = -1.0000 + 0.8869i$, $\lambda_2 = -1.0000 - 0.8869i$. Перехідний процес зміни величини P має вигляд, наведений на рис. 3.

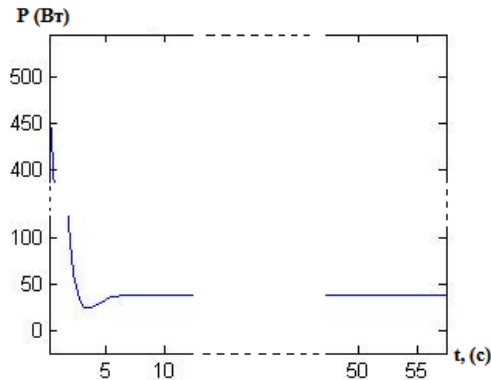


Рисунок 3 – Перехідний процес рівня потужності

Із отриманого результату моделювання випливає, що зростання кількості коливань в системі призводить до незапланованих витрат пального. Це, в свою чергу, погіршує ефективність роботи системи, оскільки тарифна ціна повинна бути скоригована відповідно.

У випадку, коли параметри системи не дозволяють повністю позбутися коливань у перехідному процесі, доцільним є зменшення коливальності. Критерій коливальності μ для випадку двох комплексно спряжених коренів визначається таким чином:

$$\mu = \frac{|\text{Im}(\lambda_1)|}{|\text{Re}(\lambda_1)|}$$

При зростанні величини μ зростає коливальність системи.

$$\lambda_1 = \frac{-(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B) + \sqrt{(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B)^2 - 4 \cdot ((1 + \beta) - b \cdot (1 + \beta) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta + \frac{M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{t_0^2})}}{2},$$

$$\text{Re}(\lambda_1) = \frac{-(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B)}{2},$$

$$\text{Im}(\lambda_1) = \frac{\sqrt{(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B)^2 - 4 \cdot ((1 + \beta) - b \cdot (1 + \beta) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta + \frac{M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{t_0^2})}}{2}. \quad (9)$$

Вважатимемо параметри β , τ та C_B сталими, позаяк змінювати їх під час роботи системи не має можливості. Із рівняння (9) видно, що зниження економічних параметрів, а саме грошової маси M або оборотності V , викличе зменшення уявної частини комплексного кореня. А це, в свою чергу, призведе до зменшення коливальності перехідного процесу і відповідного зменшення витрат палива.

Для демонстрації впливу збільшення величини грошової маси M на зростання коливань перехідного процесу було проведено моделювання із параметрами $M = 1500$ грн (рис. 4, випадок 1) та $M = 5000$ грн (рис. 4, випадок 2).

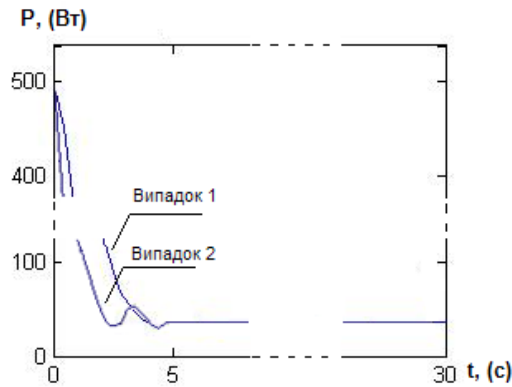


Рисунок 4 – Коливання у перехідному процесі рівня потужності

Отримані графічні результати демонструють залежність коливальності від величини грошової маси, а саме її збільшення при збільшенні величини M .

Вплив економічних параметрів на тривалість перехідного процесу. За допомогою отриманих коренів характеристичних рівнянь можна оцінити вплив економічних параметрів системи із дизель генератором на тривалість перехідного процесу при зміні рівня виробленої енергії. Тривалість перехідних процесів генератора має безпосередній вплив на економічні параметри ізолюваної системи, тобто на відхилення реальної тарифної ціни електроенергії від прийнятого статичного значення, встановленого у існуючій моделі погодинної тарифікації.

Тривалість перехідного процесу t_p обернено пропорційна величині критерія η та визначається за формулою $t_p \leq \frac{1}{\eta} \cdot \ln \frac{1}{\Delta}$ [10], де Δ – половина ширини області, при попаданні в яку перехідний процес вважається завершеним.

За інших рівних умов від системи вимагають збільшення η і зниження μ .

Для випадку дійсних коренів характеристичних рівнянь досліджуваної лінеаризованої системи критерій η чисельно дорівнює найменшому за модулем кореню із пари, тобто $\eta = \lambda_1$. Враховуючи виконані заміни:

$$\eta = \frac{-\left(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B\right) + \sqrt{\left(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B\right)^2 - 4 \cdot \left(\left(1 + \beta\right) - b \cdot \left(1 + \beta\right) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta + \frac{M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{t_0^2}\right)}}{2},$$

Із отриманого виразу видно, що збільшення величини економічних параметрів M та V викликає відповідне збільшення критерія η , а отже й зменшення тривалості перехідного процесу. На рис. 5 наведено графік перехідного процесу для потужності P при двох різних значеннях грошової маси M .

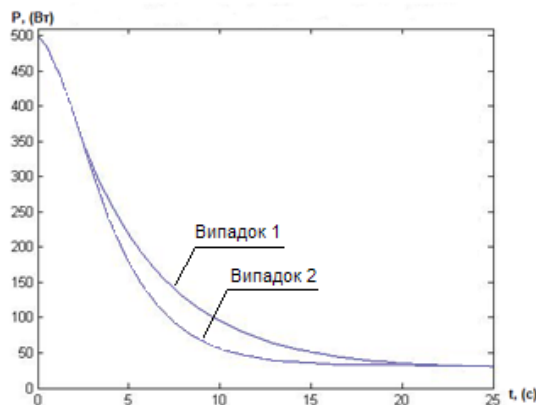


Рисунок 5 – Перехідний процес рівня потужності

У випадку 1 грошова маса $M = 300$ грн, $\eta = 0.2063$. У випадку 2, $M = 1000$ грн, $\eta = 0.7840$. Продемонстровано, що збільшення величини грошової маси, при інших сталих параметрах, призводить до зменшення тривалості перехідного процесу. Аналогічні висновки можна зробити і про залежність тривалості перехідного процесу від оборотності.

У випадку комплексних коренів характеристичного рівняння, критерій η буде дорівнювати реальній складовій комплексної величини λ_1 .

$$\eta = \operatorname{Re} \left(\frac{-(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B) + \sqrt{(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B)^2 - 4 \cdot ((1 + \beta) - b \cdot (1 + \beta) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta + \frac{M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{t_0^2})}}{2} \right) = \frac{(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B)}{2}.$$

У цьому випадку, на тривалість перехідного процесу будуть мати вплив лише такі економічні параметри системи як вартість пального C_B та коефіцієнт, обернений до прибутку системи β .

За результатами розрахунків можна стверджувати, що отримані у попередньому пункті результати демонструють вплив економічних параметрів M та V на характер перехідного процесу.

Висновки.

1. Запропоновано лінеаризовану електро-вартісну модель ізольованої енергогенеруючої системи, що дозволяє оцінювати вплив економічних параметрів системи на характер перехідних процесів.
2. Розраховані максимально допустимі параметри системи, перевищення яких викликає появу коливальних складових у перехідних процесах.
3. Дослідження впливу економічних параметрів системи на тривалість перехідних процесів демонструють, що при зміні економічних параметрів системи необхідно дотримуватися балансу між втратами, що викликані коливальними складовими, та втратами, пов'язаними із тривалістю перехідних процесів.

Список використаної літератури

1. Farideh Doost Mohammadi and Ali Feliachi. Adaptive Price Management in Hybrid Microgrid in Presence of PV and Battery Energy Storage System. – 014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, 2014.
2. Xiaohui Liang, Xu Li, Rongxing Lu, Xiaodong Lin, Xuemin Shen. UDP: Usage-Based Dynamic Pricing With Privacy Preservation for Smart Grid. – IEEE Transactions on smart grid, vol. 4, no. 1, march 2013.
3. Ледин С. В. Концепция «электроэнергия – товар» как катализатор развития Smart Grid // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 4. – С. 23–26.
4. Bordo M. D. Equation of exchange // The New Palgrave: A Dictionary of Economics, 1987, v. 2, pp. 175–177.
5. Kramer J. S. The New Palgrave: A Dictionary of Economics, 1987, v. 4, pp. 601–602.
6. Турчак Л.И. Основы численных методов. – М.: «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1987.
7. Zhuikov V., Petergerya J., Ivanin O. Electro-cost models of sources and loads for Local object power control // 10th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering", At Waplewo, Poland, 2010, Volume: 3.
8. Zhuikov V., Pichkalov I., Boyko I., Blinov I. Price formation in the energy markets of Ukraine // Electronics and Nanotechnology (ELNANO), IEEE 35th International Conference, 2015.
9. Жуйков В.Я., Бойко І.Ю. Динамічна електро-вартісна модель енергогенеруючої системи // Електроніка і зв'язок, 2016, Том 21, № 6 – С. 27 – 33.
10. Колганов А.Р., Лебедев С.К., Ханаев А.В. Математические основы теории автоматического управления: математическое пособие. – Иваново: ФБОУВПО ИГЭУ, 2010. – 2010. – 320 с.

UDC 621.314:657

V. Zhuikov, Dr. Sc. Sciences, prof.,

I. Boiko, Ph.D. student,

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

USING OF LINEARIZED ELECTRO - COST MODEL FOR A TRANSIENT PROCESSES RESEARCH IN ISOLATED GENERATING SYSTEM

On the basis of modern economic theory, taking the concept of "power as the goods" and taking into account the dynamic change of electrical parameters of the generator was created nonlinear dynamic electro - cost model of the isolated system with a diesel-generator. However, a slight deviation from the parameters of a static value can explore transient processes with using a linearized model. In the article provided the example of an isolated system consisting of a diesel generator and the consumer. In the result of a linearized mathematical model allows to investigate the impact of economic parameters on the nature of transient isolated system by changing the power level of the generator.

Key words: Smart Grid, isolated system, linearized electro – cost model, Fisher equation.

References

1. Farideh Doost Mohammadi and Ali Feliachi, "Adaptive Price Management in Hybrid Microgrid in Presence of PV and Battery Energy Storage System", 014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, 2014.
2. Xiaohui Liang, Xu Li, Rongxing Lu, Xiaodong Lin, Xuemin Shen, "UDP: Usage-Based Dynamic Pricing With Privacy Preservation for Smart Grid", IEEE Transactions on smart grid, vol. 4, no. 1, march 2013
3. S. V. Ledin, "Концепція «Electroenergija - tovar» kak katalizator razvitija Smart Grid", Avtomatizacija v promishlennosti, 2012, 4, 4.
4. M. D. Bordo, "Equation of exchange", The New Palgrave: A Dictionary of Economics, 1987, v. 2, pp. 175–177.
5. J. S. Kramer, "The New Palgrave: A Dictionary of Economics", 1987, v. 4, pp. 601– 602.
6. L. I. Turchak, "Osnovy chiselnix metodov", Moskva «Nauka», Glavnaya Redakciya Fiziko – Matematicheskoy Literatury, 1987, p. 78.
7. V. Zhuikov, J. Petergerya, O. Ivanin, "Electro-cost models of sources and loads for Local object power control", 10th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering", at Waplewo, Poland, 2010, Volume: 3.
8. V. Zhuikov V, I. Pichkalov, I. Boyko, I. Blinov, "Price formation in the energy markets of Ukraine", Electronics and Nanotechnology (ELNANO), IEEE 35th International Conference, 2015.
9. V. Zhuikov, I. Boyko, "Dunamichna Elektro-Wartisna Model Energogeneryyuchoi Sistemu" // Elektronika i zv'azok, 2016, Tom 21, № 6. – P. 27 – 33.
10. A. Kolganov, S. Lebedev, A. Hanaev, "Matematicheskie osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya: matematicheskoe posobie. – FBOUVPO IGEU, 2010. – 320 p.

УДК 621.314:657

В.Я. Жуйков, д-р. техн. наук, проф.,

И.Ю. Бойко, асп.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ ЭЛЕКТРО - СТОИМОСТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИЗОЛИРОВАННОЙ ГЕНЕРИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЕ

На основе положений современной экономической теории, принимая концепцию «электроэнергия как товар» и учитывая динамическое изменение электротехнических параметров генератора была создана нелинейная динамическая электро-стоимостная модель изолированной системы с дизель - генератором. Однако при незначительном отклонении параметров от некоторого статического значения можно исследовать переходные процессы, используя линеаризованную модель. В статье рассмотрен пример изолированной системы, состоящей из дизельного генератора и потребителя. Полученная в результате линеаризаций математическая модель позволяет исследовать влияние экономических параметров на характер переходного процесса изолированной системы при изменении уровня мощности генератора.

Ключевые слова: Smart Grid, изолированная система, линеаризованная электро – стоимостная модель, уравнение Фишера.

Надійшла 18.03.2019

Received 18.03.2019

УДК 621.31

P. Sokolovskyi., PhD student, ORCID 0000-0002-0113-4479
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
R. Sharma, PhD, Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-4260-1130
University of South-Eastern Norway, Porsgrunn, Norway

ESTIMATION OF PV SYSTEMS POWER PRODUCTION EFFICIENCY IN THE DENSE URBAN DEVELOPMENT CONDITIONS

The paper describes the preconditions for planning and building an intelligent community of Energy Smart Community. The state of RES sector development, namely, PV stations in the energy structure of the United Energy System of Ukraine, has been characterized. The features of building an Energy Smart Community architecture include an analysis of the possibilities of joining their own generating capacities as an energy component in this system. The energy and economic criteria for such type of intelligent community are described. The article analyzes the foreign experience in building and implementing Energy Smart Community in power systems on the basis as pilot projects NYSEG and SCA for its further scientific research and testing. Using the software module in the Matlab Simulink environment, we have constructed and described the work on the example of an arbitrary PV module, with its principal dependencies being distinguished from the generalized solar insolation index. The obtained data point to all the prerequisites for the possibility of widespread participation of private PV systems of power supply as the main asset of the Energy Smart Community.

Keywords: Energy Smart Community (ESC), Smart City, Smart Grid, Demand – Side Management (DSM), Energy Storage Systems (ESS), photovoltaic (PV), Virtual Power Plant (VPP), renewable energy sources (RES), prosumage, Solar Power Plant (SPP), distributed energy resources (DERs), Energy Storage System (ESS).

Introduction. Modernization and development of renewable energy, laying the foundation for its functioning, the concept of Smart Grid main provisions, encourage the study of new directions in the energy sector. Today, the use of distributed energy sources is a priority on the way to the energy independence of many countries of the world. Accelerating the implementation of Smart City, Virtual Power Plant, and Microgrid networks concepts requires research to build not only from the point of the energy component view but also considering environmental and socio-economic directions [1, 2].

Photovoltaic (PV) systems promote to increase the share of electricity production by minimizing environmental problems and applying different economic incentives for their implementation [3]. In Ukraine, solar energy is most actively implemented both on an industrial scale and among private users, due to the launch of "green tariffs" in 2008 (effective until 2030) and adoption of the bill on the transition to a new mechanism for stimulating the introduction of "green projects - auctions", as well as improvement of the investment program from partner countries in the field of development of "Green technologies" [4, 5].

According to the National Energy and Utilities Regulatory Commission (NEURC), in the first quarter of 2019, 862 MW of generating capacity was put into operation, which exceeds the capacity put into operation for the whole year 2018 (848 MW). As of April 1, in 2019, the total capacity of the RES objects put into operation was 3,166 MW. PV objects from the total volume of RES are 2070 MW (66%). Of these, 1550 megawatts account for 7550 private households [6].

The introduction and changes PV systems in consumer and economic thinking have led to the emergence and functioning of consumer models such as prosumer and prosumage in the energy system of Ukraine. This is a prerequisite for changing the basic strategy for the functioning of the energy systems and the energy market, creating new formats of interaction within the "consumer-power supply company", described in the concept of Energy Smart Community (ESC) [7].

The main objective of the ESC is to increase the use of energy on the customer side and to stabilize the work both small and regional distribution systems. As an example, the daily schedule optimization of electrical survival: reducing the power shortage in peak hours, and reducing undervalued electricity volume in the hours of "night dip", etc. The ESC concept, due to economic incentives, consumer behavioral flexibility, and the deployment of Distributed Energy Resources (DERs) and key elements in the Smart Grid technology concept, implies a gradual decrease in energy dependence from traditional energy sources. The main role in the ESC is given to the consumer investor awareness development, namely: the use of integrated system planning for the transition to effective business models in the energy sector [8].

An example of building a smart community is a pilot project, developed and implemented by the New York State Electric and Gas (NYSEG) project for exploring the potential of using smart meters and other modern technologies for upgrading energy networks. The 12400 electricity consumers in New York's Tompkins County receive the most accurate energy consumption figures data for a better understanding of their own energy consumption. Through the online software tool, access through real-time energy consumption data, power consumption warning, and power saving advice is provided through an individual access channel [9].

Another example is an autonomous power supply system built on the island of Aruba (South Caribbean). Independent energy community – Smart Community Aruba is provided on the basis of 20 buildings located in the same neighborhood (put into operation in 2017). Thanks to the tropical climate and solar activity of more than 2000 hours, and each solar power plant placement, one of the largest test stands has been built, which based on the demonstration and verification of issues are: PV systems stability, consumer behavior studies, waste issues, energy storage, and rational use in accordance with tariff policy. According to the project, it is planned to move the entire island's grid to Smart Community Aruba by 2030. At present, the combination of 20 buildings, combined with a single Smart Grid system, serves to attract investment and to check various technical and economic parameters [10].

The purpose of the work is to analyze the planning, construction, and operation of the Smart Community ESC and the peculiarities of its adaptation to the conditions of the Ukrainian energy sector development.

The main prerequisites for building the concept of Energy Smart Community.

For energy companies, one of the most pressing issues for today is the question of how to actively influence and/or respond to changes in the industry: to organize change management, actively participating in shaping their own future, or take a passive position.

Among the most significant changes in the development of society and the economy, which affect the energy industry, including the following criteria:

1. The shortage of shunting sources of electric power generation.

2. Constantly growing demands for reliability and quality of electricity supply to/from consumers, which, according to experts, in some cases, are overestimated. Not so long ago, the question of electricity supply quality was a problem only for certain categories of large industrial consumers. Today, the problem of high-quality power supply already affects all consumers: the population and communal consumers express concern, caused by emergency shutdowns, which demonstrate the insufficiently high quality of power supply. In the next 20 years, the quality of electricity will be the biggest problem in the industry [11].

3. Continuous increase in the cost of electricity around the world: despite curbing electricity tariffs policy.

4. Aging and the growing shortage of skilled human resources in the energy sector and public awareness.

5. Growth of Prosumers' stakeholder requirements to energy companies performance.

Consumer model "Prosumer" (from professional or producer + consumer - "professional consumer" or "producer-consumer") is a person or object that actively participates in the production process, conversion, distribution and consumed electricity [12]. The change in organizational forms of ownership and the market formation conditions led to a new requirements system emergence of for individual energy market players for the energy companies. Which is essential to increase the electricity supply reliability reduce operating costs, increase the income of investors, reduce the number of staffs, and so on.

6. Ecological and industrial requirements safety of the functioning of energy objects.

The above requirements (1–5) affect both the power generation and the activities of electricity and distribution companies serving as the main players that balance demand and supply. The results of this influence are manifested in climate change and global warming, growth of losses to third parties and the environment, natural resources pollution and depletion, increase of investment risks, etc.

7. Reducing system-wide costs. In its current state, most of the trunk and dispersed networks are not able to ensure the efficient a large number of small power plants (distributed generation) connection, including those operating on renewable energy sources.

Energy Smart Community in the building of modern Smart Power Systems.

An increase in the number of distributed energy sources in the system can lead to the stability breach of the power system. The combination of information and energy flows facilitates the transactional processes that carry out highly coordinated self-optimization and the ability for retail customers to effectively participate in energy and energy purchase and sale mechanisms. Thanks to the introduction of all power supply system elements by smart

modules and interface switching channels, it enables the highest level of synchronization in real time between the information exchange center and the consumer [13–14]. This approach will track the energy and financial flows of end-users through Smart House systems and management systems based on key tools for monitoring, controlling and optimizing energy use, and managing information flows [15].

The Smart Community strategy as one of the key components of the transition to Smart Grid and Smart City involves sharing by geo-location location participants, communities in the urban environment, suburbs and the private sector. This division is explained by different characteristics: electricity consumption, socio-economic differences, the density of development, private availability and/or collective generating systems.

In this paper, research on the efficiency of using private PV to cover private home energy needs of a was conducted. The choice of research objects is explained by switching possibility from energy-dependent general networks to work of the community an autonomous model.

ESC optimizes the work of a local power company, which can affect the stable operation in the power distribution system and the entire power system. Examples of implementing the interaction of the concept of ESC with other Smart energy systems are described in [16].

In fig. 1 shows the block diagram of the ESC network project.

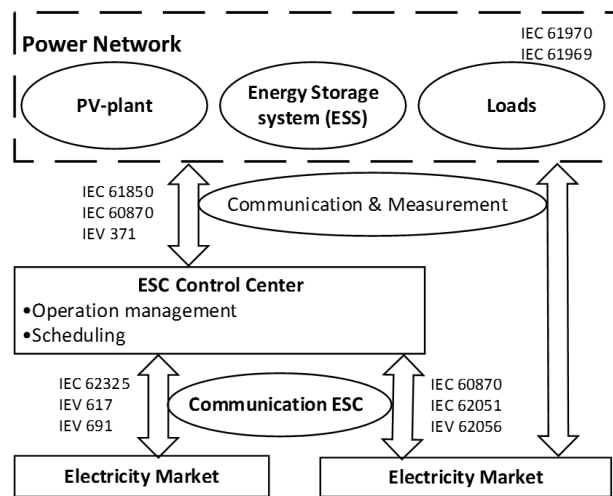
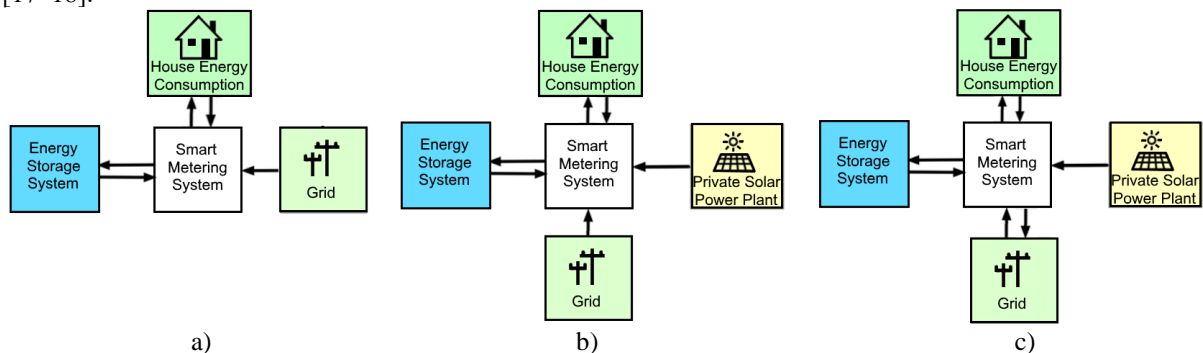


Figure 1– ESC components and influencing factors

Where on fig. 1 are standard, which are bases in building ESC: telecontrol – IEC 60870, IEV 371; communication systems in substations – IEC 6185; interface for distribution management – IEC 61968;

Energy market communication – IEC 62325; data exchange with metering equipment / electricity metering – IEC 62051 / IEC 62056; application in energy management system - IEC 61970 / 61969

Consumer Energy Modes in the Energy Smart Community structure. It is advisable to distinguish between three operation modes of households, characterized by the presence by private PV stations and/or the storage of electric energy (Fig. 2), which shows three main modes of energy supply systems functioning at home [17–18].



a) electricity consumption from the network; b) consumption with PV system + network; c) Prosumage mode (the arrows indicate the direction of the power flow) [17].

Figure 2 – Operating modes of local power supply systems with PV systems.

On Fig. 2,a while electricity consumption from the grid is presented – the base model (consumer model) is characterized by the use of ESS systems to cover peak energy needs hours and tariff incentives for energy as efficient incentives for energy saving and minimizing the cost of purchasing electricity for two- and three pond rates tariff. PV system + network consumption – describes the process of maximizing own electricity consumption from the PV station and minimizing network consumption (Prosumer) Fig. 2, b.

Prosumage mode (Fig. 2, c) describes private households with RES systems that work both for electricity consumption from the network and for its sale at the green tariffs [4], in order to maximize revenue. This regime is an example of future energy changes and requires local energy modernization infrastructure and control systems. This mode is characterized by minimal self-generation limitation and consumption from the network at the expense of the electric energy storage device, where the consumer is simultaneously a regulator. Considering full future Ukraine's power grid transition to the auction system for purchasing electricity from renewable sources, this model is most adapted due to its flexibility. The Prosumage active development in the mid-2020s is projected as a result of a reduction in cost savings systems (Energy Storage System – ESS).

In the first and second modes shown in Fig. 1, and the same Fig. 1, b., Prosumers, which reacts and influences the energy market through systematic actions and reactions aimed at minimizing costs and increasing own (and / or) collective returns. In the third mode, prosumage is a full-fledged market participant and can handle the energy generated by selling it in the electricity market at the most favorable prices. Between all structural elements of the scheme, the exchange of information on the level of consumption and generation in online mode [19].

Each of the three models can be involved in planning and constructing the Energy Smart Community's operation model, but the scenarios for their work and the boundary conditions for their involvement in energy and energy planning.

Planning and managing demand in the Energy Smart Community network.

The use of consumer demand management mechanisms overlaps Demand - Side Management (DSM) in an ESC environment built on the technical Microgrid or VPP concept provisions, mainly focused on optimal load planning of individual consumer groups, with respect to changing tariffs over the day course and considering consumer the consumers activity [20 – 21]. The re-qualification of electric energy consumers into the model agents consumer dictates the need to revise approaches to the management in the energy sector: a reorientation from Supply Chain Management - a concept focused on managing the producer companies costs - to Demand Chain Management - a concept based on the direct consumers involved in the process creating value. In the electric power industry, the basis for such re-training is the formation of a customer-oriented the electricity market model, based on the integration of prosumers and prosumage into the organizational and economic relations system [18, 22].

The emergence of Prosumer - Side Management (PSM), which based on principles of are partly duplicated by DSM, but differ in more flexible possibilities for customization set under changing network conditions. PSM is managing micro-intelligent networks way in a much more complex, volatile and energy market in real-time, controls and managers entrusted to Smart Agents. Smart Agents provide functions for controlling electricity consumption, managing and planning energy and economic activities. In the role of Smart Agents can act as consumers of three types (consumer, prosumer, prosumage), as well as intermediary companies or management companies. [23 – 25].

Prosumer - Side Management interacts with a power supply company based on a partnership agreement and integrates both ordinary consumers, both prosumer and prosumage, by advising on the energy efficiency of an individual entity or object of this energy association. The Smart Metering system allows you to accurately monitor and monitor the volume of electricity consumption and generation.

DSM and PSM should consider the availability of private sources of dispersed generation and ESS, with the limited generation prediction and accumulation of electricity due to limited weather forecasting. Therefore, it is advisable to link ESC's work with Microgrid and Virtual Power Plant's current decentralized power systems. The main task of optimization is minimizing the electricity use from the grid, and maximizing the attraction of electricity from its own generating sources.

The main expressions of the optimization task are defined as: W_G – generation volume, W_S – consumption volume, W_{RES} - generation volumes of RES, W_B – centralized generation volume. Time: $T = \sum_{j=1} t_j$;

Functioning of the system is described by the formulas for selecting electricity from sources [11]

$$W_G = \sum_{j=1} W_{G,j} ; W_{RES} = \sum_{j=1} W_{RES,j} ; W_B = \sum_{j=1} W_{B,j} ; \quad (4)$$

The following formula explains the purpose of the analysis, namely, minimization of power take-off from the main source of power supply and maximization of consumption with SPP:

$$W_{G,j} = W_{B,j} \cup W_{RES,j} \Rightarrow W_{B,j} + W_{RES,j} ; \quad (5)$$

The second goal is the calculation is to maximize the coverage of own needs at the expense of SES: $W_G \approx W_S$.

Therefore, we write for this condition (8):

$$\|W_S - W_G\| \leq \delta_w, t \in [0, T] \quad (6)$$

The formula describes consumption volumes without optimization: $W_S^{**} = \sum_j W_{S,j}^*$. For the optimization condition, we write down $W_S = \sum_j W_{S,j}$ the condition where the demand management on the consumer side DSM appears:

$$W_{S,j} = W_{S,j}^* \cup W_{DSM,j} \Rightarrow W_{S,j}^* - W_{DSM,j} \quad (7)$$

DSM management provides optimal consumer-side consumption: $W_{DSM} = \sum_j W_{DSM,j}$.

Terms of minimization of consumption and from the network is described by the formulas:

$$\sum_j W_{B,j} \rightarrow W_{B,\min}; \sum_j W_{S,j} \rightarrow W_{S,\min}; \quad (8)$$

Terms of maximizing consumption from SES and using the demand management program is described by the formulas: $\sum_j W_{DSM,j} \rightarrow W_{DSM,\max}; \sum_j W_{RES,j} \rightarrow W_{RES,\max}$;

The optimization task described by formula (11) explains the most optimal version of our system's operation, when own generation covers the maximum consumption, but the energy loss does not consider the problem:

$$\left(W_S^{(t)} - W_G^{(t)} \right) \Big|_{t \in [0, T]} = 0, \quad (9)$$

Considering these principles, it is possible to adapt them to the implementation of a future system based on PV modules, for the following conditions:

- 1) economically oriented: maximizing profits due to optimal energy sales on the electricity market.
- 2) technically oriented: loyalty to own consumption during the day and system maintenance maximization, including the reserve of energy maximization and re-shipping maximization to the market.

$$\begin{aligned} \max f(p) = & p_{pv}(t) \cdot P_{pv}(t) + p_{continuous,IH,T}(t) \cdot P_{pv,continuous,IH,T}(t) + \\ & + p_{SCR,pos}(t) \cdot P_{SCR,pos}(t) + p_{SCR,neg}(t) \cdot P_{SCR,neg}(t) + \\ & + p_{MCR,pos}(t) \cdot P_{MCR,pos}(t) + p_{MCR,neg}(t) \cdot P_{MCR,neg}(t). \end{aligned} \quad (10)$$

The main constraints are:

- 1) The profit calculation which based on income (r) depends on the option of selling in the market and costs (c) (energy costs, sales on the mortgage market).

$$p_{pv}(t) = -c_{pv}; \quad (11)$$

$$P_{continuous,IH,T}(t) = P_{continuous,IH,T}(t) - c_{continuous,IH}. \quad (12)$$

Minimum possible generation for PV, which can be used for optimization: wind coefficients, $f_{pv,\min}$ set the lower limit of the minimum generation output. They determine the process-dependent output process. The default value for PV is zero.

$$f_{pv,\min} \cdot P_{pv,forecast}(t) \leq P_{pv}(t). \quad (13)$$

The maximum possible control is that the continuous presence control reserve for specified periods (continuous control of the monitoring reserve during the day, SCR-LT intervals, SCR-HT, MR-4-hours) and the prospecting of the PV are continuous.

Primary control reserve (PCR): positive and negative.

$$P_{PCR}(t) \leq P_{pv,forecast}(t) - P_{pv}(t); \quad (14)$$

$$P_{PCR}(t) \leq P_{pv}(t) - f_{pv,min} \cdot P_{pv,forecast}(t). \quad (15)$$

Secondary control reserve (SCR): positive and negative

$$P_{SCR,pos,HT}(t) + P_{SCR,pos,NT}(t) \leq P_{pv,forecast}(t) - P_{pv}(t); \quad (16)$$

$$P_{SCR,neg,HT}(t) + P_{SCR,neg,NT}(t) \leq P_{pv}(t) - f_{pv,min} \cdot P_{pv,forecast}(t). \quad (17)$$

Minute reserve (MR): positive and negative:

$$P_{MCR}(t) \leq P_{pv,forecast}(t) - P_{pv}(t); \quad (18)$$

$$P_{MCR}(t) \leq P_{pv}(t) - f_{pv,min} \cdot P_{pv,forecast}(t). \quad (19)$$

Avoidance of multiple users to provide power control reserve: This limit determines the upper limit for the amount of control reserve that does not exceed the available power amount. This is divided into a positive and negative control reserve.

$$CR_{pos}(t) = P_{PCR}(t) + P_{SCR,pos,HT}(t) + P_{SCR,pos,NT}(t) + P_{MR,pos,4h-slice}(t); \quad (20)$$

$$CR_{pos}(t) \leq P_{pv,forecast}(t) - P_{pv}(t); \quad (21)$$

$$CR_{neg}(t) = P_{PCR}(t) + P_{SCR,neg,HT}(t) + P_{SCR,neg,NT}(t) + P_{MR,neg,4h-slice}(t); \quad (22)$$

$$CR_{neg}(t) \leq P_{pv}(t) - f_{pv,min} \cdot P_{pv,forecast}(t). \quad (23)$$

Minimum rate and increment for provision of control reserve according to market constraints: The control reserve amount can be equal to zero or a whole number, multiplied, depending on the minimum bid size and the minimum increase. The limit is presented for the primary control reserve with analog constraints for the secondary control reserve and for the remaining minutes.

The factor $y(t)$ is a binary variable to prove whether enough energy is available to provide a management reserve.

$$P_{PCR}(t) - y_{PCR}(t) \cdot P_{PCR,min}(t) \geq 0. \quad (24)$$

Restrictions on the wholesale market: According to the options discussed in this document, there is an opportunity to sell energy at the "Forward" auction, which is offered in an hour or on an uninterrupted market of the internal day offered for 15 minutes. Due to the fact that this is a planning process for the "Day ahead", market prices during the day should be considered predictable. The further limitation is that available energy should be sold on favorable terms.

$$P_{PV}(t) = P_{PV,auc}(t) + P_{pv,continuous,HT}(t). \quad (25)$$

This methodology allows the economically optimal schedule of the day ahead, regardless of the ESC size (available power units) and the impact on the power system. In future systems with a high penetration of RES, this can lead to unstable effects and system services lack. Thus, the system itself and the operator of the ESC system need system support services to handle exemplary large generation and forecast errors.

ESC technology is considered as one of the most adapted to aggregate PV systems resources at the private and commercial levels [3]. In the traditional VPP, the central authority, that is, the VPP operator (OVPP), is responsible for controlling the energy of Microgrid. MGO minimizes the cost of both distributed energy resources and the purchase of energy from the utility network, and end users typically act as passive entities provided by the microenvironment [4] [5]. Recently, the Microgrid structure being built consists of multiparty attracted more attention. The parties may include Distributed Energy Resources (DER), active end-users with flexible workloads, search users, etc. which are considered independent entities with rationality and autonomy. Therefore, when the

Microgrid architecture becomes more and technologically more complex, different parties may have different goals for the purchase, sale or electricity consumption on their own, thus the purpose of energy management is to minimize their operating costs.

Modeling the effectiveness of PV panels

The base PV model of the panel is shown in Fig. 3. One-diode model of the photovoltaic panel is represented by a photocurrent and a diode, connected to the successive and shunt supports [25].

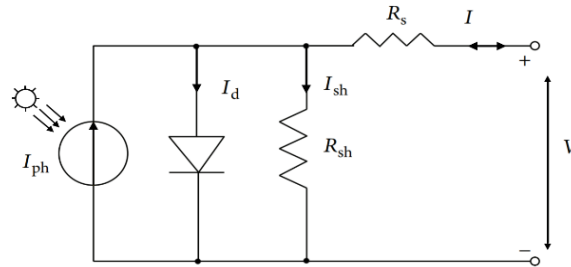


Figure 3 – PV panel equivalent circuit

The main parameters of the base PV model panel electrical circuit can be described by the following formulas:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_s \left(\exp \frac{(V + R_s I)}{AV_T} - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}}; \quad (26)$$

$$I_{ph} = I_{sc} + K_i \Delta T \frac{G}{1000}; \quad (27)$$

$$I_s = \frac{I_{sc} + k_i \Delta T}{\exp(q((V_{oc} + k_{oc}(\Delta T / AV_T)) - 1))}; \quad (28)$$

$$V_{PV} = V_i + k_v T_{PV}; \quad (29)$$

$$P_{PV} = N \cdot FF \cdot U_{PV} I_{PV}; \quad (30)$$

$$FF = \frac{I_{MPP} V_{MPP}}{I_i V_i}. \quad (31)$$

Where in equation (26): I_{PV} is output current of the panel (A), I_s is diode saturation current (A), I_{ph} is panel photocurrent (A), V is output voltage of the panel (V), A is diode's ideality factor, $V_T = N_s K T / q$ is the thermal voltage of the array with N_s cells connected in series (K is Boltzmann constant ($J \cdot K^{-1}$), T is the temperature of the $p-n$ junction, (K), q is electron charge (C)), R_s is series resistance (Ω), R_{sh} is shunt resistance (Ω).

In equation (27) I_{sc} : is the short-circuit current (A), $\Delta T = T - T_n$ (T and T_n being the actual and nominal temperatures (K), K_i the short-circuit current/temperature coefficient (K), G is solar irradiation (W/m^2).

Equation (28) is include in the equation the current and voltage coefficients k_i and k_{oc} ; V_{oc} is open-circuit voltage (V).

In equation (29) V_i is idle voltage k_v current-temperature coefficient, ($A/^\circ C$), T_{PV} is the actual temperature on the sensor of the PV module.

In equation (30) P_{PV} is output active power of the panel (Watt), FF – full factor coefficient; V_i is idle voltage; short circuit current I_{sc} ; k_v current-temperature coefficient, ($A/^\circ C$), T_{PV} is the actual temperature on the sensor of the PV module.

In equation (31) V_{MPP} is the voltage when searching for max (V) (MPPT – Maximum power point tracker); I_{MPP} is the current when MPPT (A) [26].

Therefore, in this paper, the effect of these parameters on the output panel parameters is investigated (Fig. 4).

Calculation of the solar power plant allows you to predict with high accuracy the generated volumes electricity by photo modules for the given climate specific locality conditions.

The Matlab software has enough ready-made elements in the archive of the built-in library, but they only show the general parameters. Therefore, considering the research results, for the illustration of the efficiency of the proposed complex, a simple model of the PV module, the construction of which in the Matlab Simulink environment is shown in Fig. 4. Also, the experimental scheme involves studying the electricity generation by the PV panel, depending on the uneven solar insolation distribution on the panel itself surface, based on the shading level of the PV module buildings. The system builds output volt-ampere characteristics considering this indicator.

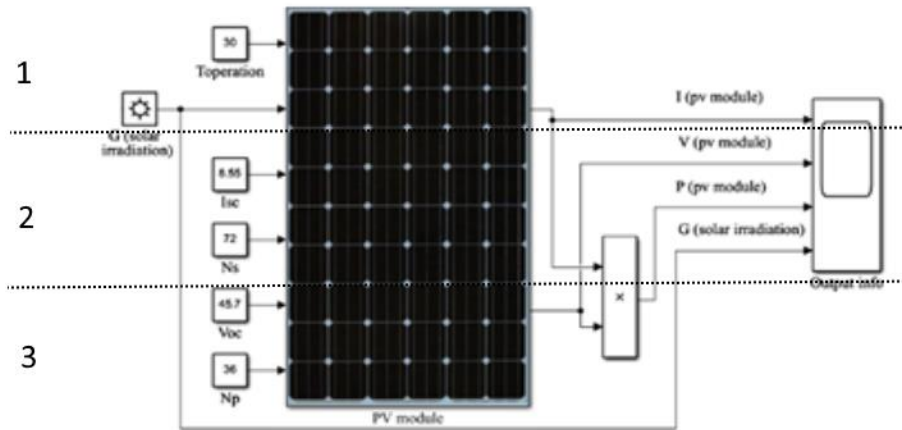


Figure 4 – PV panel Simulink model

The PV work systems require functioning analysis of PV modules different types, due to differences in materials and production technologies, as well as in operational differences. Therefore, in the simulation in the software environment, Matlab Simulink has been built universal PV program module. For further calculations, the Sundragon Model I300-72P [21] panel is selected, the main characteristics of which are given in the library of modules Simulink. It should be noted that such additional characteristics as photocurrent, diode saturation current, shunt and resistor resistance, as well as the coefficient of perfectness are not given. The dimensional and technical parameters of the PV panel were chosen based on the optimal mounting conditions for the roof building structure, with a total area of $S_{house}=85 \text{ m}^2$, with a side facing the roof facing south $S_{roof,south side}=64,8 \text{ m}^2$.

The simulation is performed in the 24-hour time zone. The solar insolation data is taken from NASA's open access site.

Significant factors that directly affect the change of the output PV module characteristics are the operating temperature and the values of solar insolation.

On Fig. 5 shows the graphs of the initial parameters and gives their main characteristics on the test day (July 2018). Shading and network losses are not counted.

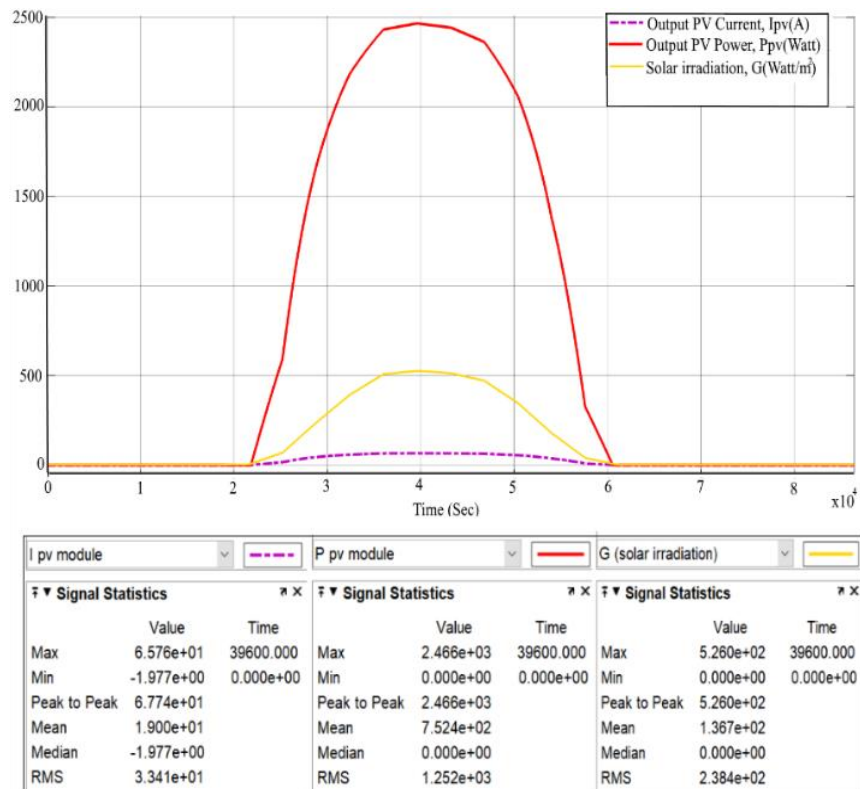


Figure 5 - PV module output data parameters

Conclusions. The preconditions for the construction and operation of Energy Smart Community systems are described. The optimizing task is the use of electricity from the power grid is determined. Communications with other smart power supply systems are described. The efficiency analysis PV modules with the help of a software module in the Matlab Simulink system is carried out. The generation independence of electric power depending on the solar insolation level influence and cross-emitting home dimming are determined.

The consumer functioning basic modes as the future key elements of a reasonable energy environment are determined. The Energy Smart Community adaptation algorithm systems at the technical and economic levels are presented. The calculations and studies made available to assess the introducing feasibility PV systems for a private household and point to their further prospect of use as additional software for conducting studies related to PV systems.

Acknowledgement

This work is part of PhD research in the frame of «Norwegian-Ukrainian cooperation on research-based education in innovative sustainable and energy efficient systems Eurasia CPEA-LT-2016/10044 Project».

References

1. S. Denysiuk, " Guidelines of technological concepts of Smart Grid in power system," Power engineering: economics, technique, ecology, vol. 1 (31), pp. 7–20, 2014.
2. A. Kirilenko and S. Denysiuk, " Modern tendencies of construction and management modes of Electroenergy networks" Energy saving. Power engineering. Energy audit, vol. 9, special. vol. T2: Power electronics and energy efficiency, pp. 82–94, 2014.
3. S. Denysiuk and D. Derevianko " A novel method of complex reliability assessment in microgrids with distributed generation", presented at International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, pp. 212–215, 2017.
4. Resolution "On the establishment of green" tariffs for electric energy for private households" Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1022-16>. Accessed on: 20.10.2018.
5. "Draft Law on Amendments to certain Laws of Ukraine on Ensuring Competitive Conditions for the Production of Electricity from Alternative Energy Sources " Available: <https://portal.rada.gov.ua>. Accessed on: 22.10.2018.
6. National Energy and Utilities Regulatory Commission: " On the status of the renewable energy sector in the first quarter of 2019" Available: <http://www.nerc.gov.ua>. Accessed on: 02.04.2019.
7. E. Omine, H. Hatta and T. Ueno, "A study of economic feasibility of Smart Community. - calculation of profit of Community Operator considering introduction of battery and co-generation systems," 2016 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Minneapolis, MN, pp. 1–5, 2016.
8. A. Ozadowicz "A New Concept of Active Demand Side Management for Energy Efficient Prosumer", Microgrids with Smart Building Technologies. Energies., vol. 10(11), p. 1771, 2017.
9. NYSEG: About the Energy Smart Community - Tompkins county, Available: <https://www.nysegsmartsolutions.com>, Accessed on: 20.03.2019.
10. "Smart Community Aruba", Available: <http://www.smartcommunityaruba.aw/about>, Accessed on: 20.03.2019.
11. S. Bracco et al., "An Optimization Model for Polygeneration Microgrids with Renewables, Electrical and Thermal Storage: Application to the Savona Campus," IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, Italy, 2018, pp. 1–6
12. E. Espe, V. Potdar and E. Chang, "Prosumer Communities and Relationships in Smart Grids: A Literature Review", Evolution and Future Directions. Energies, vol. 11. 2018.
13. R. Verschae, T. Kato and T. Matsuyama, "Energy management in prosumer communities: A coordinated approach". Energies, vol. 9, p.562, 2016.
14. S. E. Collier, "The emerging enernet: Convergence of the smart grid with the internet of things". IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 23, pp.12–16. 2017.
15. Z. Liu, Q. Wu, S. Huang and H. Zhao, "Transactive energy: A review of state of the art and implementation". In Proceedings of the 2017 IEEE Manchester PowerTech, Manchester, UK, pp. 1–6, 18–22 June 2017.
16. A. Richter, I. Hauer, M. Wolter, "Algorithms for Technical Integration of Virtual Power Plants into German System Operation", Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, vol. 3, No. 1, 135–147, 2018.
17. W.-P. Schill, A. Zerrahn and F. Kunz, "Prosumage of solar electricity: pros, cons, and the system perspective", DIW Berlin, German Institute for Economic Research, p. 36, 2017.

18. Y. Wu, J. J. Gao and L. R. Yu, "Demand chain management — The new source of profit increase," presented at 2009 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Beijing, pp. 1483–1487, 2009.
19. G. Da Silva, P. Ilic, and S. Karnouskos, "The Impact of Smart Grid Prosumer Grouping on Forecasting Accuracy and Its Benefits for Local Electricity Market Trading." IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5(1), pp 402–410, 2014.
20. A. Keshtkar, S. Arzanpour and F. Keshtkar, "Adaptive residential demand-side management using rule-based techniques in Smart Grid environments". Energy Build, vol.133, pp. 281–294, 2016.
21. S. Parvathy, N.R. Patne and A.M. Jadhav, "A smart demand side management mechanism for domestic energy consumers with major HVAC load". In Proceedings of the 2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), Bhopal, India, pp. 504–511, 14–16 December 2016.
22. S. Denysiuk, R. Strzelecki and V. Opryshko, "The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations" Power engineering: economics, technique, ecology, vol. 4 (46), pp. 7–17, 2016
23. A. Amato, B. Di Martino, and S. Venticinque, "Semantically augmented exploitation of pervasive environments by intelligent agents," in ISPA. IEEE, pp. 807–814, 2012.
24. H. Lu, K. Huang, M. Azimi, Guo L. Blockchain technology in the oil and gas industry: A review of applications, opportunities, challenges, and risks IEEE Access, vol.7, 2019
25. A. Ozadowicz and J. Grela, "An event-driven building energy management system enabling active demand side management" In Proceedings of the 2016 Second International Conference on Event-based Control, Communication, and Signal Processing (EBCCSP), Krakow, Poland, pp. 1–8, 13–15 June 2016.
26. M. Rasheed, N. Javaid, M. Awais, Z. Khan, U. Qasim, N. Alrajeh, Z. Iqbal and Q. Javaid, Real time information-based energy management using customer preferences and dynamic pricing in smart homes". Energies, vol. 9, p. 542, 2016.
27. Lilis, G.; Conus, G.; Asadi, N.; Kayal, M. Towards the next generation of intelligent building: An assessment study of current automation and future IoT based systems with a proposal for transitional design. Sustain. Cities Soc. 2017, 28, 473–481.

УДК 621.31

П.В. Соколовський, PhD студент ORCID 0000-0002-0113-4479

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

Р. Шарма, PhD, доц. ORCID 0000-0003-4260-1130

Університет Південно-Східної Норвегії, Порсгрунн (Porsgrunn)

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ PV СИСТЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЄЮ В УМОВАХ ЩІЛЬНОЇ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ

В роботі описані передумови для планування та побудови розумного співтовариства Energy Smart Community. Охарактеризовано стан розвитку сектора ВДЕ, а саме PV станції в енергетичній структурі Об'єднаної енергетичної системи України. Особливості побудови архітектури Energy Smart Community передбачає аналіз можливостей приєднання власних генеруючих потужностей в якості енергетичної складової цієї системи. Описані енергетичні та економічні критерії такого приєднання. Проаналізовано наведено іноземний досвід побудови та впровадження Energy Smart Community в енергетичні системи на основі пілотних проектів NYSEG та SCA для подальшого його наукового дослідження та випробування. Звикористанням програмного модуля в середовищі Matlab Simulink побудовано та описано роботу на прикладі довільного PV модуля з виділенням його основних залежностей від узагальненого показника сонячної інсоляції. Отримані дані вказують на всі передумови можливості широкої участі приватних PV систем забезпечення електроенергією в якості основного активу функціонування Energy Smart Community

Ключові слова: Energy Smart Community (ESC), Smart City, Smart Grid, Demind – Side Management (DSM), Energy Storage Systems (ESS), photovoltaic (PV), Virtual Power Plant (VPP), renewable energy sources (RES), prosumage, Solar Power Plant (SPP), distributed energy resources (DERs), Energy Storage System (ESS).

Надійшла 18.02.2019

Received 18.02.2019

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 622.613.124; 662.87.001

Л.О. Кесова, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-3060-8645
Ю.М. Побіровський, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-2786-6499
П.П. Меренгер, ст. викл., ORCID 0000-0003-3969-2270

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИБІР МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ВИТРАТИ ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ НА ПАЛЬНИКИ ДІЮЧИХ КОТЛІВ ТЕС ПРИ РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ПИЛОПОДАЧІ В УМОВАХ ЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Наведено результати досліджень методів з контролю витрати вугільного пилу на пальники котлів ТПП-210А енергоблоку 300 МВт при традиційній і висококонцентрованій пилоподачі з використанням гідродинамічного та теплового методів. Гідродинамічний метод контролю витрати пилу може бути застосований на котлах різної потужності. Тепловий метод контролю має достатньо високу точність визначення витрати палива на пальники, сигнал по температурі аеросуміші має високі статичні та динамічні характеристики. На базі теплового методу розроблена та впроваджена автоматична система регулювання (АСР) пилоподачею на котлах ТПП-210А Трипільської ТЕС (Тп ТЕС). АСР може використовуватися для стабілізації подачі палива на пальники при різних технологіях пилоподачі.

Ключові слова: котел, пилоподача, витрата, вугільний пил.

Вступ

Ефективність спалювання вугільного пилу в котлах теплових електричних станцій (ТЕС) істотно залежить від нерівномірності розподілу його по пальниках, що призводить до пульсацій тиску, неможливості підтримки співвідношення «паливо-повітря». Збурювання в системі пилоподачі викликають коливання надлишку повітря в пальниках, підвищення утворення оксидів сірки і азоту, інтенсифікують процеси шлакування та абразивно-корозійного зношування екранних поверхонь нагрівання, погіршують рідке шлаковидалення, тому дослідження методів вимірювання вугільного пилу є задачею першочергової важливості [1, 2].

Постановка задачі

Метою роботи є проведення досліджень та обґрунтування методів контролю витрат вугільного пилу на пальники діючого двокорпусного котла ТПП-210А енергоблоку 300 МВт при традиційному пневмотранспорті ($\mu=0,5$ кг/кг, $D_p=500$ мм) і висококонцентрованій пилоподачі ($\mu=(70-200)$ кг/кг, $D_p=80$ мм). Дослідження показали, що при традиційному пневмотранспорті в діапазоні навантажень енергоблоку $N_e=(240-300)$ МВт нерівномірність розподілу палива по пальниках досягає 60%, а контроль витрати палива з метою усунення нерівномірності можливо здійснювати гідродинамічним і тепловим методами. Методи відрізняються достатньою точністю, надійністю, нескладним приладовим оснащенням, незначними капіталовкладеннями і можливістю використання в умовах експлуатації котлів ТЕС.

Результати досліджень

Гідродинамічний метод дозволяє визначати витрату вугільного пилу за аеродинамічним опором ділянок пилопроводів і зводиться до розрахунку витрати пилоподібного палива за формулою [2]:

$$B_{пл} = \mu \cdot Q_n, \quad (1)$$

де Q_n – витрата первинного повітря на пальник, кг/с; μ – масова концентрація вугільного пилу в потоці повітря, кг/кг.

Встановлено, що при наявності вугільного пилу в пилопроводі витрати первинного повітря і вугільного пилу змінюються в протифазі та про витрату палива можна судити по витраті первинного повітря який транспортує пил, що підтверджується залежністю витрати первинного повітря від концентрації пилу (рис. 1).

© Л.О. Кесова, Ю.М. Побіровський, П.П. Меренгер, 2019

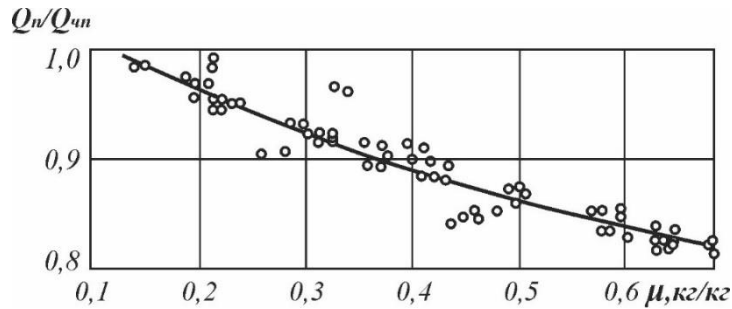


Рисунок 1 – Залежність зміни відносної витрати первинного повітря від концентрації пилу (експериментальні дані), де Q_{un} – витрата первинного повітря на пальник без палива (чисте повітря)

На ТЕС контроль витрати повітря звичайно здійснюється штатними засобами (наприклад, за перепадом тиску на трубах Вентурі, встановлених в пилопроводах), а точність розрахунку за формулою (1) визначається точністю експериментального визначення концентрації вугільного пилу. Будь-які зміни подачі пилу впливають на витрату повітря і швидкість аеросуміші в пилопроводах. Залежність перепадів тиску на трубах Вентурі котла ТПП-210А від ступеня відкриття регулювальних клапанів пиложивильників (УП) наведена на рис. 2.

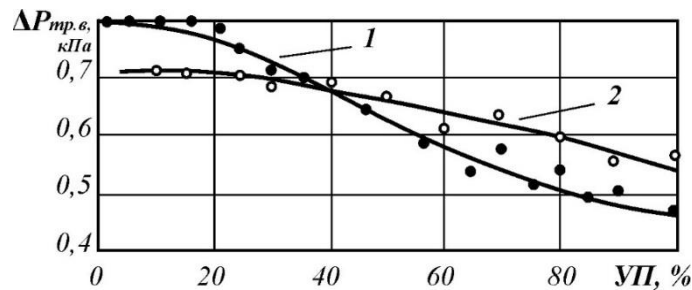


Рисунок 2 – Залежність перепаду тиску на трубах Вентурі пилопроводів котла ТПП-210А Тп ТЕС (котел №3Б): 1 – пилопровід №4; 2 – пилоповід №6

Оскільки перепади тисків у пилопроводах при зміні витрати пилу змінюються несуттєво, розрахунок витрати палива можна виконувати за спрощеною методикою [2, 3], а масову концентрацію вугільного пилу визначати з залежності виду:

$$\mu = H_o^n / H_o - 1, \quad (2)$$

де H_o^n , H_o – динамічний напір потоку повітря при відсутності пилу і при його наявності в пилопроводі, відповідно, $\text{кг}/\text{см}^2$.

Таким чином, при використанні гідродинамічного методу визначення витрати палива зводиться до вимірювання витрати первинного повітря, його температури і тиску на вході в пилопровід, а також (для визначення H_o^n) до проведення експериментальної оцінки розподілу повітря по пилопроводах котла при відключених пиложивильниках. Узагальнення даних, що отримані у дослідженнях на котлі ТПП-210А, дозволило для розрахунку концентрації вугільного пилу в пилопроводі на пальник запропонувати залежність виду:

$$\mu = (Q_n^m / Q_n - 2,36)^2 - 1,74, \quad (3)$$

де Q_n^m – витрата запиленого повітря при працюючому пиложивильнику, $\text{кг}/\text{с}$; Q_n – витрата чистого повітря в пилопроводі (при відключеному пиложивильнику і повністю відкритому повітряному шибері), $\text{кг}/\text{с}$.

Похибка визначення концентрації вугільного пилу не перевищує $\pm 5\%$, достовірність похибки підтверджена багаторазовими вимірами витрат первинного та вторинного повітря на корпусі котла ТПП-210А Тп ТЕС в умовах експлуатації, тому гідродинамічний метод можна вважати робочим і використовувати в автоматизованій системі регулювання (АСР) пилоподачі.

Тепловий метод дозволяє визначати витрату вугільного пилу в пилопроводі за ступенем

охолодження первинного повітря, що транспортує пил в пальник [1, 3]. Витрата палива B_{nl} (кг/год) на пальник розраховувалася за залежністю, яка отримана з рівняння теплового балансу пилопроводу:

$$B_{nl} = \frac{3600 \cdot Q_n^m \cdot c_n \cdot (t_{z,n} - t_{cm}) - Q_{em}}{c_{nl} \cdot (t_{cm} - t_{nl})}, \quad (4)$$

де, крім раніше зазначених величин, C_n, C_{nl} – теплоємність повітря і пилу, відповідно, кДж/кг; Q_{em} – втрати тепла в навколишнє середовище, кДж/год; $t_{z,n}, t_{cm}, t_{nl}$ – температури гарячого первинного повітря, пиловугільної аеросуміші, вугільного пилу, відповідно, °С.

Для виміру температури пиловугільної аеросуміші важливо правильно вибрати місце установки термоперетворювача (ТП) на пилопроводі.

Втрати тепла в навколишнє середовище визначалися за перепадом температур на початку і кінці пилопроводу при відключеному пиложивильнику:

$$Q_{em} = 3600 \cdot Q_n^m \cdot c_n \cdot (t'_{z,n} - t''_{z,n}), \quad (5)$$

де $t'_{z,n}, t''_{z,n}$ – температура первинного повітря на початку і кінці пилопроводу, відповідно, °С.

Дослідження показали, що представницький і малоінерційний сигнал по температурі аеросуміші можна одержати при встановленні ТП у тонкостінній гільзі у вигині трубопроводу – по бісектрисі, з боку внутрішньої поверхні повороту, де вугільні частки під впливом відцентрових сил віджимаються в напрямку зовнішнього радіуса гнуття. У внутрішнього радіуса з'являється чиста зона, що розширюється з ростом кута повороту коліна, де частки пилу відсутні і ТП зношуванню не піддається. Крім того, дослідження цього методу на котлі ТПП-210А показали, що при традиційному пневмотранспорті вимір температури аеросуміші варто робити не у пальника, як рекомендується в [1], оскільки значення температури при цьому зростає за рахунок випромінювання з топки десь на ~8 °С. Тому для одержання надійного сигналу по витраті палива на пальники котла при традиційному пневмотранспорті пилу від лопатевих пиложивильників були оцінені характеристики системи пилоподачі за непрямими показниками: перепаду тиску на витратомірному соплі; опорам пилового змішувача і пилопроводу; температурам аеросуміші за змішувачем і перед пальником.

Випробування проводилися при дистанційному керуванні подачею палива, що дозволило враховувати випадкові зміни його витрати і знехтувати їх впливом на характеристики взаємозв'язків у автоматичній системі регулювання [1, 3, 4]. Оскільки характеристики пилоповітряного потоку (щільність, температури гарячого повітря і пилу, теплоємності пилу і повітря) у широкому діапазоні навантажень енергоблоку змінюються несуттєво, їх необхідно усереднити і формула (4) для розрахунку витрати палива на пальник має вигляд:

$$B_{nl} = \frac{1952,7 \cdot \sqrt{\Delta P_n} \cdot (300 - t_{cm})}{(t_{cm} - 105)}, \quad (6)$$

де ΔP_n – перепад тиску на трубці Вентурі.

Оцінка представництва непрямих показників витрати палива для розробки АСР виконувалася методами математичної статистики і теорії ймовірності (регресійний аналіз, кореляційні функції). Дослідженнями встановлено, що найвищий коефіцієнт кореляції з витратою палива в пилопроводі дає зв'язок B_{nl} з температурою аеросуміші за пиловим змішувачем ($r=0,8-0,9$). Такі якісні показники витрати, як опір пилових змішувачів і пилопроводів, менш представницькі і більше піддаються впливу різних перешкод (зміна якості палива, характеру витікання пилу з бункера, витрати первинного повітря) [1].

Важливим фактором при рішенні поставленого завдання був вибір місця і способу установки ТП, що забезпечують представництво і безінерційність сигналу. Виміри показали, що температурна й гідродинамічна стабілізація потоку аеросуміші при традиційному пневмотранспорті пилу наступають на відстані ~5–8 діаметрів пилопроводу D_y , ~500 мм від точки змішування вугільного пилу з первинним повітрям, де процес змішування пилу з ним вже закінчено та має місце тепла стабілізація потоку аеросуміші [1]. Тому досліджено використання на пилопроводах котла ТПП-210А термопар із оголеним гарячим спаєм в спеціальних бобишках. Така установка ТП дозволила одержати сигнал з гарними статичними та динамічними характеристиками (стала часу – в межах 20–30 с). Крім того, зміна сигналу в часі стала плавною, чіткою; вплив збурень незначним. Гарна статика і динаміка температурного сигналу дозволили рекомендувати його для цілей автоматизації пилоподачі та рівномірності розподілу палива по пальниках (впроваджено на 8-ми корпусах котла ТПП-210А Тп ТЕС) [5]. Порівняння результатів досліджень і розрахунків B_{nl} у пилопроводах гідродинамічним і тепловим методами показало достатньо

гарне узгодження їх в експлуатаційних умовах і можливість використання в АСР пилоподачі на пальники котлів з забезпеченням рівномірності розподілу пилу і температури в топці [3, 5].

Статистичний аналіз зв'язку витрати палива в пилопроводах з непрямими показниками дозволив віддати перевагу за чутливістю до зміни витрати вугільного пилу, експлуатаційної надійності перетворювача, простоти його конструкції й зручності експлуатації сигналу за температурою аеросуміші за змішувачем пилу [4].

Розробка системи подачі пилу з високою концентрацією під тиском (ПВК_Т) для котла ТПП-210А, обладнаного аераційними пиложивильниками, вимагала спеціальних досліджень для визначення можливостей використання теплового методу контролю витрати палива на пальники котлів при новій технології пилоподачі [1].

Для забезпечення представницького сигналу по температурі аеросуміші був застосований ежекторний змішувач – новий вузол введення висококонцентрованої аеросуміші в пилопровід первинного повітря (рис. 3).

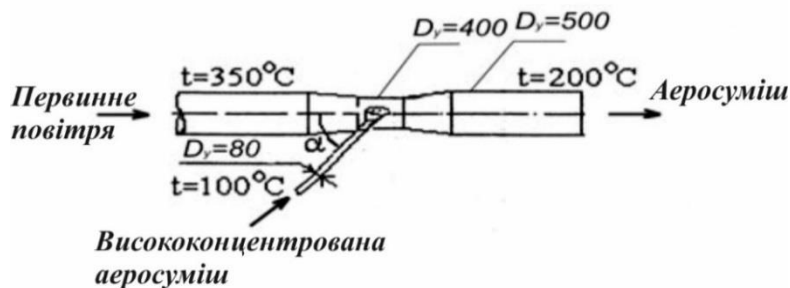


Рисунок 3 – Ежекторний змішувач – вузол введення аеросуміші з високою концентрацією в пилоповід первинного повітря при ПВК_Т

Пилоповід $D_{\text{в}}=80$ мм ПВК_Т врізаний у звужену частину ежекторного змішувача, що забезпечує ефект інжектування, розкриває струмінь пилоповітряного потоку перед пальником, здійснюючи швидкий і рівномірний прогрів пилу і забезпечуючи рівномірність її розподілу в перетині пилоповіду $D_{\text{в}}=500$ мм.

На рис. 4 наведені поля температур пилувугільної аеросуміші перед пальником №6 (корп. ЗБ котел ТПП-210А), зняті спеціальним рухливим термозондом на відстані 1,5–2 діаметри трубопроводу первинного повітря від кінця дифузора ежекторного змішувача і на тій же відстані, але без ежекторного змішувача.

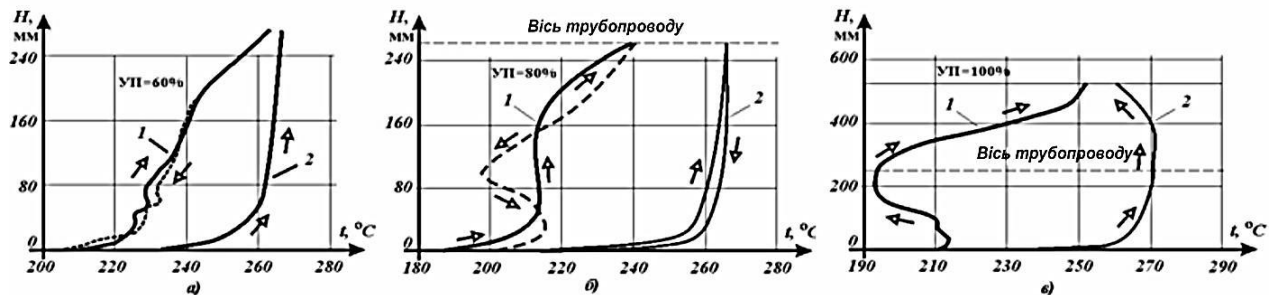


Рисунок 4 – Поля розподілу температури аеросуміші в пилоповоді перед пальником при різних ступенях відкриття регулюючого органу (УП, %) аеропиложивильника [6]:

а) УП=60%; б) УП=80%; в) УП=100%,
1 – без ежекторного змішувача; 2 – з ежекторним змішувачем

Встановлено, що при відсутності ежекторного змішувача (поз. 1) поле температур у перетині пилоповіду нерівномірне, розвірка температури становить (10–30) °C. Використання ежекторного змішувача дозволило на відстані 1,5–2 діаметри трубопроводу від кінця його дифузора вирівняти поля розподілу температури по перетині каналу (поз. 2), що свідчить про наявність перед пальником гідродинамічної й теплової стабілізації потоку пилувугільної аеросуміші, що забезпечує показовість сигналу по її температурі, який вводиться в АСР котла.

Для захисту «гарячого» спаю термопари від абразивного стирання використані малоінерційні абразивостійкі чохла із карбіду кремнію, розраховані для роботи в середовищах з температурою до

1000 °С, з поглибленням їх у потік аеросуміші на 100 мм. Оскільки при змінних режимах роботи енергоблоку відбувається зміна полів розподілу температури аеросуміші по перетину пилопроводу, рекомендоване деяке заглиблення ТП [6].

Дослідження динамічних властивостей сигналу по температурі аеросуміші за ежекторним змішувачем показали, що запізнювання сигналу становить $\tau_{\text{зан}} \approx 2,5$ с, а інерційність не перевищує (30–60) с. Переміщення регулювального клапана АПЖ займає до 10 с; це запізнювання в перехідній характеристиці на динамічні властивості об'єкта істотно не впливає [6].

Виконані КПП ім. Ігоря Сікорського дослідження для технології ПВК_т дозволили розробити систему автоматичного регулювання пилоподачею з сигналом по температурі аеросуміші, експлуатація якої на протязі більш 20 років на котлах ТПП-210А Трипільської ТЕС показала надійність і високу чутливість до зміни витрати палива на пальники при змінних навантаженнях енергоблоків [1, 2, 6, 7].

Висновки

1. Гідродинамічний метод контролю витрати вугільного пилу в пилопроводах відрізняється технологічною простотою і може бути реалізований на котлах будь-якої потужності.

2. Найкращі статистичні та динамічні властивості має АСР з сигналом по температурі аеросуміші за змішувачами пилу (вимірюється термопарою з оголеним «гарячим» спаєм: при традиційному пневмотранспорті на відстані 5–8 діаметрів, при ПВК_т – на відстані 1,5–2,0 діаметра від кінця дифузора ежекторного змішувача пилопроводу первинного повітря D_p –500 мм).

3. Тепловий метод контролю витрати пилоподібного палива на пальники котла має достатньо високу точність (похибка $\pm 5\%$).

4. Сигнали по температурі аеросміші в пилопроводах можуть бути використані в АСР стабілізації подачі палива на пальники котлів з різними технологіями пилоподачі і роботі на змінних навантаженнях.

Список використаної література

1. Шницер И.Н. Технологии сжигания топлива в пылеугольных котлах / С.-Петербург.– Энергоиздат, 1994.– 284 с.

2. Контроль и автоматическое управление пылеподачей на ТЭС / Л.А. Кесова. – К.: Вища шк., 1991.– 142 с. – ISBN 5-11-002122-8.

3. Кесова Л.А., Шиллинг В. О гидродинамике пылепроводов тепловых электростанций // Теплоэнергетика, 1978.– №9.– С. 46–48.

4. Кесова Л.А., Георгиев А.В., Черезов Н.Н. Контроль и автоматическое управление подачей угольной пыли высокой концентрацией на горелках котла ТПП-210А // “Енергетика и електрифікація”, 2001.– №2, с. 17–21.

5. Л.А. Кесова, Хоанг Тьен Зунг, Ю.Н. Побировский / Контроль расхода угольной пыли на горелки котла, оборудованного системой пылеподачи высокой концентрации // Промышленная теплотехника, 1996.– №9, т.16.– с. 44–48.

6. Разработка, исследование, внедрение и опыт эксплуатации системы высококонцентрированной пылеподачи (под давлением) котлов ТПП-210А Трипольской ТЭС / Кесова Л.А., Черезов Н.Н., Георгиев А.В. и др. К.: О-во "Знание Украины", 2001.– 96 с.

7. Кесова Л.О., Меренгер П.П., Побіровський Ю.М. Методи контролю витрати вугільного пилу на пальники котлів ТЕС / «Метрологія, інформаційно-вимірні технології і системи» (МІИТС-2017): Тезиси докладів VI Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків, 2017. – с. 62–63.

L. Kesova, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-3060-8645

Yu. Pobirovsky, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2786-6499

P. Merenger, Assis. Prof., ORCID 0000-0003-3969-2270

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

RESEARCH AND SELECTION OF METHODS FOR CONTROLLING COAL DUST CONSUMPTION ON BURNERS OF EXISTING HPSS IN DIFFERENT A DUST FEED TECHNOLOGIES UNDER VARIABLE LOAD CONDITIONS.

The results of studies of hydrodynamic and thermal methods for controlling the consumption of coal dust on burners for boilers TPP-210A, power unit 300 MW are presented. Two technologies of coal dust supply are considered: traditional and highly concentrated. The hydrodynamic method of controlling the dust consumption can be used on boilers of any steam generating capacity; it makes it possible to determine the consumption of coal dust by the aerodynamic resistance of the dust pipe. It has been established that the amount of dust in the dust pipe affects the flow of primary air to the burner, this allows judging by its share in the dust-air stream about fuel consumption and regulating the flow of coal dust to the boiler burners. Calculated dependencies were obtained for estimating the consumption of coal dust. The advantage of the method is that its implementation uses standard boiler instruments. The results of operation showed that the method can be applied in the system for regulating the supply of coal dust to the burners. The thermal method determines the flow of dust to the burner according to the degree of cooling of the primary air with coal dust in the dust pipe. The method is investigated on the operating boiler. It is important to choose the location and method of installation of the thermal receiver to obtain the correct signal from the air mixture temperature. To work on a highly concentrated supply of coal dust, a special ejector mixer was developed and the dependence of the consumption of coal dust on the temperature of the air mixture was obtained. This control method has a fairly high accuracy in determining the fuel consumption on burners, and the signal based on the air mixture temperature has good static and dynamic characteristics. On the basis of the thermal method, an automatic control system (ACS) for the supply of coal dust on the TPP-210A boilers of the Trypils'ka TPP has been developed and implemented. ACS can be used to regulate the supply of fuel to the burners with various technologies for the supply of coal dust.

Keywords: boiler, supply of coal dust, consumption, air mixture.

References

1. Shnitser I.N. Tekhnologii szhiganiya topliva v pyleugol'nykh kotlakh / S.-Peterburg.– Energoizdat, 1994.– 284 s.
2. Kontrol' i avtomaticheskoye upravleniye pylepodachey na TES / L.A. Kesova. – K.: Vishcha shk., 1991.– 142 s. – ISBN 5-11-002122-8.
3. Kesova L.A., Shilling V.O gidrodinamike pyleprovodov teplovykh elektrostantsiy // Teploenergetika, 1978.– №9.– S. 46–48.
4. Kesova L.A., Georgiyev A.V., Cherezov N.N. Kontrol' i avtomaticheskoye upravleniye podachey ugol'noy pyli vysokoy kontsentratsiyey na gorelках kotla TPP-210A // “Energetika i elektrifikatsiya”, 2001 №2.– s. 17–21.
5. L.A.Kesova, Khoang T'yen Zung, YU.N.Pobirovskiy / Kontrol' raskhoda ugol'noy pyli na gorelki kotla, oborudovannogo sistemoy pylepodachi vysokoy kontsentratsii // Promyshlennaya teplotekhnika, 1996.– №9, t.16.– s.44–48.
6. Razrabotka, issledovaniye, vnedreniye i opyt ekspluatatsii sistemy vysokokontsentrirrovannoy pylepodachi (pod davleniyem) kotlov TPP-210A Tripol'skoy TES / Kesova L.A., Cherezov N.N., Georgiyev A.V. i dr. K.: O-vo “Znaniye Ukrainy”, 2001.– 96 s.
7. Kêsova L.O., Merenger P.P., Pobirovskiy YU.M. Metodi kontrolyu vitrati vugil'nogo pilu na pal'niky kotliv TES / «Metrologiya, informatsionno-izmeritel'nyye tekhnologii i sistemy» (MIITS-2017): Tezisy dokladov VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. – Khar'kov, 2017. – s. 62–63.

Л.А. Кесова, доктор техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-3060-8645
Ю.Н. Побировский, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-2786-6499

П.П. Меренгер, ст. преп., ORCID 0000-0003-3969-2270

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени
Игоря Сикорского»

ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОР МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ РАСХОДОВ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА ГОРЕЛКУ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОТЛОВ ТЭС ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ПЫЛЕПОДАЧИ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК

Приведены результаты исследований методов контроля расхода угольной пыли на горелки котлов ТПП-210А энергоблока 300 МВт при традиционной и высококонцентрированной системах пылеподачи с использованием гидродинамического и теплового методов. Гидродинамический метод контроля расхода пыли может быть применен на котлах разной мощности. Тепловой метод контроля имеет достаточно высокую точность определения расхода топлива на горелки, сигнал по температуре аэросмеси имеет высокие статические и динамические характеристики. На базе теплового метода разработана и внедрена автоматическая система регулирования (АСР) пылеподачи на котлах ТПП-210А Трипольской ТЭС. АСР может использоваться для стабилизации подачи топлива на горелки при различных технологиях пылеподачи.

Ключевые слова: котел, пылеподача, расход, угольная пыль.

Надійшла 16.02.2019
Received 16.02.2019

УДК 621.43.056

Г.Б. Варламов, док. тех. наук, проф., ORCID 0000-0002-4818-2603

К.О. Романова, канд. тех. наук, ст. вик., ORCID 0000-0001-9738-3383

М.С. Мухін, магістр, ORCID 0000-0002-8961-6543

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

АЕРОДИНАМІЧНІ ТА ТЕПЛОВІ ПЕРЕВАГИ РОБОТИ КАМЕР ЗГОРАННЯ ГАЗОВИХ ТУРБІН ПРИ ЗАСТОСУВАННІ МІКРОФАКЕЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ГАЗОСПАЛЮВАННЯ

З використанням 3-Д моделювання досліджено аеродинамічні, сумішоутворювальні та теплові особливості організації процесу спалювання у камері згорання газотурбінної установки газоперекачувального агрегату типу ГТК-10 зі штатними пальниками. На основі аналізу комплексу характеристик обґрунтовано необхідність, розроблено та впроваджено нову конструкцію пальникової системи для ГТК-10 на основі нової мікрофакельної технології газоспалювання, доведено переваги застосування МТС-пальників для інтенсифікації процесів сумішоутворення та спалювання палива у камері згорання із досягненням високого рівня енергоефективності та екологічної чистоти енергоперетворень.

Ключові слова: аеродинаміка, газова турбіна, камера згорання, спалювання газу, мікрофакельна технологія, енерго-екологічна ефективність

Вступ

Прагнення України інтегруватися у Європейський Союз (ЄС) мотивує підприємства здійснити певні кроки щодо покращення екологічних показників енерговиробництва, оскільки цього вимагають законодавчі документи ЄС. Під впливом введення нормативно-правових документів відповідно до Директив ЄС [1,2] перед підприємствами, що використовують в енергетичних установках органічне паливо, стоїть завдання покращення якості роботи теплоенергетичного обладнання із забезпеченням високих показників енергетичної ефективності і екологічної чистоти під час його експлуатації. Відповідно до Закону України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» [3] стає пріоритетним питання захисту довкілля, запровадження екологічно безпечних, ресурсо- та енергозберігаючих технологій.

Досягнення необхідних показників експлуатації енергетичного обладнання за вимогами Директив ЄС та Закону України можливо двома шляхами: перший шлях-проведення реконструкції джерел енерговиробництва чи заміна застарілого устаткування на нове, більш енергоефективне; другий шлях-здійснення модернізації паливоспалювального обладнання, яке є основним джерелом екологічного забруднення довкілля та надмірних питомих витрат органічного палива (природного газу).

Перший шлях має певні переваги перед другим, а саме: можливість реалізації комплексних якісних змін в умовах експлуатації обладнання з впровадженням комплексної автоматизації усіх аеродинамічних та теплоенергетичних процесів, покращення енергетичних, екологічних та економічних показників діяльності підприємства з одночасним підвищенням безпечних та санітарно-гігієнічних умов роботи персоналу. Недоліком цього шляху є висока вартість капіталовкладень, довгий термін його реалізації від початку проектування, узгодження проекту, закупівлю обладнання, монтажу, пуско-налагоджувальних робіт і здачі в експлуатацію усього обладнання у комплексі та значний термін окупності, який може перевищувати традиційний показник для енергетики у 12 років.

Перевагою другого шляху є можливість здійснення короткотермінової модернізації головних частин енергоустаткування без суттєвих капіталовкладень, без особливих узгоджень та досягненням тих самих енерго-екологічних показників експлуатації, що й у першому шляху.

Враховуючи дефіцит та обмеження у розмірах та доступності фінансових ресурсів для промислових підприємств майже для усіх галузей економіки країни найбільш реалістичним та перспективним виступає другий шлях покращення енерго-екологічних показників експлуатації енергогенеруючого обладнання із застосуванням органічних видів палива.

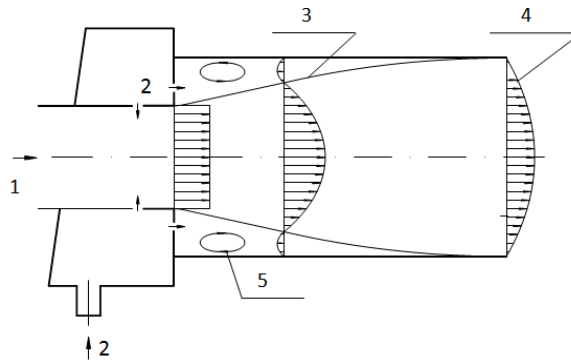
З цією метою підприємствам пропонується проводити модернізацію енергетичного устаткування з використанням сучасної високоефективної мікрофакельної технології спалювання газоподібного палива любого походження.

Властивості МТС-технології, її універсальність та уніфікованість

Для парових, водогрійних котлів чи газотурбінних, газопарових або газокompресорних установок, що працюють на природному газі, необхідним є дотримання комплексу вимог до паливкових систем, а саме: надійність у роботі, стійкість запалювання і стабілізація фронту горіння в широких межах, забезпечення сумішоутворення заданої інтенсивності, висока енерго-екологічна ефективність, ремонтпридатність та здатність працювати у різних режимах навантаження із забезпеченням надійності та високоякісних показників енергетичної ефективності та екологічної безпеки [4]. Не усі існуючі штатні пальники, що встановлені заводами-виробниками енергетичного обладнання на відповідні установки, відповідають усім цим вимогам у повному обсязі. Це створює проблеми під час їх експлуатації, збільшує питомі витрати палива й погіршує екологічні показники їх експлуатації.

Науковцями НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» була розроблена та впроваджена на енергетичних установках мікрофакельна технологія спалювання (МТС-технологія) різних видів газоподібного палива, таких як природний газ, газ-метан, коксовий, доменний газ, СНГ (супутній нафтовий газ), біогаз, водень і т.п. [5-7]. Використання аеродинамічних ефектів насадки Борда та умов компоновки їх у спалювальну систему для паливкових пристроїв дозволило отримати певні особливості, які позитивно впливають як на аеродинамічні, так і на спалювальні особливості паливкових насадок на їх основі [8].

Вибір насадки Борда, як базового елемента нової технології організації спалювання вуглеводневих газоподібних палив, обумовлений тим, що гідравлічні і аеродинамічні характеристики такого елемента сприяють реалізації «канонічних» принципів мінімізації токсичності паливкових насадок за рахунок одночасної реалізації попереднього сумішоутворення, стадійності горіння, прямої аеродинамічної схеми руху суміші. Інтенсифікація процесу сумішоутворення і стабілізація процесу горіння відбувається за рахунок існування кільцевої циркуляційної течії (вихору-стабілізатора), яка виникає у насадці Борда у (зоні вторинних течій на рис. 1).



1 – окислювач; 2 – паливо; 3 – лінія нульових швидкостей;
4 – епіюра швидкості; 5 – вихор-стабілізатор.
Рисунок 1 – Схема трубчастого модуля на базі насадки Борда

Однією з особливих властивостей спалювальних факельних систем на базі мікрофакельної технології є їх конструктивна та технологічна простота в поєднанні з можливістю застосування різних методів сумішоутворення в тому числі: дифузійного, попереднього та комбінованого.

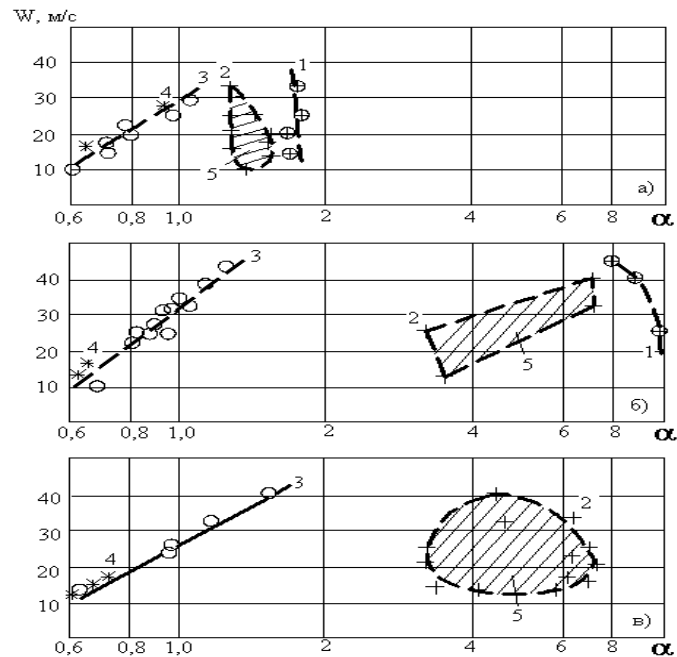
При дифузійному змішуванні палива й повітря з використанням трубчастих модулів із подачею палива на дифузійне сумішоутворення (елементи ТМД) спалювання суміші може відбуватися як по класичній схемі коаксіальних струменів (центрального повітряного – периферійного (кільцевого) газового), так і по методу дотичних струменів.

Важливе значення мають особливості граничних характеристик спалювання палива (рис. 2). За підсумками комплексних експериментальних досліджень трубчастих модулів різного типу встановлено наявність:

- високої турбулентності основного потоку і додаткової локальної турбулізації при подачі палива через отвори в трубній дошці;
- вторинних течій (у вигляді тороїдальних вихорів) і високі стабілізаційні властивості спалювання газоподібного палива;
- внутрішньої рециркуляції за рахунок ежекції суміші у зону спалювання.

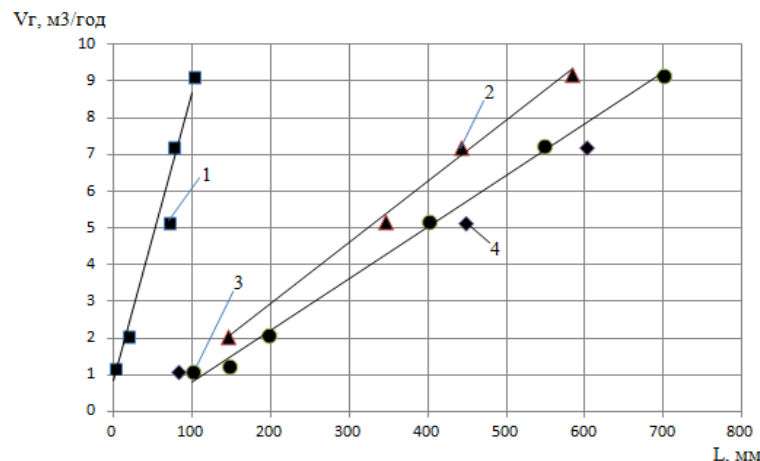
Ці особливості знижують емісію оксидів азоту [9,10], сприяють збільшенню товщини пограничного шару й інтенсифікації тепломасообмінних процесів на початковій ділянці повітряного струменя, дозволяють стабілізувати сумішоутворення й спалювання палива. Дані характеристики мають звичний для теорії та практики згорання вуглеводневих палив вигляд. Самий вузький діапазон стійкої роботи зафіксовано при попередньому сумішоутворенні (рис. 2, а). Області стабільного займання для трубчастих модулів типу ТМД та ТМДН (дифузійне із внутрішньою насадкою) практично співпадають. Модуль ТМД

має стійкий діапазон горіння у «бідній» на паливо області (рис. 2, в). При зміні конструктивних особливостей трубчастого модуля змінюється не тільки структура, але і далекобійність факела.



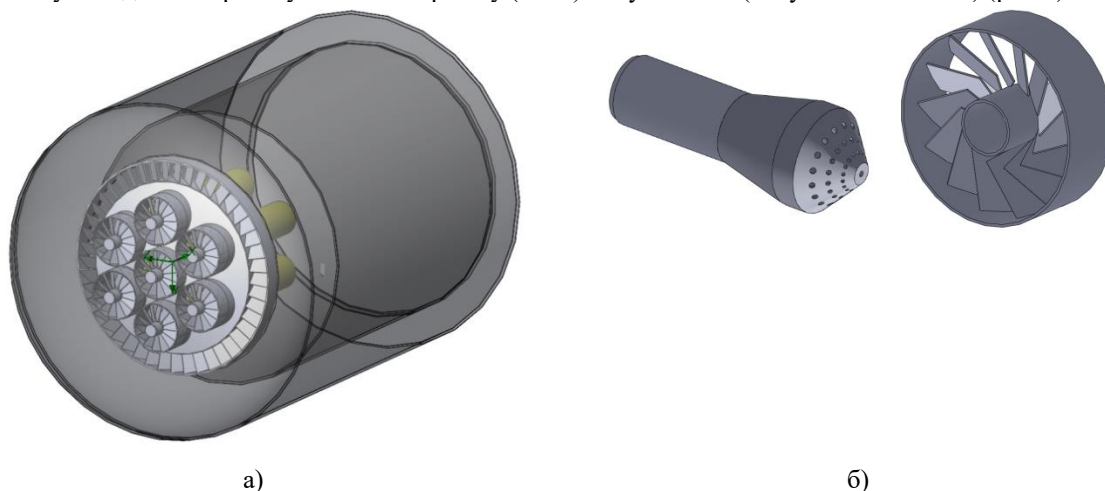
а) – трубчастий модуль ТМП (попереднє сумішоутворення без внутрішньої насадк);
 б) – трубчастий модуль ТМДН (дифузійне сумішоутворення із внутрішньою насадкою);
 в) – трубчастий модуль ТМД (дифузійне сумішоутворення без внутрішньої насадк): 1 – межа «бідного» на паливо зриву полум'я; 2 – межа електроіскрового займання суміші; 3 – режими стійкого горіння суміші; 4 – режими «багатого» на паливо зриву полум'я; 5 – зона стабільного займання суміші.
 Рисунок 2 – Граничні характеристики горіння природного газу при різних умовах сумішоутворення

Далекобійність факела (L) у модулі без насадк (рис. 3) є найменша. Це обумовлено відзначеною вище аерацією кореня факела, при цьому факел має найбільший відрив від гирла струменя. Збільшення далекобійності факелів у модулях з насадками обумовлено не тільки зниженням аерації кореня факела, але і «ламінаризацією» початкової ділянки факела у результаті підвищення його температури. При використанні системи трубчастих модулів у пальниковому пристрої виникають додаткові особливості розвитку факелів. При багатомодульному виконанні пальників відсутня необхідність в установці на кожному модулі зовнішньої насадк, тому що в цьому випадку існує природна зона розділу між сусідніми модулями, яка виконує усі позитивні функції зовнішньої насадк.



(L – далекобійність факелу, V_g – витрата природного газу): 1- модуль без насадк;
 2- модуль без насадк у складі багатомодульного пальника;
 3-модуль із зовнішньою насадкою; 4 - модуль із внутрішньою насадкою [9]
 Рисунок 3 – Аеродинамічні характеристики факелів на базі трубчастих модулів
 Дослідження аеродинамічних характеристик штатної камери згорання

Для перевірки можливості заміни штатних пальників на нові пальники мікрофакельного типу, що розроблені науковцями НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», було обрано камеру згорання газотурбінної установки у складі газоперекачувального агрегату (ГПА) типу ГТК-10 (потужність 10 МВт) (рис.4).



а) штатна (заводська) камера згорання з пальниками й периферійним повітряним регістром;
б) форсунка та повітряний регістр пальника

Рисунок 4 – 3-Д моделі

Вибір даного типу ГПА є не випадковим, оскільки такі агрегати встановлені на газотранспортних магістральних газопроводах України, Росії, Казахстану, Туркменістану, Азербайджану та Ірану у загальній кількості понад 1500 одиниць. Аналогічну конструкцію камери згорання мають ГПА типу ГТ-750-6 потужністю 6 МВт, яких налічується близько 750 одиниць у тих самих країнах.

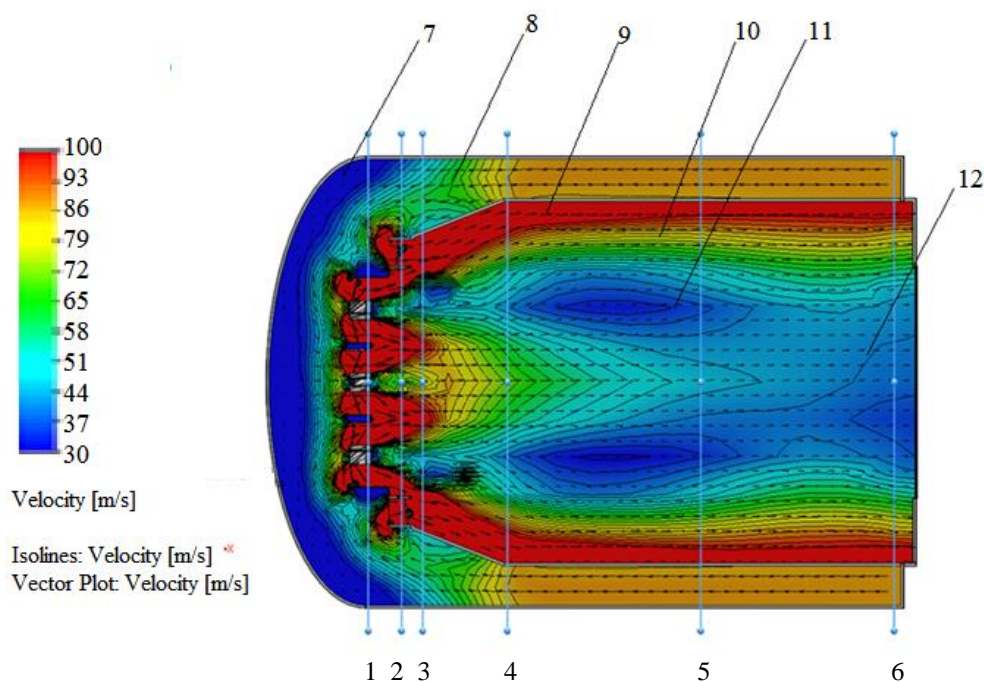
Для дослідження і аналізу аеродинамічних та теплових процесів у штатній камері згорання розроблено математичну модель камери згорання у програмному середовищі SolidWorks.

Граничними умовами у моделі є геометричні межі модельованої області розрахунку та наступні реальні параметри установки: на вхід камери згорання повітря подається масовою витратою 85,25 кг/с, температурою 400°C, тиском на вході – 103325 Па і на виході – 101325 Па; на вході у газову форсунку подача палива становить 1 м³/с з температурою 150°C; матеріал жарової труби – жаростійка аустенітна сталь марки ХН60ВТ.

Подача палива у штатній (заводській) камері згорання відбувається через сім регістрових (лопаткових) пальників, у які подається також біля 65% первинного повітря. Залишок повітря (близько 35%) подається у камеру згорання через основний периферійний повітряний регістр для охолодження стінок жарової труби у вигляді завихреного пристінного пограничного шару. Для зменшення похибки розрахунку у середині жарової труби задано розрахункову сітку з меншим кроком. Для моделювання процесу горіння та врахування усіх хімічних реакцій, що проходять в камері згорання, було змодельовано факели, що передають необхідний тепловий потік і є прозорими для газового потоку. Модель складають рівняння променевого теплового потоку, залежності для визначення півсферичної інтегральної міри чорноти продуктів згорання, ефективна довжина шляху променя, коефіцієнт ослаблення випромінювання.

Модель дозволила задати реальні параметри повітряних потоків, температурних полів у камері згорання, дослідити головні особливості течій і теплообміну у потоках на вході у фронтний пристрій, у середині об'єму жарової труби та на виході з неї перед потраплянням гарячих газів на лопатки газової турбіни. Під час моделювання були обрані характерні площини перерізу камери згорання (рис. 5) з можливістю спостереження та аналізу параметрів потоків як навколо, так і в середині жарової труби. Адекватність моделі перевірялася співставленням величин параметрів в моделі та на реальній установці під час експлуатаційних випробувань та за існуючими опублікованими даними [11,12].

Проведені дослідження на моделі дозволили визначити головні особливості протікання аеродинамічних процесів руху повітряних потоків у жаровій трубі та пальниках фронтного пристрою камери згорання.



1-6 – позначення поперечних площин перерізу камери згорання, 7-12 – локальні значення швидкості повітря (7 – 30 м/с, 8 – 60 м/с, 9 – 100 м/с, 10 – 75 м/с, 11 – 40 м/с, 12 - 45 м/с)

Рисунок 5 – Розподіл швидкості повітря на повздовжніх площинах перерізу камери згорання ГТУ зі штатними пальниками

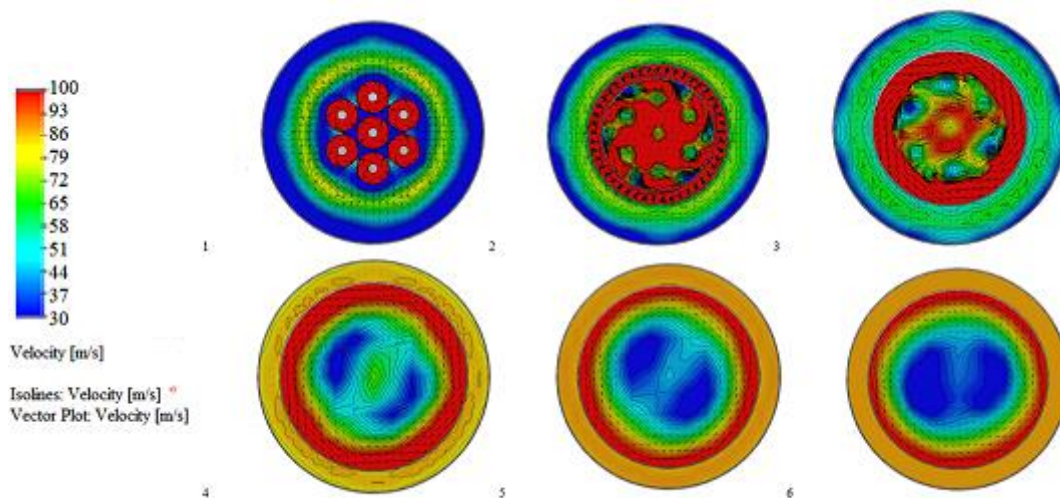
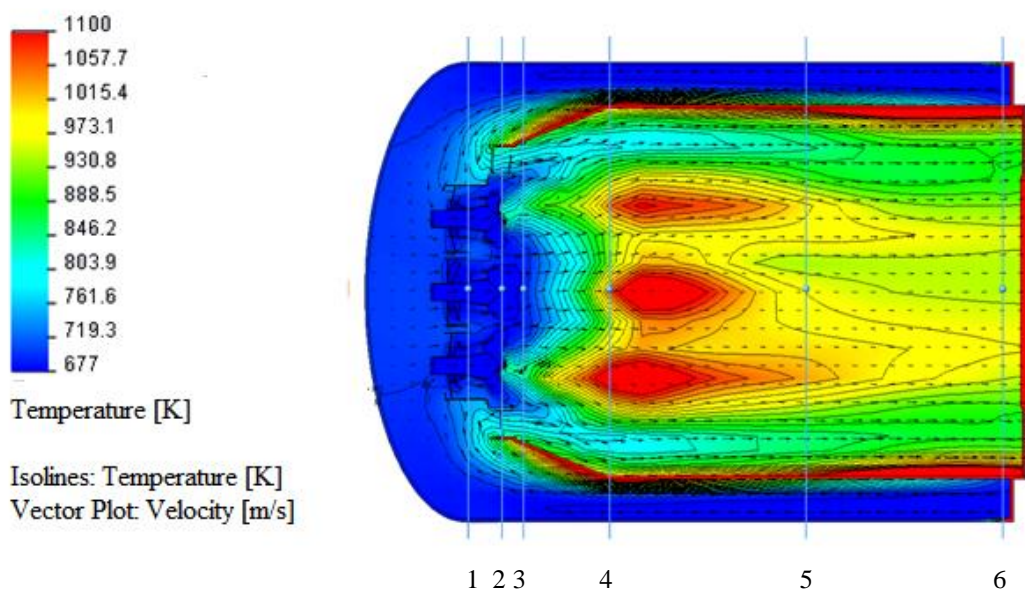


Рисунок 6 – Розподіл швидкості повітря на шістьох площинах перерізу камери згорання ГТУ зі штатними пальниками

Отримані результати свідчать про значну нерівномірність полів швидкостей повітря у фронтальному та повздовжньому (вздовж вісі) перерізах камери згорання. Найбільшу швидкість має повітря, що рухається в пристінному шарі жарової труби. Швидкість від пристінної області до центральної вісі значно знижується. Наприклад, в поперечній площині перерізу 5 швидкість в центрі камери згорання складає 40 м/с, на периферії її значення складає 95 м/с. А в поперечній площині перерізу 6 швидкість в центрі - 35 м/с, на периферії - 100 м/с. Дана нерівномірність зберігається по поперечному перерізу і вздовж вісі. Значна нерівномірність швидкостей призводить до постійних змін тиску в різних зонах по всьому об'єму жарової труби та наявності різнонаправлених пульсацій потоку, які на виході камери згорання при попаданні на лопатки турбіни сприяють виникненню вібрації не тільки турбіни, а і всієї ГТУ.

Аналізуючи результати досліджень теплових процесів в камері спалювання зі штатними пальниками, що отримані за допомогою комп'ютерного моделювання камери згорання газотурбінної

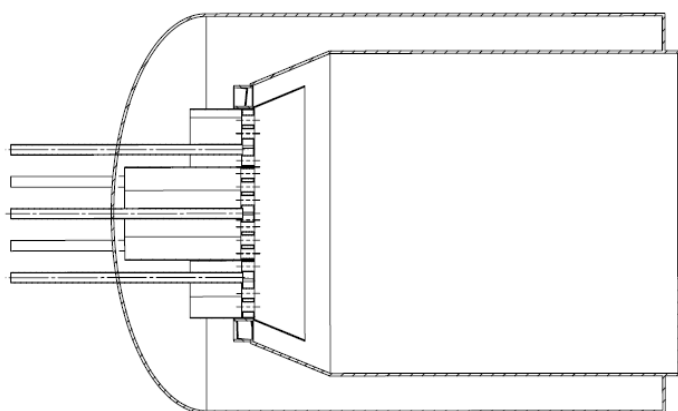
установки в складі ГПА типу ГТК-10 зі штатною пальниковою системою (рис. 7), можна зробити висновок, що поле температур характеризується також значною нерівномірністю, що є причиною виникнення термічних напруг, що негативно впливає на ресурс та ефективність роботи ГТУ. Окрім цього, в ядрі факела потік має високу температуру та низьку відносну швидкість, що створює умови для інтенсифікації процесу виникнення NOx.



1-6 – позначення поперечних площин перерізу

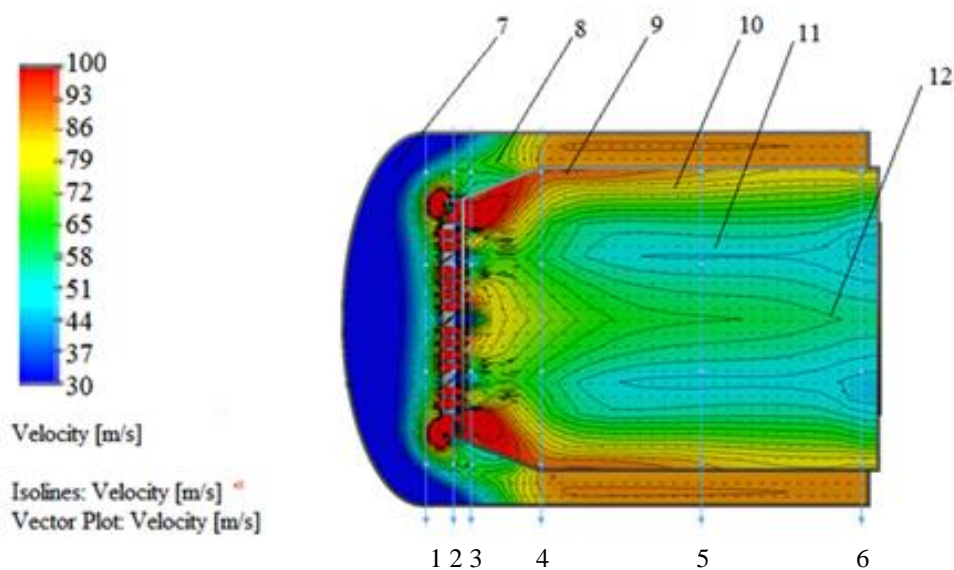
Рисунок 7 – Розподіл температур на повздовжній площині перерізу камери згорання ГТУ зі штатним пальником

В камері згорання з пальниковою системою на базі мікрофакельної технології (рис. 8) відсутні області різкої зміни швидкості потоку та нерівномірності швидкостей за напрямком руху газів від фронтальної частини до виходу із жарової труби, що досягається упорядкованою структурою та оптимізованим розташуванням трубчастих модулів по всьому поперечному перерізу жарової труби (рис. 9,10). Поле швидкостей характеризується значною рівномірністю.



а) креслення (збірка), б) фото фронтального пристрою із МТС-пальником

Рисунок 8 – Загальний вигляд камери згорання ГТУ у складі ГПА типу ГТК-10



1-6 – позначення поперечних площинах перерізу, 7-12 – локальні значення
(7 – 30 м/с, 8 – 65 м/с, 9 – 85 м/с, 10 – 75 м/с, 11 – 55 м/с, 12 – 50 м/с)

Рисунок 9 – Розподіл швидкості повітря на повздовжній площині перерізу камери згорання ГТУ з МТС-пальником з дифузійною подачею палива

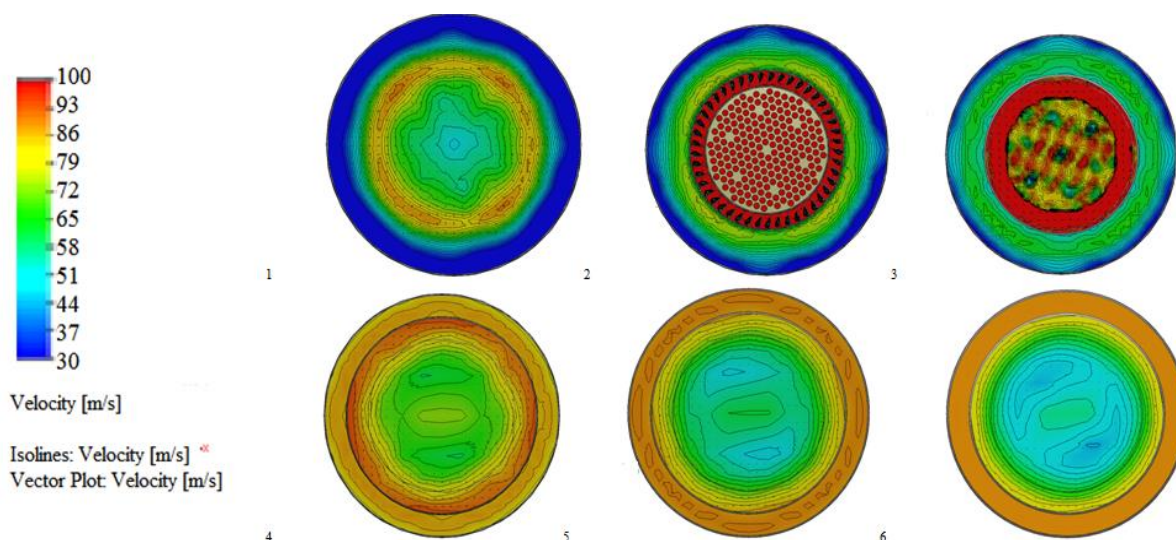
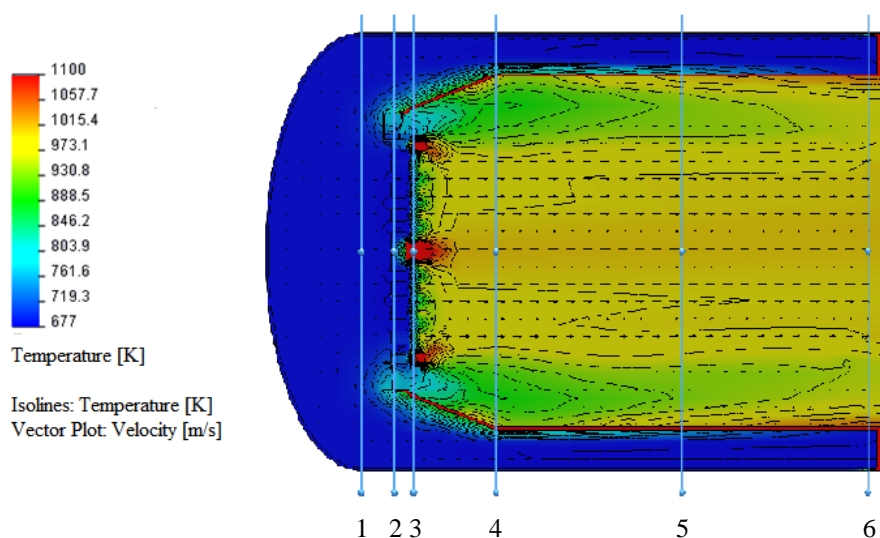


Рисунок 10 – Розподіл швидкості повітря на шістьох площинах перерізу камери згорання ГТУ з МТС-пальником з дифузійною подачею палива

Поле швидкості стало на 25% більш рівномірним по довжині камери і на 40% по поперечних площинах перерізу (рис. 9).

Порівняння результатів, що отримані за допомогою комп'ютерного моделювання камери згорання газотурбінної установки в складі ГПА типу ГТК-10 зі штатними пальниками (рис. 7) та МТС-пальником (рис. 11) відповідно, дозволило зробити висновок, що пальникова система на базі мікрофакельної технології має певні переваги. Ці переваги торкаються розподілу температур, а саме: поле температур в жаровій трубі має високу рівномірність у площинах перерізу та по довжині жарової труби. Поле температур стало на 30% більш рівномірним по довжині камери і на 50% по поперечних перерізах порівняно зі штатним пальником. Крім того, у ядрі факелу температура має значно менше значення, що сприяє у процесі спалювання зменшенню емісії термічних оксидів азоту NO_x .



1-6 – позначення поперечних площин перерізу

Рисунок 11 – Розподіл температур на повздовжній площині перерізу камери згорання ГТУ з МТС-пальником

Одночасно з цим, пальникова система на базі МТС-технології за рахунок більш низького аеродинамічного опору дозволяє збільшити на 15...20% масову частку повітря, що бере участь безпосередньо в процесі спалювання. Це сприяє збільшенню швидкості руху повітряного потоку в зоні горіння й зменшує термін перебування суміші у зоні спалювання, що також дозволяє зменшити емісію викидів NO_x та CO .

Висновки

Отримані результати досліджень аеродинамічних і теплових особливостей роботи камери згорання з пальниковою системою на базі мікрофакельної технології спалювання свідчать про наявність комплексу позитивних ефектів:

- більш високий рівень рівномірності полів швидкостей та температур (поле швидкості стало на 25% більш рівномірним по довжині камери і на 40% по поперечних перерізах, а поле температур - відповідно на 30% та 50%);
- підвищення екологічності спалювання газоподібного палива за рахунок прямої течії руху газоповітряної суміші, комбінованого сумішоутворення (попереднього і дифузійного), стадійності і мікрофакельності спалювання, високої турбулізації і наявності внутрішньої рециркуляції потоку,
- у ядрі факелу температура має значно менше значення, внаслідок чого у процесі спалювання відбувається зменшення емісії термічних оксидів азоту NO_x ;
- можливість здійснювати короткострокову (протягом 8 робочих годин без зміни конструкції жарової труби та фронтового пристрою) заміну штатного пальника на МТС-пальник безпосередньо на установці;
- здатність працювати у широкому діапазоні навантаження із забезпеченням надійності та високоякісних показників енергетичної ефективності та екологічної безпеки;
- простота з можливістю застосування різних методів сумішоутворення в тому числі: дифузійного, попереднього та комбінованого під час експлуатації та зміни режимів навантаження установки.

Перераховані вище позитивні ефекти МТС-технології та пальників на її основі дозволяють підвищити рівень ефективності та екологічної безпеки експлуатації газотурбінних установок та інших типів енергетичних установок [13-18].

Список використаної літератури

1. Директива Європарламенту та Ради ЄС 2001/80/ЄС «Про комплексне запобігання і контроль забруднень». Законодавство України: веб-сайт. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_913 (дата звернення: 08.05.2019).
2. Директива Європарламенту та Ради ЄС 2010/75/ЄС «Про промислові викиди». Міністерство Юстиції: веб-сайт. URL: <https://old.minjust.gov.ua/file/33301.docx> (дата звернення: 08.05.2019).
3. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року: Закон України від 28 лют. 2019 р. № 2697-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#n14> (дата звернення: 10.05.2019).

4. Халатов А.А. Парогазові установки в електроенергетиці: сучасний стан і перспективи розвитку в Україні. *Научные и прикладные вопросы промышленного газотурбостроения*. 2014. т. 1. С. 41-52.
5. Газовий пальник: пат. 50168 Україна: МПК F23D14/02, F23D14/22. № 2001 117468; заявл. 01.11.2001; опубл. 15.10.2002, Бюл. № 10.
6. Газовий пальник: пат. 56602А Україна: МПК F23D14/02, F23D14/22. № 2002 076319; заявл. 29.07.2002; опубл. 15.05.2003, Бюл. № 5.
7. Низькоемісійний газовий пальник трубчастого типу з направленим повітряним потоком: пат. 98095 Україна: МПК F23D14/02, F23D14/22. № а 2011 13153; заявл. 08.11.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7.
8. Любчик Г.М., Марченко Г.С., Варламов Г.Б., Мікулін Г.О., Макаренко В.В., Левчук С.О. Емісійні характеристики пальників на базі трубчастих модулів. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2004. №1. С. 73-79.
9. Любчик Г.Н., Левчук С.А., Варламов Г.Б., Марченко Г.С., Микулин Г.А. Особенности эмиссии NOx и CO в горелках на базе трубчатых модулей. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2001. № 4. С. 59-63.
10. Любчик Г.Н., Варламов Г.Б. Новая технология создания и использования эффективных и высокоэкологических горелочных устройств для энергетических котлов и камер сгорания ГТУ и ПГУ. *Инновационное развитие топливно-энергетического комплекса: проблемы и возможности*. Киев, 2004. С .115-121.
11. Сударев А.В., Антоновский В.И. «Камеры сгорания газотурбинных установок: Теплообмен.» Л.: Машиностроение, 1985. – 272 с.
12. Сторожук Я.П. Камеры сгорания стационарных газотурбинных и парогазовых установок: Машиностроение, Ленингр. Отделение, 1978.- 231 с.
13. Варламов Г.Б., Халатов А.А., Позняков П.О., Юрашев Д.Н. Нове покоління пальникових систем ГТУ на основі трубчатої технології спалювання газу. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2012. №10. С. 9-14.
14. Говдяк Р.М., Шелковский Б.И., Чабанович Л.Б., Гриник О.Г., Любчик Г.Н., Варламов Г.Б. Перспективы повышения надежности, экологической безопасности и энергетической эффективности ГПА на основе применения трубчатой технологии сжигания газа. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Спеціальний випуск*. Київ. 2006. С. 54-57.
15. Варламов Г.Б., Любчик Г.Н., Олиневич И.В., Ивасенко А.В. Технология повышения энергетической и экологической эффективности работы котлов и камер сгорания ГТУ. *Мир техники и технологий*. 2006. №4. С. 64-65.
16. Христич В.А., Варламов Г.Б. Газотурбинные установки: история и перспективы. Киев. 2006. 435 с.
17. Любчик Г.Н., Варламов Г.Б., Романов В.В., Ванцовский В.Г., Вилкул В.В. Результаты испытаний камеры сгорания ГТД ДГ80 с низко-эмиссионным горелочным устройством на базе трубчатых модулей. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2009. № 6. С. 13-18.
18. Варламов Г.Б., Марчук Я.С., Беккер М.В., Любчик Г.М. , Камаєв Ю.М., Позняков П.О., Кузьменко Д.О. Трубчаста технологія газоспалювання – прорив у енергозбереженні та екологічності транспортування природного газу. *Нафтова і газова енергетика*. 2010. №1. С. 60-63.

G. Varlamov, Dr. Sc. Sciences., Prof., ORCID 0000-0002-4818-2603

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

M. Mukhin, Master, ORCID 0000-0002-8961-6543

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

GAS TURBINE RECEPTION CAMERA AERODYNAMIC AND THERMAL USING ADVANTAGES BY MICROFACIOLOGY OF GAS DISCHARGE

Надійшла 12.02.2019

Received 12.02.2019

УДК 621.331

В.О. Дьяков, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0002-6141-8393

А.В. Антонов, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-5701-6087

К.Р. Єфремова, магістр ORCID 0000-0001-8131-9061

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

ПРОТИКОРОЗІЙНИЙ ЗАХИСТ ПРИСТРОЇВ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ В ЗОНІ СТИКУВАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ДІЛЯНОК ЗАЛІЗНИЦЬ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ

Метою дослідження є встановлення загрози електрохімічної корозії арматури контактної мережі шляхом визначення потенціалу рейок при зміні координати розташування електрорухомого складу в межах станції стикування та визначення заходів мінімізації її впливу.

Для оцінки небезпеки електрокорозії на ділянках тягової мережі змінного струму, які прилягають до станцій стикування, проведені дослідження з визначення величини потенціалів рейок, викликаних протіканням постійного струму.

Встановлено, що постійний тяговий струм затікає на ділянки електрифікованих залізниць змінного струму, які розміщені біля станцій стикування, викликаючи можливість електрокорозії залізобетонних опор та фундаментів. При цьому небезпечні потенціали спостерігаються на відстані більше 20 кілометрів від станції стикування.

На основі отриманих в роботі результатів, запропоновано застосування на ділянках залізниць електрифікованих на змінному струмі, які прилягають до станцій стикування, захист від електрокорозії залізобетонних опор та фундаментів контактної мережі аналогічний захисту на постійному струмі, а саме – розземлення опор.

Ключові слова: електрифікований транспорт; контактна мережа; станція стикування; змінний струм; постійний струм; опора; корозія.

Вступ.

Контактна мережа є складним пристроєм в системі тягового електропостачання, який повинен забезпечувати безперебійне живлення електрорухомого складу (ЕРС). Вона не має резерву і тому до її елементів висуваються жорсткі вимоги із забезпечення надійності роботи [1].

В умовах експлуатації, опори контактної мережі піддаються механічним навантаженням, які викликані вагою підтримуючих конструкцій, проводів та арматури, а також натягом проводів контактної підвіски. Оскільки на елементи контактної мережі діє навколишнє середовище, відбувається їх атмосферна корозія, яка пришвидшується під дією струмів витоку через металеві деталі контактної мережі [2 – 4].

Протікання електрохімічної корозії арматури контактної мережі та опор призводить до зменшення їх несучої здатності, що разом з дією зовнішнього механічного навантаження, може призвести до руйнування контактної мережі, зупиненню руху потягів і, відповідно, значних економічних збитків.

Процес електрохімічної корозії має місце не лише на ділянках залізниць електрифікованих постійним струмом, а й в місцях стикування електрифікованих ділянок залізниць постійного та змінного струму.

В останньому випадку приділяється занадто мало уваги захисту елементів контактної мережі від електрохімічної корозії, викликаній затіканням постійного тягового струму через рейки на ділянках залізниць електрифікованих змінним струмом, безпосередньо розміщених біля станцій стикування [5 – 7].

Основним критерієм оцінки загрози електрохімічної корозії елементів контактної мережі є величина потенціалу рейок відносно землі. Тому для оцінки небезпеки електрохімічної корозії на ділянках залізниць електрифікованих змінним струмом, які прилягають до станцій стикування, необхідно проводити поглиблені дослідження.

Мета та завдання. Метою дослідження є встановлення загрози електрохімічної корозії елементів контактної мережі шляхом визначення потенціалу рейок при зміні координати розташування ЕРС в межах станцій стикування та визначення заходів мінімізації її впливу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити ряд завдань:

- визначити характер та об'єкти, на які чинять негативний вплив потенціали рейок;
- визначити заходи, які дозволяють мінімізувати негативний вплив потенціалів рейок на ділянках змінного струму, розташованих поблизу станцій стикування.

В.О. Дьяков, А.В. Антонов, К.Р. Єфремова, 2019

Матеріал і результати досліджень. На електрифікованих залізницях зустрічаються три види корозійного руйнування: атмосферна корозія – руйнує надземні металеві конструкції контактної мережі та верхню частину опори; ґрунтова корозія – діє на підземну частину опор та фундаментів; електрохімічна корозія – руйнує ізолятори, залізобетонні опори та фундаменти контактної мережі.

Механізм протікання корозії металу під дією агресивного середовища та електрохімічної корозії носить однаковий характер. Неодмінною умовою протікання процесу корозії є контакт металу з електролітом, тобто з вологою (ґрунтовою, атмосферою) і розчиненими в ній різними хімічними елементами (солями, кислотами, лугами).

В силу неоднорідності структури і складу металу, а також неоднорідності електроліту, різні ділянки поверхні металу, що знаходяться в контакт з електролітом, навіть при відсутності зовнішнього електричного поля отримують різні за величиною електрохімічні потенціали, наслідком чого є протікання струму по замкнутому ланцюгу гальвано-корозійної пари, при цьому на поверхні металу завжди будуть ділянки, з яких корозійний струм стікає в електроліт (анод) і ділянки, в які струм повертається назад з електроліту в метал (катод). В анодній ділянці відбувається розчинення металу, тобто поступове корозійне руйнування, в катодній – метал зберігається повністю.

Найнебезпечнішою є електрохімічна корозія, оскільки має високу інтенсивність та діє на арматуру опор і фундаментів контактної мережі, яка знаходиться під бетоном.

В місцях стикування електрифікованих залізниць постійного та змінного струму передбачається улаштування захисту всіх опор контактної мережі від електрокорозії [5, 6, 8].

На сьогодні, стикування електрифікованих ділянок постійного та змінного струму здійснюють за допомогою станцій стикування та нейтральних вставок [8].

Але беручи до уваги те, що рейкова мережа станцій стикування має електричний зв'язок з рейками прилеглих перегонів з'являється небезпека затікання постійного тягового струму на ділянки електрифіковані змінним струмом, що викликає електрокорозійне руйнування залізобетонних опор та фундаментів контактної мережі, рейкових скріплень та інше [9 – 11].

Для оцінки небезпеки електрокорозії на ділянках тягової мережі змінного струму, які прилягають до станцій стикування, необхідно знати величину потенціалів рейок, викликаних протіканням постійного струму.

Зіставимо розрахункові схеми та проведемо визначення величини потенціалів рейок для трьох найбільш частих випадків: при розташуванні ЕРС в горловині станції (рис. 1); при розташуванні ЕРС на міжпідстанційній зоні (МПЗ) (рис. 3); при відключенні суміжної тягової підстанції (рис. 5). Споживаний струм ЕРС в трьох випадках умовно прийнятий і рівний $I = 1000$ А.

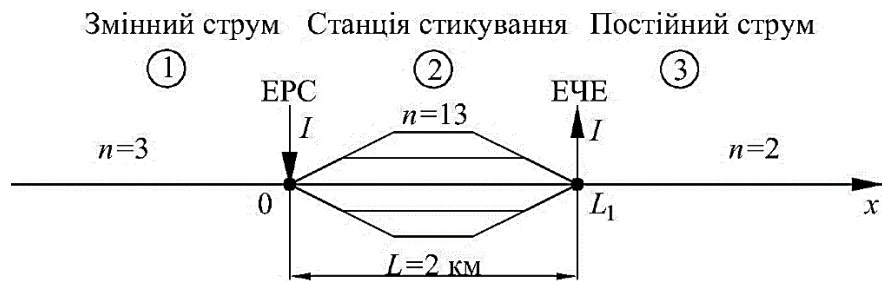


Рисунок 1 – Розрахункова схема при розташуванні ЕРС в горловині станції

Зіставимо систему рівнянь для визначення потенціалів на розрахункових ділянках 1, 2 та 3:

$$U_{1PX} = A_1 e^{kx} + B_1 e^{-kx}; \quad (1)$$

$$U_{2PX} = A_2 e^{kx} + B_2 e^{-kx}; \quad (2)$$

$$U_{3PX} = A_3 e^{kx} + B_3 e^{-kx}; \quad (3)$$

$$U_{PXi} = A_i e^{kx} + B_i e^{-kx}; \quad (4)$$

$$I_{PXi} = -\frac{1}{R_{PBi}} (A_i e^{kx} + B_i e^{-kx}), \quad (5)$$

де U_{1PX} , U_{2PX} , U_{3PX} – потенціали неоднорідної рейкової мережі відповідно на 1, 2 та 3 розрахункових зонах, В;

i – номер ділянки;

k – коефіцієнт поширення рейкової мережі, 1/км;

$A_1, B_1, A_2, B_2, A_3, B_3, A_i, B_i$ – постійні коефіцієнти;

$R_{рв}$ – хвильовий опір однорідної рейкової мережі, Ом;
 $I_{рxi}$ – струм неоднорідної рейкової мережі на i -ій ділянці, А;
 x – поточна координата, км.

Для визначення постійних A_i , B_i використовуються наступні граничні умови:

- Г.1: $U_{рx} = 0$, при $x = -\infty$;
- Г.2: $U_{рx} = 0$, при $x = \infty$;
- Г.3: $U_{рx1} = U_{рx2}$, при $x = 0$;
- Г.4: $U_{рx2} = U_{рx3}$, при $x = L_1$;
- Г.5: $I_{рx2} - I_{рx1} = I$, при $x = 0$;
- Г.6: $I_{рx2} - I_{рx3} = I$, при $x = L_1$.

Підставивши граничні умови у рівняння (1) – (5) і розв’язавши систему рівнянь матричним методом, знаходимо значення постійних коефіцієнтів:

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \\ A_2 \\ B_2 \\ A_3 \\ B_3 \end{pmatrix} = M^{-1} \cdot C ; \quad \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \\ A_2 \\ B_2 \\ A_3 \\ B_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,115 \\ 0 \\ -1,821 \\ -2,936 \\ 0 \\ -2,232 \end{pmatrix} \quad (6)$$

З інтервалом у 1 км знаходимо потенціали рейкової мережі шляхом підстановки постійних коефіцієнтів у рівняння (1) – (5). Результати розрахунків приведені у графічному вигляді в залежності від значення перехідного опору на рис. 2.

Значення потенціалів рейкової мережі визначались для значень перехідного опору $r_n = 0,25$ Ом·км, $r_n = 2,5$ Ом·км, $r_n = 5$ Ом·км.

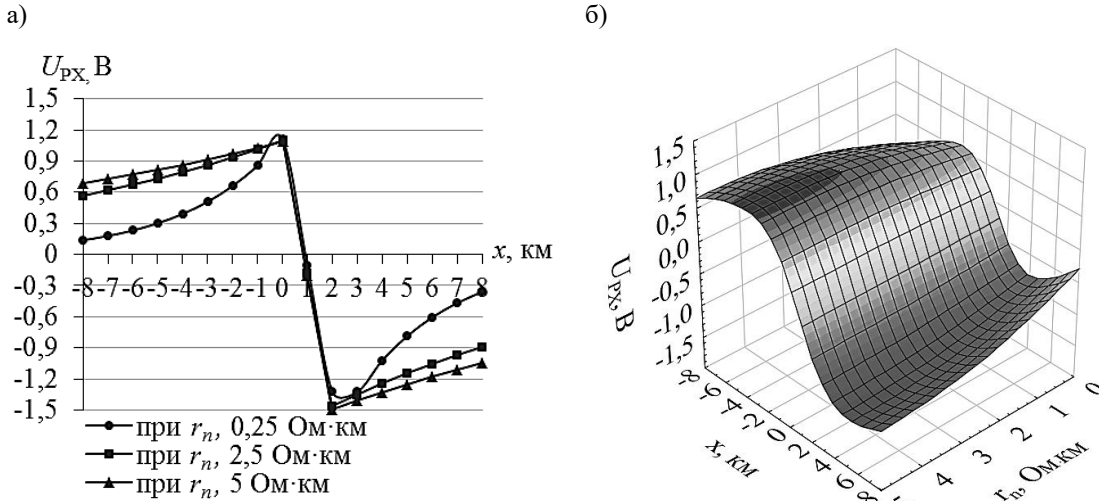


Рисунок 2 – Розподіл потенціалу рейкової мережі при розташуванні ЕРС в горловині станції:

а) для трьох контрольних значень r_n ; б) при інтерполяції – для проміжних значень

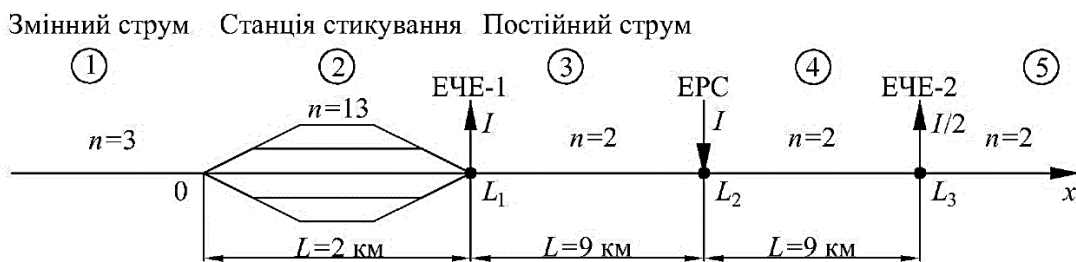


Рисунок 3 — Розрахункова схема при розташуванні ЕРС на МПЗ

Система рівнянь для визначення струмів та потенціалів на розрахункових ділянках:

$$U_{1PX} = A_1 e^{kx} + B_1 e^{-kx}; \quad (7)$$

$$U_{2PX} = A_2 e^{kx} + B_2 e^{-kx}; \quad (8)$$

$$U_{3PX} = A_3 e^{kx} + B_3 e^{-kx}; \quad (9)$$

$$U_{4PX} = A_4 e^{kx} + B_4 e^{-kx}; \quad (10)$$

$$U_{5PX} = A_5 e^{kx} + B_5 e^{-kx}. \quad (11)$$

Для визначення постійних A_i , B_i використовуються наступні граничні умови:

$$\Gamma.1: U_{PX} = 0, \text{ при } X = -\infty;$$

$$\Gamma.2: U_{PX} = 0, \text{ при } X = \infty;$$

$$\Gamma.3: U_{PX1} = U_{PX2}, \text{ при } X = 0;$$

$$\Gamma.4: U_{PX2} = U_{PX3}, \text{ при } X = L_1;$$

$$\Gamma.5: U_{PX3} = U_{PX4}, \text{ при } X = L_2;$$

$$\Gamma.6: U_{PX4} = U_{PX5}, \text{ при } X = L_3;$$

$$\Gamma.7: U_{PX1} = U_{PX2}, \text{ при } X = 0;$$

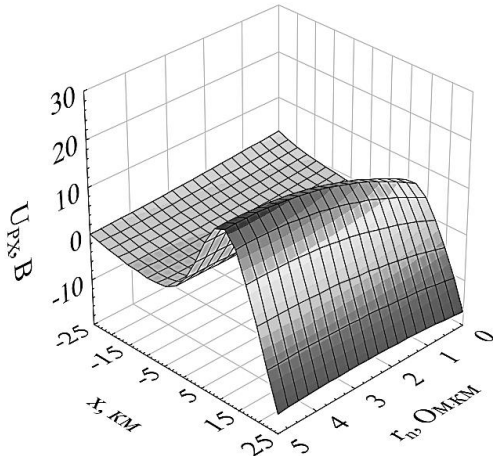
$$\Gamma.8: I_{PX4} - I_{PX5} = \frac{I}{2}, \text{ при } X = L_3;$$

$$\Gamma.9: I_{PX4} - I_{PX3} = I, \text{ при } X = L_2;$$

$$\Gamma.10: I_{PX2} - I_{PX3} = \frac{I}{2}, \text{ при } X = L_1.$$

Провівши операції з підстановки та розв'язання отриманих рівнянь по аналогії як для розрахункової схеми (рис. 1) з інтервалом у 1 км маємо потенціали рейкової мережі в залежності від значення перехідного опору в графічному вигляді на рис. 4.

а)



б)

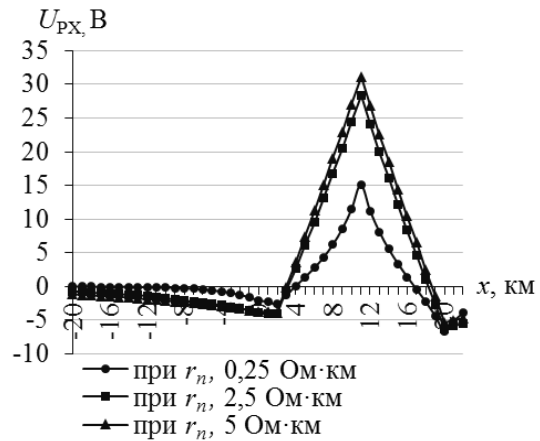


Рисунок 4 – Розподіл потенціалу рейкової мережі при розташуванні ЕРС на МПЗ:
а) для трьох контрольних значень r_n ; б) при інтерполяції – для проміжних значень

Змінний струм Станція стикування Постійний струм

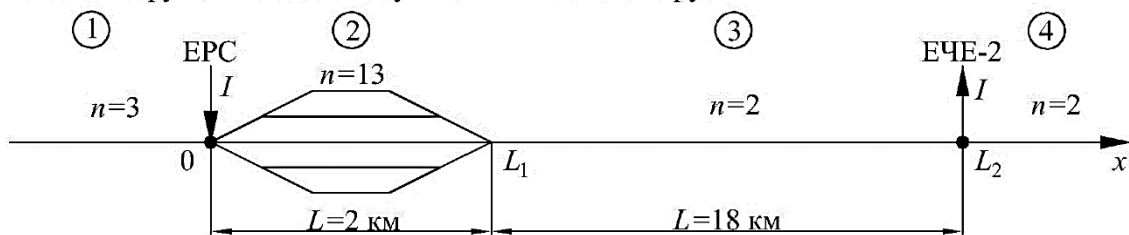


Рисунок 5 — Розрахункова схема при розташуванні ЕРС на МПЗ при відключенні тягової підстанції ЕЧЕ-1

Система рівнянь для визначення струмів та потенціалів на розрахункових ділянках:

$$U_{1PX} = A_1 e^{kx} + B_1 e^{-kx}; \quad (14)$$

$$U_{2PX} = A_2 e^{kx} + B_2 e^{-kx}; \quad (15)$$

$$U_{3PX} = A_3 e^{kx} + B_3 e^{-kx}; \quad (16)$$

$$U_{4PX} = A_4 e^{kx} + B_4 e^{-kx}. \quad (17)$$

Для визначення постійних A_i , B_i використовуються наступні граничні умови:

$$\Gamma.1: U_{PX} = 0, \text{ при } X = -\infty;$$

$$\Gamma.2: U_{PX} = 0, \text{ при } X = \infty;$$

$$\Gamma.3: U_{PX1} = U_{PX2}, \text{ при } X = 0;$$

$$\Gamma.4: U_{PX2} = U_{PX3}, \text{ при } X = L_1;$$

$$\Gamma.5: U_{PX3} = U_{PX4}, \text{ при } X = L_2;$$

$$\Gamma.6: I_{PX2} - I_{PX1} = I, \text{ при } X = 0;$$

$$\Gamma.7: I_{PX2} = I_{PX3}, \text{ при } X = L_1;$$

$$\Gamma.8: I_{PX3} - I_{PX4} = I, \text{ при } X = L_2.$$

Провівши операції з підстановки та розв'язання отриманих рівнянь з інтервалом у 1 км маємо потенціали рейкової мережі в залежності від значення перехідного опору в графічному вигляді на рис. 6.

а)

б)

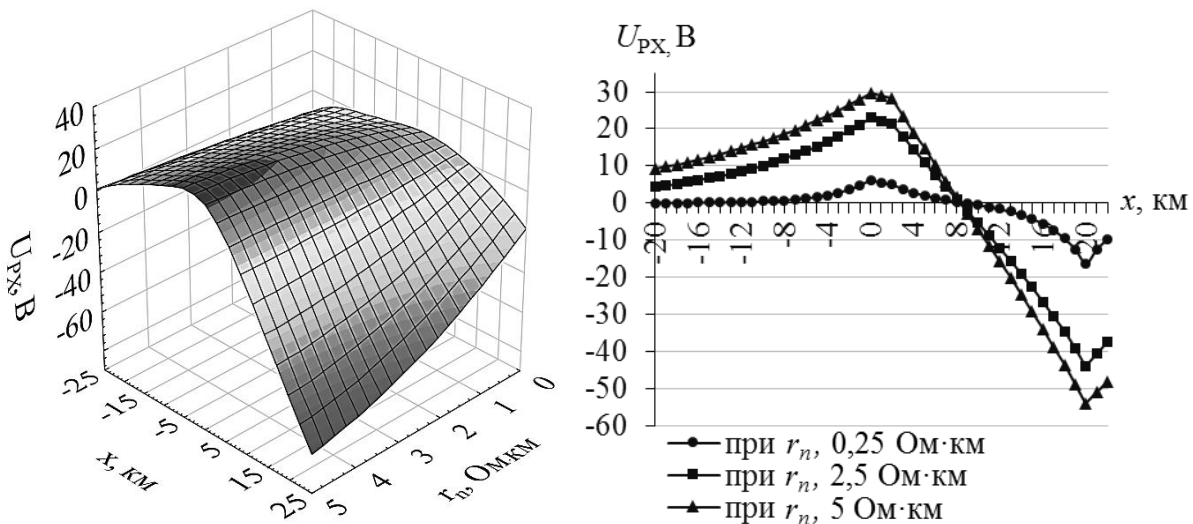


Рисунок 6 – Розподіл потенціалу рейкової мережі при розташуванні ЕРС при відключенні тягової підстанції ЕЧЕ-1:

а) для трьох контрольних значень r_n ; б) при інтерполяції – для проміжних значень

Проведені дослідження свідчать, що постійний струм затікає на ділянки прилеглих до станцій стикування колій електрифікованих залізниць змінного струму і його величина залежить від розташування електровозу постійного струму поблизу станції стикування та режиму роботи тягової підстанції.

Відомо, що на електрифікованих залізницях змінного струму на залізобетонних опорах з опором понад 100 Ом в заземлюючі спуски встановлюють спеціальні захисні пристрої, які перешкоджають витоку сигнального та тягового струму з рейок в ґрунт. В той же час, величина допустимого витоку тягового постійного струму з залізобетонної опори в ґрунт в залежності від нормативно-допустимого моменту опори коливається від 20 до 40 мА, що при опорі опори 100 Ом відповідає потенціалу «рейка – земля» 2...4 В. Перевищення цих значень потенціалів можна вважати небезпечним для корозійного стану залізобетонних опор контактної мережі, які наглухо заземлені на рейки.

Отримані результати, при розрахунковій схемі (рис. 1) показують, що потенціали рейок лежать в дозволених межах. Крім того при збільшенні перехідного опору, загроза електрокорозії не з'являється через близьке розташування відсмоктуючого фідера тягової підстанції до ЕРС, що робить неможливим затікання великих постійних струмів у бік перегону змінного струму. Але при збільшенні навантаження,

наприклад у два рази, відповідно збільшиться величина потенціалу в рейковій мережі в два рази, що різко підвищить небезпеку корозійного руйнування опор контактної мережі.

При умові розташування електровоза в межах МПЗ між підстанціями ЕЧЕ-1 та ЕЧЕ-2 (рис. 3) тяговий струм затікає на прилеглі ділянки змінного струму, викликаючи появу в рейках від'ємного потенціалу (рис. 4), який значно зростає при збільшенні перехідного опору рейка – земля. При таких умовах виникає загроза електрокорозії верхнього поясу опор.

При відключенням підстанції ЕЧЕ-1 (рис. 5) виникає загроза корозійного руйнування фундаментної частини опор контактної мережі на ділянці змінного струму. Навіть на відстані 20 км від станції стикування потенціали рейок значно перевищують допущені значення (рис. 6).

Вказане вище свідчить про те, що на ділянках залізниць електрифікованих змінним струмом, які прилягають до станцій стикування, необхідно застосовувати засоби захисту від електрокорозії опор контактної мережі аналогічні до засобів захисту на електрифікованих ділянках постійного струму на відстані до 20 км і більше, від станції стикування.

Мінімізувати негативний вплив тягових постійних струмів на опори електрифікованих залізниць змінного струму, розташованих поблизу зони стикування систем електротяги постійного та змінного струму, можливо за рахунок розземлення опор. Але в цьому випадку захист контактної мережі від струмів короткого замикання буде мати свої особливості.

Висновки:

1. В роботі враховані особливості експлуатації контактної мережі в зоні станцій стикування. А саме, що колії електрифікованої ділянки змінного струму мають електричний контакт з коліями електрифікованими постійним струмом. Що робить можливим затікання постійного тягового струму на ділянки електрифікованої залізниці змінного струму, викликаючи процес електрокорозії залізобетонних опор та фундаментів контактної мережі.

2. Для оцінки можливості електрокорозії залізобетонних опор та фундаментів контактної мережі, на прилеглих до станцій стикування ділянках залізниць електрифікованих змінним струмом були проведенні дослідження для визначення потенціалів рейкової мережі. За результатами яких можна стверджувати, що постійний тяговий струм затікає на ділянки електрифікованих залізниць змінного струму, які розміщені біля станцій стикування, викликаючи можливість електрокорозії залізобетонних опор та фундаментів. При цьому небезпечні потенціали спостерігаються на відстані 20 кілометрів від станції стикування.

3. На основі отриманих результатів, запропоновано застосування на ділянках залізниць електрифікованих на змінному струмі та що прилягають до станцій стикування, захист від електрокорозії залізобетонних опор та фундаментів контактної мережі аналогічний захисту на постійному струмі – заземлення опор контактної мережі на рейки здійснюється через захисні пристрої – іскрові проміжки, діодні заземлювачі з послідовно включеними іскровими проміжками.

4. Найбільш ефективним способом запобігання корозійного руйнування залізобетонних опор та фундаментів контактної мережі є їх розземлення.

Список використаної літератури:

1. Михеев В.П. Контактные сети и линии электропередачи: Учебник для вузов ж. -д. транспорта. – М.: Маршрут, 2003. – 416 с.
2. Hans Böhni Corrosion in Reinforced Concrete Structures. – Woodhead Publishing Limited, 2005. – 264 p.
3. Tuutti Kyösti Corrosion of steel in concrete Stockholm. – Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. – 469 p.
4. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A., Schneider E. Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance. Second Edition. – Wiley, John & Sons, 2009. – 994 p.
5. Дьяков, В. А. К вопросу о противокоррозионной защите опор контактной сети в зоне станций стыкования / В. А. Дьяков, В. Г. Сыченко, О. И. Гилевич, В. Г. Дзюман, А. В. Дьяков // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 5. – с. 26–27.
6. Дьяков, В. О. Контактна мережа електрифікованих залізниць. Улаштування контактної мережі / В. О. Дьяков, Д. О. Босий, А. В. Антонов – Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017.
7. Сиченко В.Г., Дьяков В.О., Колесник Д.Р., Полях О.М. Протикорозійний захист суміжних пристроїв у системах тягового електропостачання: Монографія / за загальною редакцією Сиченка В. Г. – Дн-ськ: Вид-о ПФ «Стандарт-Сервіс», 2015. – 330 с.
8. Дьяков В. О, Антонов А. В., Малинка С. Ю. Захист нейтральних вставок контактної мережі від перепалів // Електрифікація транспорту. – 2016. – №12. – С. 64 – 70.
9. Дьяков В.О. Противокоррозионная защита смежных сооружений / В.А. Дьяков // Електрифікація транспорту. – 2012. – № 4. – С.30 – 37.

10. Шевелев Д.А., Дьяков В. О. Дослідження протикорозійного захисту підземних металевих споруд на електролітичній моделі /Д.А.Шевелев, В.О. Дьяков//Електрифікація транспорту.-2011.-№ 1.-с.64-68.

11. Пат. UA 33376, МПК: G01R 31/02. Пристрій захисту рейкових кіл ділянок тяги змінного струму від впливу зворотного постійного тягового струму / Разгонов А. П., Дьяков В. О., Гілевіч О. І., Журавльов А. Ю. – № u200800081 ; заявл. 02.01.2008; опубл. 25.06.2008, Бюл. № 12. – 5 с.

V. Diacov, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof. ORCID 0000-0002-6141-8393

A. Antonov, Cand. Sc. (Eng.) ORCID 0000-0001-5701-6087

K. Yefremova, Msc. ORCID 0000-0001-8131-9061

Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan

CORROSION PROTECTION OF CONTACT NETWORK ON THE STATION SPLICING ELECTRIFIED RAILWAYS DC AND AC

The aim of the investigation is to establish the threat contact network electrochemical corrosion of reinforcement by determining the rails potential when electric rolling stock changing the location within the splicing stations and determining measures to minimize its impact.

To assess the danger of electrocorrosion in the sections of the AC traction network, which are adjacent to the splicing stations, investigations were conducted to determine the potential values of the rails caused by the flow of direct current.

It has been established that a direct traction current flows into AC electrified sections of railways, which are located at the splicing stations. That causing the probability of electrocorrosion of reinforced concrete catenary support and foundations. At the same time, hazardous potentials are observed at a distance of more than 20 kilometers from the splicing station.

On the basis of the obtained results, it is proposed to use on the sections of electrified railways and adjacent to splicing stations, the protection against electro-corrosion of reinforced concrete catenary supports and foundations of the contact network is similar to the protection of direct current. The catenary supports grounding on the rails is carried out through protective devices - spark gaps, diode earthing switches with sequentially switched spark gaps.

The most effective way to prevent corrosive destruction of reinforced catenary concrete supports and foundations of the contact network is to earthen them.

Keywords: electrified transport; contact network; splicing station; alternating current; direct current ; catenary support; corrosion.

References:

1. Miheev V.P. Kontaknyye seti i linii ehlektroperedachi: Uchebnik dlya vuzov zh. -d. transporta. – M.: Marshrut, 2003. – 416 s.
2. Hans Böhni Corrosion in Reinforced Concrete Structures. – Woodhead Publishing Limited, 2005. – 264 p.
3. Tuutti Kyösti Corrosion of steel in concrete Stockholm. – Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982. – 469 p.
4. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A., Schneider E. Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance. Second Edition. – Wiley, John & Sons, 2009. – 994 p.
5. D'yakov, V. A. K voprosu o protivokorroziionnoj zashchite opor kontaktnoj seti v zone stancij stykovaniya / V. A. D'yakov, V. G. Sychenko, O. I. Gilevich, V. G. Dzyuman, A. V. D'yakov // Zaliznichnij transport Ukraïni. – 2009. – № 5. – s. 26–27.
6. Diakov, V. O. Kontaktna mrezhha elektryfikovanykh zaliznyts. Ulashtuvannia kontaktnoi mrezhhi / V. O. Diakov, D. O. Bosi, A. V. Antonov – Dnipro: Vyd-vo PF «Standart-Servis», 2017.
7. Sychenko V.H., Diakov V.O., Kolesnyk D.R., Poliakh O.M. Protykoroziiniy zakhyst sumizhnykh prystroiv u systemakh tiahovoho elektropostachannia: Monohrafiia / za zahalnoi u redaktsiieiu Sychenka V. H. – Dn-sk: Vyd-o PF «Standart-Servis», 2015. – 330 s.
8. Diakov V. O, Antonov A. V., Malynka S. Yu. Zakhyst neitralnykh vstavok kontaktnoi mrezhhi vid perepaliv // Elektryfikatsiia transportu. – 2016. – №12. – S. 64 – 70.
9. D'yakov V.O. Protivokorroziionnaya zashchita smezhnykh sooruzhenij /V.A. D'yakov // Elektryfikatsiia transportu. – 2012. – № 4. – S.30 – 37.
10. Shevelev D.A., Diakov V. O. Doslidzhennia protykoroziionoho zakhystu pidzemnykh metale-vykh sporud na elektrolitychnii modeli /D.A.Shevelev, V.O. Diakov//Elektryfikatsiia transportu.-2011.-№ 1.-s.64-68.

11. Pat. UA 33376, МПК: G01R 31/02. Prystrii zakhystu reikovykh kil dilianok tiahу zminnoho strumu vid vplyvu zvorotnoho postiinoho tiahovoho strumu / Razghonov A. P., Diakov V. O., Hilevich O. I., Zhuravlov A. Yu. – № u200800081 ; zaiavl. 02.01.2008; opubl. 25.06.2008, Biul. № 12. – 5 s.

В.О. Дьяков, канд. техн. наук, доц., **ORCID** 0000-0002-6141-8393

А.В. Антонов, канд. техн. наук, **ORCID** 0000-0001-5701-6087

Е.Р. Ефремова, магистр **ORCID** 0000-0001-8131-9061

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

ПРОТИВОКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА УСТРОЙСТВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ В ЗОНЕ СТЫКОВАНИЯ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Целью исследования является установление угрозы электрохимической коррозии арматуры контактной сети путем определения потенциала рельсов при изменении координаты расположения электроподвижного состава в пределах станций стыкования и определение мер минимизации ее влияния.

Для оценки опасности электрокоррозии на участках тяговой сети переменного тока, которые прилегают к станциям стыкования, проведены исследования по определению величины потенциалов рельсов, вызванных протеканием постоянного тока.

Установлено, что постоянный тяговый ток затекает на участки электрифицированных железных дорог переменного тока, которые расположены у станций стыкования, вызывая вероятность электрокоррозии железобетонных опор и фундаментов. При этом опасные потенциалы наблюдаются на расстоянии более 20 километров от станции стыкования.

На основании полученных в работе результатов, предложено применение на участках железных дорог, электрифицированных на переменном токе, прилегающих к станциям стыкования, защиту от электрокоррозии железобетонных опор и фундаментов контактной сети аналогичную защите на постоянном токе, а именно – разземление опор.

Ключевые слова: электрифицированный транспорт; контактная сеть; станция стыкования; переменный ток; постоянный ток; опора; коррозия.

Надійшла 13.01.2019

Received 13.01.2019

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTIC AND MANAGEMENT OF POWER PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 519.233.6:621.314.212

А.В. Волошко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-3337-****
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Я.С. Бедерак, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-2669-0965
Публичное акционерное общество «АЗОТ», г. Черкасы

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 110 КВ И ВЫШЕ

Целью исследования является определение технического состояния силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше.

Трансформатор представляет собой важный элемент в цепи передачи электроэнергии от электростанции к потребителю и является сложным техническим объектом, который оценивается большим количеством параметров, значения которых могут изменяться в широком интервале. Поэтому для оценки состояния трансформатора свертка нормализованных параметров состояния при помощи аддитивного или мультипликативного обобщенных критериев неэффективна. Доказана целесообразность использования для оценки состояния и ранжирования нескольких силовых трансформаторов функции желательности Харрингтона. Функция Харрингтона применима при наличии односторонних ограничений на параметры состояния трансформаторов.

Для выявления неудовлетворительного состояния силовых трансформаторов предложено в число оцениваемых включать трансформатор с минимально допустимыми параметрами. Ранжирование группы трансформаторов относительно трансформатора в неудовлетворительном состоянии позволяет определить необходимость проведения ремонта каждого трансформатора. Такой прием возможно обобщить на другие технические объекты.

Ключевые слова: силовой трансформатор, параметры состояния, частная и обобщенная функции желательности Харрингтона.

Вступление. Силовой маслонаполненный трансформатор (СТ) напряжением 110 кВ и выше является одним из самых важных электрических аппаратов в цепи передачи электроэнергии от электростанций к потребителям. Состояние СТ характеризуется основными параметрами, имеющими равные веса:

1. пробивное напряжение трансформаторного масла (ТМ) (характеризует увлажненность масла в баке);
2. тангенс угла диэлектрических потерь ТМ (указывает на наличие примесей в ТМ в баке);
3. сопротивление изоляции каждой из обмоток (оценивает состояние изоляции обмоток);
4. тангенс угла диэлектрических потерь каждой из обмоток (характеризует стойкость изоляции по отношению к тепловому пробую, а также увлажнение изоляции и общее ее старение);
5. влагосодержание ТМ (указывает на старение масла).

Особенность параметров 1 и 3 – чем больше значение параметра, тем лучше состояние СТ, а параметров 2, 4 и 5 – чем больше значение параметра, тем хуже состояние СТ.

После получения набора параметров по каждому СТ необходимо ранжировать их по имеющимся параметрам, определить СТ с наилучшими и наихудшими характеристиками.

Это только самые главные параметры оценки технического состояния СТ, а общее количество их у СТ мощностью более 63 000 кВА и напряжением 110 кВ может достигать 30.

Одним из подходов к поиску решения многокритериальной оптимизации (МКО) есть сведение ее к однокритериальной (скалярной) оптимизации с целевой функцией $f(X)$. Иначе говоря, частичные критерии $F_i(X)$ тем или иным способом сочетаются в обобщенный критерий $(X) = \Phi[F_1(X), F_2(X), \dots, F_m(X)]$, который затем оптимизируется. Под построением обобщенного критерия в МКО понимается процедура, которая

"синтезирует" набор оценок по заданным частным условиям в единую численную оценку, что выражает итоговую полезность этого набора оценок для лица, принимающего решение [1].

Как правило, частные критерии имеют разную размерность. Поэтому при исчислении обобщенного критерия нужно работать не с натуральными критериями, а с их нормированными значениями. Нормированный критерий представляет собой отношение "натурального" частного критерия к некоторой величине, которая нормируется. Для нахождения значения нормализованного параметра технического состояния могут быть использованы следующие методы: по максимуму выбранного параметра из всех имеющихся, по минимуму выбранного параметра. Операция приведения масштабов локальных параметров к единому, безразмерному, называется нормализацией параметров [1].

При этом выбор делителя, который нормируется, должен быть обоснован. Потому что каждый критерий имеет разный физический смысл, то есть измеряется в различных единицах, масштабы критерия не сравниваются и невозможно сравнить качество полученных результатов по каждому критерию.

Когда все критерии (параметры) имеют равную вес, то обобщенный аддитивный критерий A получается путем сложения частных критериев. Мультипликативный критерий $П$ образуется путем простого перемножения частных критериев в том случае, когда они имеют одинаковый вес.

Иногда возникают ситуации, когда один техникий объект лучше по аддитивному критерию, другой – по мультипликативному. Тогда целесообразно для выбора объекта, который обладает лучшими параметрами технического состояния, ввести еще один решающий обобщенный критерий. Предложено в работе [2] применять для этой цели геометрический (морфологический) критерий, который имеет свойства как аддитивного, так и мультипликативного критерия.

Для оценки состояния СТ применение обобщенных мультипликативного, аддитивного или геометрического критериев не эффективно, потому что у нескольких параметров состояния СТ интервал, в котором могут находиться значения, может быть очень большим (например, сопротивление изоляции обмоток СТ может принимать значения от 20 до 100 000 МОм). Поэтому необходимо использовать другой метод нормализации и последующей свертки критериев (параметров) состояния СТ. В эксплуатации целесообразно оценивать и сравнивать состояние каждого СТ или с заводскими значениями, или с однотипным оборудованием. Большое расхождение параметров различных трансформаторов не дает возможности точно оценить их техническое состояние и принять меры по их улучшению.

На предприятиях и в электрических сетях (в «Облэнерго»), как правило, в эксплуатации находятся от 10 до 50 силовых трансформаторов (СТ) напряжением 110 кВ и выше.

Чтобы по 5-30 равновесным параметрам определить состояние трансформатора, необходимо иметь определенный опыт, знание конструкции. Когда единиц парка СТ обслуживается на предприятии немного (менее 10), то определить техническое состояние каждого СТ возможно, а когда их несколько десятков – это занимает много времени.

Анализ существующих методов оценки состояния технических объектов показал, что для комплексной оценки состояния СТ целесообразно применять функцию желательности Харрингтона [3]. Ось координат y' называется шкалой частных показателей. Ось d – шкалой желательности. В работе [4] изложено описание функции Харрингтона, в публикации [5] – описаны свойства функции. Функция Харрингтона успешно применяется для ранжирования автоматизированных систем управления [6] и различных объектов [7].

Цель и задачи. Целью данной работы является апробация использования функции желательности Харрингтона для оценки технического состояния нескольких СТ с последующим их ранжированием. Для достижения этой цели необходимо, используя данные измерений реальных СТ напряжением 110 кВ, разработать последовательность преобразования параметров СТ, вычисления значений желательности для каждого параметра и затем обобщенной функции желательности Харрингтона.

Материал и результаты исследований. Для сравнения состояния СТ используются реальные данные измерений их параметров (табл. 1).

Таблица 1 – Измеренные значения параметров технического состояния СТ

№п/п и тип СТ	Параметры технического состояния СТ				
	y_1 , кВ	y_2 , %	y_3 , МОм	y_4 , %	y_5 , г/т
СТ№1. ТРДЦН-80000/110	49,1	0,07	3770	0,32	19,9
СТ№2. ТРДЦН-80000/110	48,3	0,08	2555	0,62	19,3
СТ№3. ТРДЦН-63000/110	45,9	0,07	14580	0,35	16,4
СТ№4. ТРДЦН-63000/110	37,0	0,48	3503	0,45	21,9

Обозначения в табл. 1: Пробивное напряжение ТМ $U_{пр}$ – параметр y_1 ; тангенс угла диэлектрических потерь ТМ δ_m – параметр y_2 ; сопротивление изоляции обмотки высшего напряжения $R_{из}$ – параметр y_3 ; тангенс угла диэлектрических потерь обмотки высшего напряжения $\delta_{обм}$ – параметр y_4 ; влагосодержание ТМ C – параметр y_5 . На некоторые вышеприведенные параметры накладываются односторонние ограничения, например, на величину пробивного напряжения ТМ и тангенс угла диэлектрических потерь ТМ.

Для полного выяснения состояния СТ рекомендуется учитывать также концентрации газов, растворенных в ТМ, потери холостого хода и короткого замыкания. Но для определения лучшего СТ в расчетах в данной работе для упрощения расчетов будут учитываться только 5 указанных выше параметров.

Для построения обобщенной функции желательности D предлагается преобразовать измеренные значения критериев (параметров) y в безразмерную шкалу желательности d . Формула $d = \exp[\exp(y_i')]$ определяет функцию с двумя участками насыщения (в $d \rightarrow 0$ и $d \rightarrow 1$) и линейным участком (от $d=0,2$ до $d=0,63$). Шкала желательности, которую преобразуются значения частных критериев, является безразмерной психофизической шкалой. Она устанавливает соответствие между значениями критериев в физических шкалах субъективными оценками желательности того или иного значения соответствующего критерия.

Для построения шкалы желательности удобно использовать метод количественных оценок с интервалом значений желательности d от нуля до единицы. Промежуточные значения желательности и соответствующие им числовые отметки приведены в табл. 2 [4].

Таблица 2 – Базовые отметки шкалы желательности

Количественная отметка на шкале желательности d	Желательность значения критерия (параметра) y
0,80 – 1,00	Очень хорошо
0,63 – 0,80	Хорошо
0,37 – 0,63	Удовлетворительно
0,20 – 0,37	Плохо
0,00 – 0,20	Очень плохо

Такой выбор числовых отметок объясняется удобством вычислений, поскольку $d = 0,6 \approx 1 - 1/e$, а $d = 0,37 \approx 1/e$.

Для односторонних ограничений вида $y \leq y_{\max}$ или $y \geq y_{\min}$ формой преобразования y в d служит экспоненциальная зависимость:

$$d = \exp[-\exp(-y_i')], \quad (1)$$

где d – частная функция желательности, а безразмерная величина y_i' вычисляется по формуле $y_i' = b_0 + b_1 y_i$ (связана с параметром оптимизации y_i линейным законом). Формула преобразования y в d для двухсторонних ограничений приведена в [4].

Коэффициенты b_0 и b_1 можно определить, если задать для двух значений y_i' соответствующие значения желательности, предпочтительно в интервале $0,3 < d < 1,0$. Для определения коэффициентов b_0 и b_1 используется следующий прием [4]: худшему значению параметра оптимизации y_i присваивается значение желательности, равное 0,37, а лучшему – значение желательности, равное 0,98 (табл. 1).

Для параметра оптимизации y_1 согласно уравнения (1):

$$\begin{aligned} 0,37 &= \exp[-\exp(-y_1')] \text{ отсюда } y_1' = -\ln(-\ln 0,37) = 0,006; \\ 0,98 &= \exp[-\exp(-y_1')] \text{ отсюда } y_1' = 3,902. \end{aligned}$$

Для параметра оптимизации y_1 составлена система уравнений для определения коэффициентов b_0 и b_1 :

$$\begin{cases} b_0 + b_1 \cdot 37,0 = 0,006 \\ b_0 + b_1 \cdot 49,10 = 3,902, \end{cases}$$

где 37,0 – худшее значение параметра оптимизации y_1 , зафиксированное для СТ №4; 49,10 – лучшее значение пробивного напряжения ТМ у СТ №1 (табл. 1). Решая систему, получаем: $b_0 = -11,973$ и $b_1 = 0,324$. Тогда $y_1' = b_0 + b_1 y_1 = -11,973 + 0,324 y_1$.

Аналогично составляются системы уравнений для параметров оптимизации y_i . Решая их, имеем:

$$y'_2 = b_0 + b_1 y_2 = 4,590 - 9,554 y_2.$$

$$y'_3 = b_0 + b_3 y_2 = -0,831 + 0,000326 y_3.$$

$$y'_4 = b_0 + b_1 y_4 = 8,100 - 13,056 y_4.$$

$$y'_5 = b_0 + b_1 y_5 = 15,599 - 0,712 y_5.$$

Зная безразмерные величины y'_i , по формуле (1) определяются частные функции желательности d_i для всех параметров состояния, приведенных в табл. 1. Затем вычисляется обобщенная функция желательности, предложенная Харрингтоном. Для критериев равного веса она представляет собой среднее геометрическое частных функций желательности

$$D = \sqrt[i]{d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_i}, \quad (2)$$

где $d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_i$ - желательный уровень (частная функция желательности) 1-го, 2-го и т.д. параметра оптимизации (изменяется от 0 до 1); i - число параметров оценки технического состояния.

Число этих показателей может быть неодинаковым для разных СТ. Это позволяет сравнивать обобщенные коэффициенты даже тогда, когда отсутствует часть параметров сравнения у некоторых СТ. Корень n -й степени «сглаживает» возникающие отклонения, а полученный результат позволяет оценивать состояние СТ [5].

Значения частных функций желательности d_i и обобщенная функция желательности Харрингтона D для каждого СТ сведены в табл. 3.

Таблица 3. – Частные и обобщенная функции желательности для СТ

№п/п и тип СТ	Функции желательности для каждого параметра технического состояния и ранг СТ						
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	D	Ранг (в порядке убывания D)
СТ№1. ТРДЦН- 80000/110	0,98	0,98	0,51	0,98	0,79	0,82	2
СТ№2. ТРДЦН- 80000/110	0,97	0,98	0,37	0,37	0,86	0,65	3
СТ№3. ТРДЦН- 63000/110	0,95	0,98	0,98	0,97	0,98	0,97	1
СТ№4. ТРДЦН- 63000/110	0,37	0,37	0,48	0,89	0,37	0,46	4

Использование функции Харрингтона позволяет ранжировать технические объекты с большим количеством параметров равного веса. Ранжировать можно в порядке убывания или возрастания обобщенной функции желательности Харрингтона D , рассчитанной по формуле (2).

У СТ, как известно, имеются односторонние ограничения на значения параметров состояния. Максимальные или минимально допустимые значения параметров состояния указаны в нормативных документах [8] та [9].

Целью оценки технического состояния является определение такого трансформатора, которому необходим капремонт или взвод с эксплуатации. Поэтому для решения такой задачи целесообразно выбрать один СТ с неудовлетворительными параметрами и относительно него сравнивать состояние определенного СТ. Таким образом, ранжирование СТ может быть намного эффективнее, если включить в группу нескольких СТ трансформатор с параметрами, которые свидетельствуют о неудовлетворительном его состоянии.

В работе приведен СТ с такими значениями параметров, согласно которым такой трансформатор подлежит в кратчайшие сроки капремонту с одновременной сушкой масла. Выбраны такие значения: пробивное напряжение ТМ $U_{пр}=35$ кВ (параметр y_1); тангенс угла диэлектрических потерь ТМ, приведенный к указанной в паспорте СТ температуре $\delta_m=2\%$ (параметр y_2); сопротивление изоляции обмотки высшего напряжения $R_{из}=50$ МОм, приведенное к указанной в паспорте СТ температуре (параметр y_3); тангенс угла диэлектрических потерь обмотки высшего напряжения, приведенный к указанной в паспорте СТ температуре $\delta_{обм}=2,5\%$ (параметр y_4); влагосодержание ТМ $C=30$ г/т (параметр y_5).

Значения пробивного напряжения и влагосодержания взяты с таблицы 6 Приложения 2 «Основные нормативно-технические показатели, які використовуються при проведенні випробувань та вимірювань параметрів обладнання та апаратів електроустановок споживачів» нормативного документа [8]. Другие параметры неудовлетворительного состояния в совокупности соответствуют такому СТ, который характеризуется увлажнением обмоток и масла. Как правило, в кратчайший срок ему нужно провести капитальный ремонт с сушкой масла.

Нормативно-технические показатели документа [8] соответствуют показателям оценки состояния оборудования документа [9].

После выбора значений параметров, свидетельствующих о неудовлетворительном состоянии СТ, производятся аналогичные приведенным выше расчеты.

Результаты расчетов сведены в табл. 4.

Таблица 4 – Измеренные и допустимые значения параметров технического состояния, функции желательности и ранги группы СТ

№п/п и тип СТ	Параметры технического состояния СТ										D	Ранг (в порядке убывания D)
	y ₁ , кВ	d ₁	y ₂ , %	d ₂	y ₃ , МОм	d ₃	y ₄ , %	d ₄	y ₅ , г/т	d ₅		
СТ№1. ТРДЦН-80000/110	49,1	0,98	0,07	0,98	3770	0,69	0,32	0,98	19,9	0,96	0,91	2
СТ№2. ТРДЦН-80000/110	48,3	0,97	0,08	0,98	2555	0,6	0,62	0,97	19,3	0,96	0,88	3
СТ№3. ТРДЦН-63000/110	45,9	0,95	0,07	0,98	14580	0,98	0,35	0,98	16,4	0,98	0,97	1
СТ№4. ТРДЦН-63000/110	37,0	0,56	0,48	0,95	3503	0,68	0,45	0,97	21,9	0,94	0,80	4
СТ с неудовлетворительными параметрами	35,0	0,37	2,0	0,37	50,0	0,37	2,5	0,37	35	0,37	0,37	5

Анализ результатов расчета (табл. 4) свидетельствует о том, что включение СТ с неудовлетворительными параметрами позволяет выяснить, как далеко находится конкретный трансформатор от неудовлетворительного состояния, определить необходимость ремонта. Результаты расчета показывают, что СТ №4 имеет удовлетворительное техническое состояние ($D=0,8$) и не требует в ближайшее время ремонта.

В таблицах 3 и 4 ранги СТ определялись в порядке убывания обобщенной функции Харрингтона. Сама функция Харрингтона найдена расчетным путем. Результаты значений рангов в обеих таблицах 3 и 4 одинаковые, что свидетельствует о правильности расчетов (ранги в обеих таблицах одинаковые: у СТ №3 ранг 1, у СТ№1 – 2, у СТ№2 – 3, у СТ№4 – 4).

Путем наработки данных о значениях обобщенной функции Харрингтона возможно будет сделать правильный вывод о техническом состоянии трансформаторов.

Таким образом, последовательность оценки технического состояния СТ при применения функции Харрингтона следующая:

1. Сбор данных о значениях параметров состояния каждого СТ из их группы.
2. Определение наличия одно- или двухсторонних ограничений на параметры.
3. Ранжирование каждого параметра состояния в группе СТ (от худшего до лучшего значения).
4. Присваивание худшему коэффициенту желательности значение 0,37, а лучшему – 0,98.
5. Определение безразмерной величины, связанной с параметром технического состояния y_i линейным законом; для худшего значения принимается $y_i' = -\ln(-\ln 0,37)=0,006$ и для лучшего значения $y_i' = -\ln(-\ln 0,98)=3,902$.
6. Расчет коэффициентов b_0 и b_1 в системе линейных уравнений:

$$\begin{cases} b_0 + b_1 \cdot y_i & \text{худшее} = 0,006 \\ b_0 + b_1 \cdot y_i & \text{лучшее} = 3,902. \end{cases}$$

7. Получение формулы для безразмерной величины $y'_i = b_0 + b_1 y_i$ при значениях параметра y_i между худшим и лучшим.

8. Расчет частных функций желательности $d = \exp[-\exp(-y'_i)]$ для i -го параметра.

9. Вычисление обобщенной функции желательности D по формуле (2).

10. Ранжирование СТ в порядке убывания (возрастания) обобщенной функции желательности.

11. Определение параметров трансформатора, которые свидетельствуют о его неудовлетворительном состоянии.

12. Повтор операций, указанных в п. 3÷10, причем худшее значение коэффициента желательности 0,37 присваивается трансформатору с плохими параметрами технического состояния.

13. Анализ состояния каждого из группы СТ предприятия по сравнению с трансформатором, у которого обобщенная функция желательности $D=0,37$.

Необходимо отметить, что предложенный подход применим для разнообразных технических объектов, которые оцениваются несколькими параметрами с одно- или двухсторонними ограничениями.

Выводы

1. Неэффективно использование обобщенных аддитивного и мультипликативного критериев качества для оценки технического состояния силовых трансформаторов.

2. Впервые применена функция желательности Харрингтона для контроля состояния трансформаторов по нескольким параметрам.

3. Предложено включать в группу имеющих в наличии силовых трансформаторов трансформатор с неудовлетворительными параметрами, что позволяет определить необходимость проведения ремонта оборудования.

4. Разработана последовательность оценки технического состояния силового трансформатора путем применения функции Харрингтона.

Список литературы

1. Горбунов В. М. Теория принятия решений: Учебное пособие / В. М. Горбунов. – ГОУВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – 2010. – 67 с.

2. Волошко А. В. Проблеми вибору оптимальної математичної моделі енергоспоживання на промислових підприємствах / А. В. Волошко, Я. С. Бедрак, Т. М. Лутчин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Вып. 5/8 (65). – С. 19 – 23. DOI: 10.15587/1729-4061.2013.18122.

3. Harrington E. C. Desirability function and its application / E. C. Harrington // Industrial Quality Control. – 1965.–V. 21 – № 10. – P. 49.

4. Использование функции желательности Харрингтона при решении оптимизационных задач химической технологии. Учебно-методическое пособие / Сост.: С. Л. Ахназарова, Л. С. Гордеев / РХТУ им. Д. И. Менделеева. – М. – 2003. – 76 с.

5. Пичкалев А. В. Применение кривой желательности Харрингтона для сравнительного анализа автоматизированных систем контроля // Вестник КГТУ. Красноярск. – 1997. – №1. – С. 128–132.

6. Головки С. В. Диагностика технического состояния судового электрооборудования на основе интеллектуального анализа данных / С. В. Головки // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – №2. – С. 90–95.

7. Беднова О. В. Использование функции желательности Харрингтона для оптимизации многокритериальной оценки состояния лесных экосистем в условиях урбанизированной территории / О. В. Беднова // Лесной вестник. – 2011. – №7. – С. 35–41.

8. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, затвержені наказом Міністерства палива та енергетики України 25.07.2006 р № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості 13.02.2012 № 91) зі змінами, затвердженими Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 16.11.2012 № 905.

9. Нормативний документ Мінпаливенерго України «Норми випробування електрообладнання» СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007, затверджений Наказом Міністерства палива та енергетики України від 15.01.2007 № 13.

УДК 519.233.6:621.314.212

A. Voloshko, Dr. Sc. Sciences., Prof., ORCID 0000-0003-3337-****
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"
Ya. Bederak, Cand.Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-2669-0965
Public company "AZOT" Cherkasy city

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

COMPLEX STATISTICAL DATA ANALYSIS OF ELECTRIC POWER CONSUMPTION, CONSUMPTION OF ENERGY RESOURCES AND PRODUCTION VOLUMES

Aims of this research are development of a complex statistical analysis algorithm for active electric power consumption data, consumption of energy resources and manufacturing products, implementation of statistical analysis in practice.

Proposed parameters and criteria, which can help to technical staff in factories, to provide optimal and economical operating of supply and distribution systems as electricity, water, gas, heat, compressed air, etc. for production facilities, based on the collected active electric power consumption data for previous periods, information about consumption dynamic.

It is concluded that the statistical analysis of the data, obtained for each type of engineering equipments (water supply and sewage, supply systems of compressed air, gas, electricity and steam) and various consumables coefficients (in the proposed algorithm) make possible to identify "weak areas" and to determine the most rational ways to optimize energy usage.

Keywords: power consumption, energy consumption, statistical data analysis.

References

1. Denisenko M.A. Investigation of electrical loads (on) pumping station / M. A. Denisenko, Ya. S. Bederak // *Energetika & Elektrifikatsia*. – 2012. – №5. – P. 3 – 11.
2. Volobriniskii S.D. Electrical Loads of Industrial Enterprises / S.D. Volobriniskii, G. M. Kaialov, P. N. Klein, B.S. Meshel. – SPb.: Energia, 1971. – 264 p.
3. Fokin Yu.A. Probabilistic and statistical methods in the calculation of power supply systems / Yu.A. Fokin. – M.: Energoatomizdat, 1985. – 240 p.
4. Shidlovskii A.K. Calculation of electrical loads in industrial power systems / A. K. Shidlovskii, G. Ya. Vagin, E. G. Kurennii. – M.: Energoatomizdat, 1992. – 224 p.
5. Gegelenko I.V. Methods of probabilistic modeling in calculations the characteristics of loads of consumers / I.V. Gegelenko, Yu. L. Saenko, V.P. Stepanov. – M.: Energoatomizdat, 1998. – 96 p.
6. Denisenko M.A. Special issue of power supply, tutorial: S.I.: Selecting Items of electricity supply system based on stochastic modeling of processes occurring in them / M. A. Denisenko. – K.: NTUU «KPI», 2009. – 288 p.
7. Denisenko M.A. A study of statistical consumption data of active energy and water consumption at the pumping station / M. A. Denisenko, A.И. Замулко, Ya. S. Bederak // *Promishlennaya energetika*. – 2014. – №3. – P. 12 – 16.
8. Stetsenko I.V. Construction of multifactor mathematical models of energy consumption at chemical manufacturing / I.V. Stetsenko, Ya. S. Bederak // *Energoberegienie, Energetika, Energoaudit*. – 2013. – №7. – P. 41 – 48.

УДК 519.233.6:621.314.212

А. В. Волошко, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-3337-****;
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Я.С. Бедерак, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-2669-0965
Публічне акціонерне товариство «АЗОТ» м. Черкаси

ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГОЮ ПОНАД 110 КВ

Метою дослідження є діагностування технічного стану силових трансформаторів напругою 110 кВ і вище. Трансформатор являє собою важливий елемент в колі передачі електроенергії від електростанції до споживача і є складним технічним об'єктом, який оцінюється великою кількістю параметрів, значення яких можуть змінюватися в широкому інтервалі. Тому для оцінки стану трансформатора згортка нормалізованих параметрів стану за допомогою адитивного або мультиплікативного узагальнених критеріїв неефективна. Доведено доцільність застосування для оцінки стану і ранжування кількох силових трансформаторів функцію бажаності Харрінгтона. Функція Харрінгтона застосовується при наявності односторонніх обмежень на параметри стану трансформаторів.

Для виявлення незадовільного стану силових трансформаторів запропоновано в число оцінюваних включати трансформатор з мінімально допустимими параметрами. Ранжування групи трансформаторів щодо трансформатора в незадовільному технічному стані дозволяє уточнити стан кожного трансформатора і визначити необхідність проведення ремонту. Такий прийом можливо розповсюдити на інші технічні об'єкти.

Ключові слова: силовий трансформатор, параметри стану, частна та узагальнена функції бажаності Харрінгтона.

Надійшла 08.11.2018
Received 08.11.2018

УДК 621.313.821

О.Л. Тимошук, канд.тех.наук, доц., ORCID 0000-0003-1863-3095

О.В. Вишневецький, аспірант, ORCID 0000-0001-7814-9030

А.С. Стулішенко, магістр, ORCID 0000-0001-9982-9246

Є.С. Ігнатюк, магістр, ORCID 0000-0002-4675-8728

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

АНАЛІЗ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ З ВСИПНИМИ ОБМОТКАМИ НА ОСНОВІ ЛАНЦЮГОВИХ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ

В статті представлено математичну модель високочастотних явищ в обмотках низьковольтних асинхронних двигунів з емалевою ізоляцією провідників за допомогою ланцюгових схем заміщення. Для оцінки вхідних і хвильових опорів застосована модель з зосередженими параметрами одноланкового або багатоланкового ланцюга. Проведено порівняння результатів отриманих на розроблених моделях різної складності та результатів експериментальних досліджень на прикладі низьковольтних асинхронних двигунів малої потужності зі всипними обмотками.

Ключові слова: високочастотні процеси, всипні обмотки електричних машин, ланцюгова схема заміщення, математична модель, вхідний опір, хвильовий опір, зосереджені параметри, розподілені параметри.

Математична модель обмотки

Дослідження роботи електричної машини і огляд комутаційних, хвильових і імпульсних процесів потребує математичного опису обмотки. В цілому реальна обмотка представляє складну систему. Очевидна неоднорідність системи, оскільки витки навіть однієї котушки мають різні параметри в залежності від положення в пазу, не кажучи про те що в межах одного витка питомі параметри активної і реактивної частини відрізняються. Очевидним є перехід від однієї котушки до іншої, тобто система є дискретною і однорідною. Тому широко уявлення обмотки у вигляді довгої однорідної лінії з розподіленими параметрами звичайно буде давати значні похибки при огляді процесів в середині обмотки. Для оцінки вхідних і хвильових опорів подібна модель з усередненими параметрами може застосовуватись. Однак для розрахунку режимів використання цієї моделі ускладнює розрахунки, не наближуючись до фізичної сутності[1].

Для оцінки можливого спрощення математичного опису вхідних опорів проведемо порівняння результатів отриманих на моделях різної складності, та дослідних результатів.

Порівняння частотних залежностей різних моделей обмотки

Обмотки електричних машин представляють системи елементів з частотнозалежними параметрами. При достатньо високих частотах магнітні потоки обмоток виражаються в потоки розсіювання, замикаючі в основному по немагнітних шляхах. Тому параметри обмоток на високих частотах практично не залежать від напруги. Розглядаючи дослідні частотні залежності $Z_{вх}(\omega)$, зняті для малих двигунів і аналогічні характеристики для крупних машин, можна зробити висновок про повну якісну схожість, але є великі розбіжності в конструкції і розмірах обмоток.

В цих залежностях характерним є величина і відношення резонансних частот в режимах х.х та к.з. Розглянемо ці відношення в різних моделях.

При представленні обмотки довгою однорідною лінією вхідний опір визначається рівнянням

$$Z_{вх} = \frac{Z_2 Ch \gamma l + Z_B Sh \gamma l}{Z_2 Sh \gamma l + Z_B Ch \gamma l}$$

Для граничних режимів – холостого ходу ($Z_2 = \infty$) і короткого замикання ($Z_2 = 0$) вхідні опори дорівнюють

$$Z_0 = Z_B \frac{ch \gamma l}{sh \gamma l} \quad \text{та} \quad Z_k = Z_B \frac{sh \gamma l}{ch \gamma l}$$

Для перших резонансних частот, нехтуючи втратами в системі

$$\gamma l = \sqrt{Z'Y'} \cong j\omega l \sqrt{L'C'} = j\omega \sqrt{LC}$$

© О.Л. Тимошук, О.В. Вишневецький, А.С. Стулішенко, Є.С. Ігнатюк, 2019

де Z' і Y' - питомі опори і провідність.

Відповідно $Z_0 = -jZlctg(\omega\sqrt{LC})$ і $Z_k = jZ_btg(\omega\sqrt{LC})$

Перші резонансні частоти питомих вхідних опорів лінійної моделі відносяться як 1:2.

Частоти перших гармонік $/k=0/$ по умовам резонансу напруг відповідно дорівнюють

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2\sqrt{LC}} \quad i \quad \omega_k = \frac{\pi}{\sqrt{LC}}$$

Для цепної моделі вільні перехідні функції на вході цепі із m п- подібних чотирьохполосників.

$$A_0(t) = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{C'}{L'}} \sum_{k=1}^m \frac{\cos^2 \frac{a_k}{2}}{\sin \frac{a_k}{2}} \sin \omega_k t$$

де $a_k = \frac{2K-1\pi}{2m}$, $\omega_k = \frac{2}{\sqrt{L'C'}} \sin \frac{a_k}{2}$

$$A_k(t) = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{C'}{L'}} \sum_{k=1}^m \frac{\cos^2 \frac{a_k}{2}}{\sin \frac{a_k}{2}} \sin \omega_k t$$

де $a_k = \frac{K\pi}{2m}$, $\omega_k = \frac{2}{\sqrt{L'C'}} \sin \frac{a_k}{2}$

При $k=1$ і $m \rightarrow 0$ коефіцієнти $a_k \rightarrow 0$, але індуктивності $L' = \frac{L}{m}$ і ємності $C' = \frac{C}{m}$ кожного чотирьохполосника також прагнуть до 0 і відповідно

$\omega_{1x} = \frac{\pi}{2\sqrt{LC}}$ і $\omega_x = \frac{\pi}{\sqrt{LC}}$, тобто отримані вирази аналогічні лінійної моделі.

При скороченні кількості ланок відповідні частоти будуть змінюватися[2].

При обмеженій кількості ланок кола ($m=1$; $m=2$ і $m=3$) частоти відповідно будуть дорівнювати (результати аведено в):

$$\begin{aligned} m=1 \quad \omega &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{LC}}; & \omega_k &= \frac{2}{\sqrt{LC}}; & \frac{\omega_k}{\omega_x} &= \sqrt{2} \\ m=2 \quad \omega &= \frac{1,532}{\sqrt{LC}}; & \omega_k &= \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{LC}}; & \frac{\omega_k}{\omega} &= 1,85 \\ m=3 \quad \omega_0 &= \frac{1,554}{\sqrt{LC}}; & \omega_k &= \frac{3}{\sqrt{LC}}; & \frac{\omega_k}{\omega} &= 1,93 \end{aligned}$$

Таблиця 1 – Порівняння дослідних і розрахункових резонансних частот

Двигун типу	Замер при f=10 Гц		Досліди			Довга лінія			Цепна лінія		
	L (r)	C а (пф)	ω_1	ω_2	$\frac{\omega_2}{\omega_1}$	$\omega_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{LC}}$	$\omega_2 = \frac{\pi}{\sqrt{LC}}$	$\frac{\omega_2}{\omega_1}$	$\omega_1 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{LC}}$	$\omega_2 = \frac{2}{\sqrt{LC}}$	$\frac{\omega_2}{\omega_1}$
4AX7IHB	0.1	1160	157.	251.10 ³	1.5	145.10 ³	291.10 ³	2.0	130	185	1.42
4AX80A4Y	0.01	920	10 ³	502.10 ³	9	385.10 ³	772.10 ³	0	346	491	1.41
В	8	720	345.	1004	1.4	345.10 ³	691.10 ³	2.0	310	440	9
4A100Л43	0.01	720	10 ³	10 ³	5	238.10 ³	476.10 ³	0	214	303	1.41
А02-41-4	2		489 10 ³	62810 ³	2.0			2.0			9
	0.01		358 10 ³		6			0			1.41
	6				1.7			2.0			5
					9			0			

Для оцінки втрат в системі, що визначають параметри моделі, були проведені дослідні по виміру $tg\delta$ і добротність обмотки $Q = \frac{\omega L}{R}$ при різних станах обмотки. Однак такі виміри можуть бути проведені тільки в області низьких частот. В той самий час втрати в ізоляції дуже цінні з точки зору інформації про її стан. Однак в загальному випадку складно достовірно оцінити зміну складових втрат при зміні частоти навіть при постійному стану ізоляції. Для загальної оцінки добротності системи були розглянуті резонансні явища як по частотним залежностям вхідних опорів Z_0 і Z_k так і по резонансним відношенням напруги на виході і вході обмотки в режимі х.х

Потрібно одразу відмітити що другий метод виявився мало ефективним, з огляду на істотного зсуву резонансних частот при зміні стану ізоляції. Так при вимірах по схемі рис.1.а. були отримані наступні залежності для сухої нової ізоляції

F кГц	10	20	30	40	45	50	55	60
U1 ,В	9.2	9.2	9.2	10.12	9.4	9.4	10.0	9.4
U5 ,В	10	12.42	20.2	30.64	33.3	40.5	45.5	32

Після режиму тепло-вологого старіння резонанс відповідно спостерігався на частоті 25~27.5 кГц, і співвідношення напруги було $U_1 = 11В$, $U_5 = 34В$, $U_1 = 11.8В$ і $U_5 = 36В$, тобто добротність системи зменшилась в 1.5 раз. Порівнюючи слабку залежність добротності можна пояснити тільки різко вираженою залежністю втрат в системі від частоти. Тому для оцінки цих факторів було сталих численне моделювання з оцінкою збіжності за досліджуваним даним [3]. Були задані варіанти сталих $tg\delta = \frac{G}{\omega C} = 0.002; 0.08; 0.2$ $Q = 4; 10; 20$ для двигунів 4АХ71Н8 з параметрами $L = 0.1$ Гн, $C = 1200$ Пфі двигуна 4АХ80А4У3 з параметрами $L = 0.018$ Гн, $C = 920$ Пф.

Зміни частоти задавались в межах від 50 до 200000 Гц.

В основу розрахункової моделі було покладено довгу однорідну лінії спрощену ланцюгову схему. При розрахунку використовувались такі основні співвідношення, та результати розрахунків приведені на рис.2-3.

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

Де $e^{-ja} = \cos A - jsinA$; та $cth(x+jy) = \frac{shx - jsin2y}{ch2x - cos2y}$

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

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

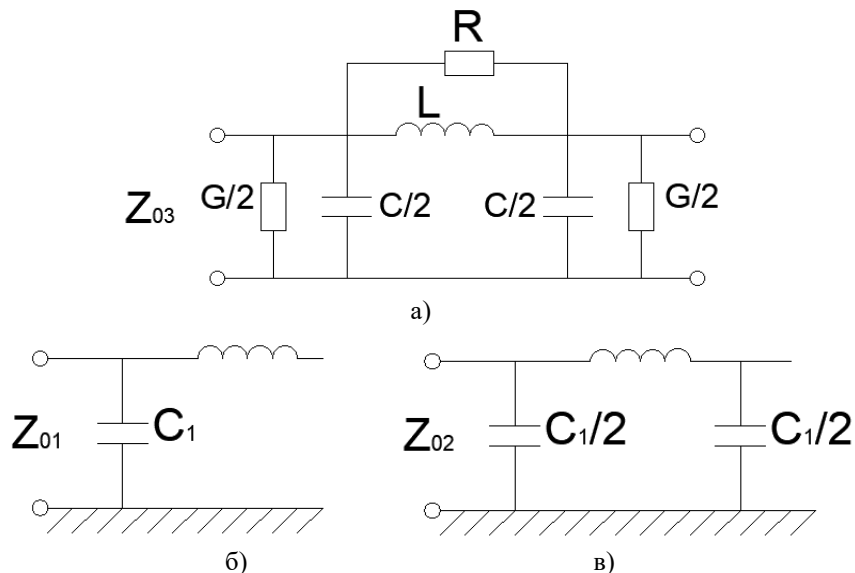


Рисунок 1 – а) розрахунок ланцюгової лінії б,в) – порівняння дослідних частотних залежностей з результатами розрахунків по спрощеній схемі

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

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

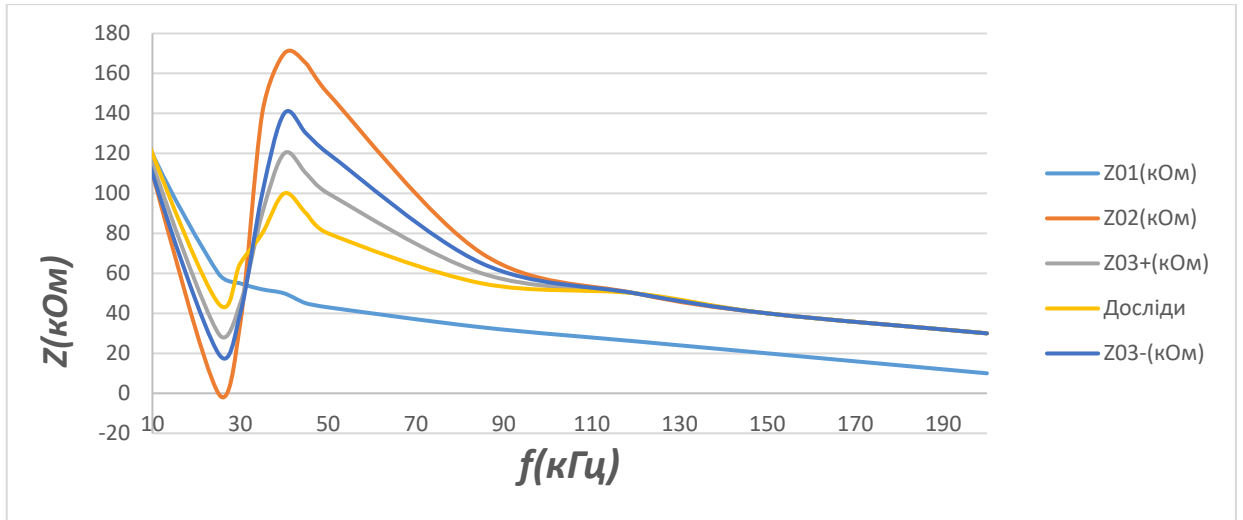


Рисунок 2 – Б – двигун типу 4AX71H8

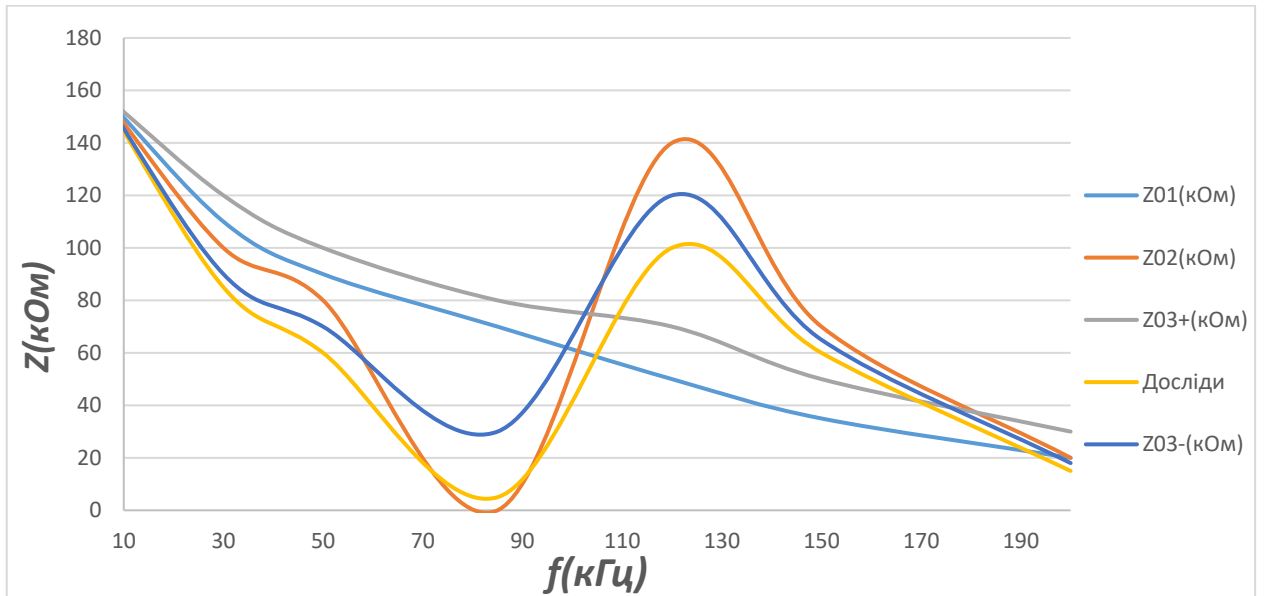


Рисунок 3 –в – двигун типу 4AX80L443

$$\varphi_0 = \operatorname{arctg} \frac{-j \operatorname{Im}|Z_0|}{\operatorname{Re}|Z_0|}$$

$$2 - Z_k = \sqrt{\frac{L}{C}} e^{-j\frac{1}{Q} + tg\delta} \operatorname{th} \frac{\omega}{2} \sqrt{LC} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta \right) + j \frac{\omega}{2} \sqrt{LC} \sqrt{4 - \left(\frac{1}{Q} + tg\delta \right)^2} = A e^{-ja} * \operatorname{th}(x + jy), \text{ де } (x + jy) = \frac{\operatorname{sh}(2x) + j \sin(2y)}{\operatorname{ch}(2x) + \cos(2y)}$$

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

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

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

$$3 - |Z_B| = \sqrt{|Z_0| \cdot |Z_k|} \text{ і } \varphi_B = \frac{\varphi_0 + \varphi_k}{2}$$

Для режимів холостого ходу і короткого замикання I_m і R_e представляють уявну і дійсну складову опору. З приведених розрахунків видно, що варіація Q і $tg\delta$ при приблизній рівності $\left(\frac{1}{Q} + tg\delta\right)$ дає близькі криві і, як наслідок, знайти $tg\delta$ з ціллю оцінки стану ізоляції не представляється можливим. Таким чином, аналіз вхідних опорів не дає можливості виділити $tg\delta$ на підвищених частотах. Це ж підтверджує аналіз розрахованих моделей[4].

Якщо розглянути просту модель обмотки у вигляді одного чотириполосника, то можна відмітити, що для режиму холостого ходу можливі два резонанси – резонанс напруги і резонанс струмів. Якщо розглядати приблизні умови резонансу, то при резонансі напруги на частоті $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ опір ланцюга $Z_1 - I_1$, буде визначатись тільки активним опором $Z_p \cong \frac{\omega L_1}{Q} + \frac{tg\delta}{\omega C}$ де $tg\delta_2 \approx tg\delta$ відповідає уявленню Y_1 , у вигляді послідовного з'єднання ємності C_1 і активного опору. При цьому $Z_1 \approx \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta \right) = \sqrt{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \left(\frac{1}{Q} + tg\delta \right)$. Резонанс струмів в режимі к. з. має місце при частоті $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Провідність при цьому $y = \omega C_1 \left(\frac{1}{Q} + tg\delta \right)$, а опір $Z_{k1} \approx \sqrt{\frac{L}{C_1}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{Q} + tg\delta}$.

Очевидно, що якщо відома величина Q , то можна знайти $tg\delta$, але оскільки залежність $Q(\omega)$ складна, використовувати цей метод в такому вигляді неможливо.

В експериментах використовувались і інші методи оцінки добротності схеми[5].

Висновок

Використання в якості моделі довгої лінії і ланцюгової схеми з довільною кількістю ланок дає порівнянні результати

Кращий збіг з дослідними результатами дає використання моделі ланцюгової схеми з обмеженою кількістю ланок при оцінюванні за частотами резонансу

При розрахунках і аналізі системи на частотах до першої резонансної можливе використання найпростішої ланцюгової схеми при $m=1$

Визначення основних параметрів моделі – індуктивності L і ємності C легко здійснюється дослідним або розрахунковим шляхом. Основну складність являє собою визначення складових відносних втрат, особливо на підвищених частотах.

Список використаної літератури

1. Каганов З. Ч. Цепные дроби в электротехнике, часть I. Издательство «Наука», Сибирское отделение, Новосибирск, 1966
2. Борисоглебский П. В. Физические основы и методы профилактики промышленной изоляции. Госэнергоиздат, 1949.
3. Мамиконянц Л. Г. Контроль влажности изоляции электрических машин и трансформаторов по изменению емкостей их обмоток. Электрические станции, 1945
4. В. Г. Каганов Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы.
5. Boldea, I., & Nasar, S. A. (2010). The induction machines design handbook (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.

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

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

A. Stulyshenko, master ORCID 0000-0001-9982-9246

Ye. Ignatyuk, master ORCID 0000-0002-4675-8728

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

ANALYSIS OF HIGH-FREQUENCY PROCESSES IN ASYNCHRONAL MOTORS WITH ABSORPTION WELDING ON THE BASIS OF CHANNEL LAYERING SCHEMES

The article presents a mathematical model of high-frequency phenomena in windings of low-voltage asynchronous motors with enamel isolation of conductors with the help of chain replacement schemes. For evaluation of input and wave impedance, a model with lumped parameters of a single-valley or multi-link chain is used. A comparison of the results of the developed models of various complexity and the results of experimental studies on the example of low-voltage asynchronous low-power motors with bulging windings is made.

Keywords: high-frequency processes, bulging windings of electric machines, circuit diagram of substitution, mathematical model, input resistance, wave resistance, concentrated parameters, distributed parameters.

References

1. Kaganov Z. Ch. Chain fractions in electrical engineering, part I. Nauka Publishing House, Siberian Branch, Novosibirsk, 1966
2. Borisoglebsky P.V. Physical bases and methods for the prevention of industrial isolation. Gosenergoizdat, 1949.
3. Mamikonyants LG, Insulation humidity control of electrical machines and transformers to change the capacity of their windings. Electric stations, 1945
4. V. G. Kaganov Electrical circuits with distributed parameters and chain diagrams.
5. Boldea, I., & Nasar, S. A. (2010). The induction machines design handbook (2nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.

О.Л. Тимошук, канд.тех.наук, доц. ORCID 0000-0003-1863-3095

А.В. Вишневикий, аспирант ORCID 0000-0001-7814-9030

А.С. Стулишенко, магистр ORCID 0000-0001-9982-9246

Є.С. Ігнатюк, магистр ORCID 0000-0002-4675-8728

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

АНАЛИЗ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С ВСЫПНЫМИ ОБМОТКАМИ НА ОСНОВЕ ЦЕПНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

В статье представлены математическая модель высокочастотных явлений в обмотках низковольтных асинхронных двигателей с эмалевой изоляцией проводников, с помощью цепных схем замещения. Для оценки входящих и волновых сопротивлений применена модель с сосредоточенными параметрами однозвенной или многозвенной цепи. Проведено сравнение результатов полученных на разработанных моделях различной сложности и результатов экспериментальных исследований на примере низковольтных асинхронных двигателей малой мощности по всыпным обмоткам.

Ключевые слова: высокочастотные процессы, всыпные обмотки электрических машин, цепная схема замещения, математическая модель, входное сопротивление, волновое сопротивление, сосредоточенные параметры, распределенные параметры.

Надійшла 17.12.2018

Received 17.12.2018

УДК 621.315.61:621.311

Р.В. Вожаков, асистент, ORCID 0000-0001-8534-6227
В.М. Кириленко, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6168-2469
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗПОДІЛ УСТАЛЕНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ В ІЗОЛЯЦІЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ ПРИ НАЯВНОСТІ СТОРОННІХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛОТИ

Стаття присвячена розгляду температурного режиму роботи електричної ізоляції циліндричної форми, за наявності сторонніх джерел теплоти. Проведено стислий аналіз найпоширеніших методів розрахунку (моделювання) усталеного теплового режиму роботи ізоляції електрообладнання. На основі диференційного рівняння теплопровідності, яке описує тепловий режим фізичного тіла, вперше знайдено аналітичний вираз поперечного розподілу усталеної температури в шарі циліндричного діелектрика для експоненційної температурної залежності діелектричних втрат на електропровідність і додаткового нагрівання діелектрика від сторонніх джерел теплоти. Розглянуто вплив потужності діелектричних втрат і сторонніх джерел теплоти, а також геометричних розмірів ізоляції на розподіл усталеної температури вздовж шару діелектрика і його максимальну температуру. Наведено відповідні графічні залежності, на основі яких зроблено висновки про вплив нагрівання як від діелектричних втрат, так і від сторонніх джерел теплоти, а також геометричних розмірів ізоляції на її температурний режим.

Ключові слова: розподіл температури, циліндрична ізоляція, діелектричні втрати, сторонні джерела теплоти.

Вступ. Важливою частиною електротехнічного електрообладнання, яка визначає його працездатність, є ізоляція. Розробка методів, що дозволять уникнути відмови електротехнічного обладнання в процесі експлуатації, має ґрунтуватися на максимально адекватному описі розвитку процесів руйнування.

Найбільш суттєвий вплив на характеристики високовольтної ізоляції електротехнічних пристроїв має теплове старіння, що призводить до прискореного спрацювання ресурсу, а при аномальних режимах роботи обладнання і до теплового пробою, пов'язаного з порушенням теплової рівноваги між діелектричними втратами в електричній ізоляції і тепловіддачею в навколишнє середовище [1].

Для діелектричних матеріалів, що використовуються в електротехніці, характерним є експоненціальне зростання діелектричних втрат на електропровідність, що є причиною теплового пробою, в залежності від температури. Більш того, в реальних конструкціях електрично навантажений діелектрик часто знаходиться поряд зі стороннім тепловим джерелом (струмопровідна жила, обмотка, активна сталь, активний елемент, тощо). В результаті, крім виділення теплоти від діелектричних втрат через ізоляцію проходить певна кількість теплової енергії від сторонніх джерел теплоти, що призводить до підвищення температури і додаткового нелінійного і неадитивного нагрівання через експоненціальну залежність діелектричних втрат від температури і підвищує імовірність теплового пробою.

В загальному випадку при визначенні можливості відмови обладнання розглядають тепловий стан ізоляції. Існує узагальнена теорія теплового пробою діелектриків з врахуванням несиметричних умов охолодження, тепловиділення в електродах і зміни питомої активної провідності по товщині зразка [2]. Однак, її метою є знаходження виразу для пробивної напруги, використовуючи диференційне рівняння теплопровідності, яке описує тепловий режим ізоляції, не знаходячи розподілу температури в явному вигляді.

В роботі [3] за допомогою застосування чисельних методів до диференційного рівняння, що характеризує рівноважний тепловий стан ізоляції, отримано графіки розподілу температури по товщині циліндричного діелектрика з врахуванням залежності параметрів діелектрика від температури і координати для симетричних і несиметричних (внутрішній електрод термоізольований) умов охолодження, але без додаткового підігрівання від сторонніх джерел теплоти.

В деяких інженерних розрахунках, наприклад, при визначенні допустимого струму високовольтного кабелю [4], [5], тепловий режим ізоляції визначають в вигляді перепадів температур між різними елементами (послідовними шарами) за допомогою «теплового закону Ома», де фігурують потоки теплоти і теплові опори. В цьому методі враховується потік теплоти від струмоведучої жили, однак для полегшення розрахунків при визначенні діелектричних втрат в ізоляції не враховується залежність її

параметрів від температури, що призводить до завищеного розрахункового перепаду температур і припустимо тільки для малих товщин [5, с.169]. В роботі [6] співставлення результатів подібних розрахунків температурного режиму кабелю з експериментом показує, що розрахункова температура вища за експериментальну. Причиною завищених розрахункових значень може бути невірне урахування розподілу діелектричних втрат, що можуть складати від 50 до 220% втрат в струмоведучих жилах [4, с.177], по товщині ізоляції.

Вперше явний аналітичний вираз для розподілу температури плаского діелектрика з врахуванням експоненційної залежності $tg\delta$ від температури і сторонніх джерел теплоти було отримано в роботі [7]. Однак, на практиці дуже часто використовується циліндрична конфігурація ізоляції (кабелі, високовольтні вводи, трансформатори струму), для якої характерним є нерівномірний розподіл напруженості електричного поля на відміну від пласкої конфігурації, де вона до нагрівання діелектрика розподілена рівномірно. Це повинно, разом зі сторонніми джерелами теплоти, приводити до відмінності розподілу температури в діелектриках пласкої і циліндричної конфігурацій.

Мета та завдання. Метою даної роботи є дослідження впливу різних факторів, а перш за все сторонніх джерел теплоти, на розподіл температури в ізоляції циліндричної форми. Задачами є знаходження аналітичного виразу для розподілу температури в циліндричній ізоляції з врахуванням експоненційної залежності $tg\delta$ від температури і сторонніх джерел теплоти і побудова відповідних температурних залежностей.

Матеріал і результати досліджень. Для представлення циліндричної ізоляції електрообладнання у вигляді тривимірної моделі доцільно скористатися циліндричними координатами ρ , φ , z (рис.1). Вісь z направлена вздовж осі порожнистого циліндра. Його геометричні розміри r_1 , r_2 і l . В діелектрику ($r_1 < r < r_2$) виділяються температурозалежні діелектричні втрати P_d , спричинені електричним полем. До поверхні з радіусом r_1 підходить потік теплоти від стороннього джерела – P_S (омічні втрати). На поверхні $r = r_2$ в навколишнє середовище віддається теплота Q .

Для математичної моделі прийняті наступні припущення:

- $l \gg r$ ($S_{\text{біч}} \gg S_{\text{попер}}$) і тому можна знехтувати тепловіддачею через торцеву поверхню і вважати, що тепловий потік спрямований тільки вздовж радіуса.
- Провідник розглядається тільки як стороннє теплове джерело, яке забезпечує проходження крізь площину $r = r_1$ постійного теплового потоку P_S і реальний розподіл температури з врахуванням високої теплопровідності металу в ньому не розглядається [8].
- Тепловіддача в зовнішнє середовище на поверхні ізоляції відбувається за законом Ньютона.
- При розв'язуванні задачі враховується залежність напруженості змінного електричного поля E [В/м] тільки від r згідно формули:

$$E = U / \left(r \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \right). \quad (1)$$

- Передбачається, що виділення теплоти при змінній напрузі обумовлено втратами на електропровідність. Отже, потужність внутрішнього джерела теплоти представляється в вигляді:

$$P_d = \iiint p_0 e^{a(T-T_0)} dV, \quad (2)$$

$$p_0 = \omega \epsilon_0 \epsilon_r E^2 tg\delta_0 = \omega \epsilon_0 \epsilon_r \left(U / r \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \right)^2 tg\delta_0 = \frac{p_0'}{r^2}. \quad (3)$$

де U , [В] – робоча напруга; ω , [рад/с] – кругова частота; ϵ_0 – електрична стала, рівна $8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ϵ_r – відносна діелектрична проникність; $tg\delta_0$ – тангенс кута діелектричних втрат при температурі T_0 ; a , [K^{-1}] – температурний коефіцієнт $tg\delta$; p_0' , [Вт/м] – лінійна густина діелектричних втрат при $T = T_0$.

При прийнятих припущеннях можна перейти до двовимірного випадку в полярних координатах, а з врахуванням симетрії по φ , задача зводиться до одновимірної.

Тоді рівняння, що характеризує рівноважний тепловий стан ізоляції електротехнічного обладнання, з врахуванням зроблених припущень, запишеться у вигляді:

$$\frac{\lambda_T}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{p_0'}{r^2} e^{a(T-T_0)} = 0, \quad (4)$$

де T , [K] – температура ізоляції в точці на відстані r від центра; λ_T , [Вт/(м·К)] – коефіцієнт теплопровідності електричної ізоляції, що приймається сталим.

Граничні умови для даної задачі по [9] будуть мати вигляд:

$$T(r_1) = T_M; \quad -\lambda_T \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_1} = p_S, \quad (5)$$

$$T(r_2) = T_{II}; \quad \lambda_T \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_2} = -q = -\alpha_T (T_{II} - T_0), \quad (6)$$

де T_M , [K] – максимальна температура ізоляції; $p_S = \frac{I^2 \rho}{2\pi r_1 S_{жс}}$, [Вт/м²] – питомий потік потужності сторонніх джерел теплоти (нагрівання жили); α_T , [Вт/(м² K)] – коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище; T_{II} , [K] – температура поверхні ізоляції.

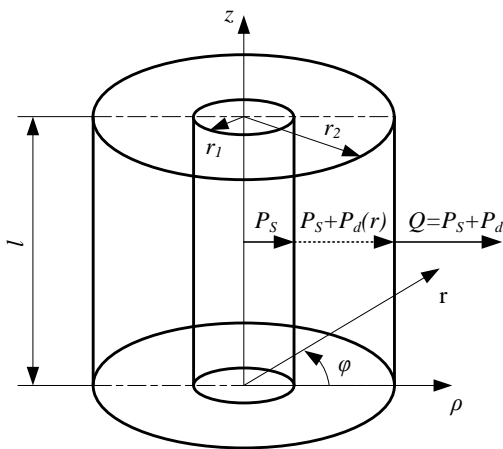


Рисунок 1 – Модель діелектрика в циліндричних координатах

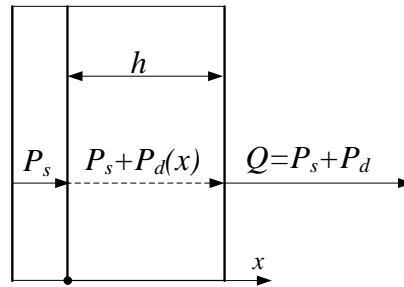


Рисунок 2 – Одновимірна модель циліндричного діелектрика в плоских координатах

З метою спрощення рівняння перейдемо від циліндричних координат до плоских (рис. 2). Для цього зробимо заміну $x = r_2 \ln \frac{r}{r_1}$ (при $r = r_1$ $x = 0$, при $r = r_2$ $x = r_2 \ln \frac{r_2}{r_1} = h$). Тоді $dx = \frac{r_2}{r} \frac{dr}{r} = \frac{r_2}{r} dr$, $dr = \frac{r}{r_2} dx$ і рівняння (4) приймає вигляд:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = -\frac{p_0'}{\lambda_T r_2^2} e^{a(T-T_0)}, \quad (7)$$

а граничні умови:

$$T(x)|_{x=0} = T_M, \quad \left. \frac{dT(x)}{dx} \right|_{x=0} = -\frac{r_1 p_S}{r_2 \lambda_T}; \quad (8)$$

$$T(x)|_{x=h} = T_{II}, \quad \left. \frac{dT(x)}{dx} \right|_{x=h} = -\frac{\alpha_T}{\lambda_T} (T_{II} - T_0), \quad (9)$$

Розв'язання рівняння (7) при граничних умовах (8) та (9) і поверненні до полярних координат, дає шуканий вираз для розподілу температури в циліндричному діелектрику:

$$T(r) = T_0 + \frac{1}{a} \ln \left(\frac{C}{B} \cdot \frac{4\alpha\beta \left(\frac{r}{\eta}\right)^\gamma}{\left(\alpha + \beta \left(\frac{r}{\eta}\right)^\gamma\right)^2} \right), \quad (10)$$

де $\alpha = |r_2 \lambda_T \sqrt{C} - \eta p_S|$, $\beta = |r_2 \lambda_T \sqrt{C} + \eta p_S|$, $\gamma = a \sqrt{C} \cdot r_2$, $B = \frac{2p_0'}{a \lambda_T r_2^2}$,

$$C = \left(-\frac{\eta p_S}{r_2 \lambda_T} \right)^2 + \frac{p_0'}{a \lambda_T r_2^2} e^{a(T_M - T_0)}.$$

Максимальну температуру T_M при $r = \eta$ можна визначити, розв'язавши чисельними методами трансцендентне рівняння, отримане з граничної умови (9), відносно C :

$$-\lambda_T \left(\frac{\alpha - \beta \left(\frac{r_2}{\eta}\right)^\gamma}{\sqrt{C} \left(\alpha + \beta \left(\frac{r_2}{\eta}\right)^\gamma\right)} \right) = \frac{\alpha_T}{a} \ln \left(\frac{C}{B} \cdot \frac{4\alpha\beta \left(\frac{r_2}{\eta}\right)^\gamma}{\left(\alpha + \beta \left(\frac{r_2}{\eta}\right)^\gamma\right)^2} \right), \quad (11)$$

а потім, використовуючи C , розрахувати T_M .

Вплив геометричних розмірів ізоляції (η, h) на розподіл температури в циліндричній ізоляції з сторонніми джерелами теплоти проілюстровано на рис. 3 та 4. В якості вихідних даних були прийняті наступні величини: питомий потік потужності сторонніх джерел теплоти $p_S = 150 \text{ Вт/м}^2$; лінійна густина діелектричних втрат $p'_0 = 0,2 \text{ Вт/м}$; коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_T = 10 \text{ Вт/(м}^2\text{-К)}$; температурний коефіцієнт $tg\delta$ $a = 0,02 \text{ К}^{-1}$; коефіцієнт теплопровідності ізоляції $\lambda_T = 0,2 \text{ Вт/(м-К)}$; температура навколишнього середовища $T_0 = 20^\circ\text{C}$; довжина – $l = 1 \text{ м}$; для рис. 3 товщина шару діелектрика $h = 0,005 \text{ м}$; внутрішній радіус $\eta = 0,001 \dots 0,1 \text{ м}$, а для рис. 4 $h = 0,001 \dots 0,1 \text{ м}$; $\eta = 0,001 \text{ м}$. Екстремуми в обох залежностях викликані тим, що при використанні циліндричних електродів співвідношення $r_2 / \eta = e$ забезпечує мінімум напруженості електричного поля в ізоляційному проміжку [10, с.67], що, в свою чергу, значно зменшує підігрівання ізоляції від діелектричних втрат, оскільки $P_d \sim E^2$.

При незмінній товщині (рис. 3) збільшення внутрішнього радіуса ізоляції вешті призводить до певного насичення поверхневої і максимальної температури, коли зміна η не призводить до відчутних температурних змін. В свою чергу зміна товщини ізоляції (рис. 4) призводить до насичення тільки поверхневої температури, в той час як максимальна температура продовжує відчутно збільшуватись при збільшенні h .

Вплив сторонніх і внутрішніх (діелектричних) джерел теплоти на максимальну температуру ізоляції (на внутрішньому радіусі) в залежності від товщини ізоляційного слоя показано на рис. 5 і 6.

Розрахунки виконані при змінних значеннях частини параметрів: питомий потік потужності сторонніх джерел теплоти $p_S = 100 \dots 200 \text{ Вт/м}^2$ (рис. 5) і $p_S = 150 \text{ Вт/м}^2$ (рис. 6); лінійна густина діелектричних втрат $p'_0 = 0,2 \text{ Вт/м}$ (рис. 5) і $p'_0 = 0,005 \dots 0,5 \text{ Вт/м}$ (рис. 6); внутрішній радіус $\eta = 0,001 \text{ м}$; товщина слою діелектрика $h = 0,001 \dots 0,1 \text{ м}$.

В обох залежностях спостерігається мінімум максимальної температури ізоляції при оптимальній товщині, що забезпечує оптимальний тепловий режим ізоляції і електрообладнання в цілому. Вплив

сторонніх джерел теплоти на значення максимальної температури досить сильний, особливо при малих товщинах (рис. 5). Обриви ліній залежності на рис. 6 свідчать про неможливість існування усталеного теплового режиму при більших значеннях тепловиділення в ізоляції. Причому, при наближенні до цих режимів спостерігається різке зростання максимальної температури при незначному збільшенні лінійної густини діелектричних втрат. Діелектричні втрати, на відміну від сторонніх джерел теплоти (якщо не брати до уваги екстремум), більш-менш однаково впливають на максимальну температуру як при малих, так і при великих товщинах. До того ж на великих товщинах спостерігається незначне зменшення граничного значення лінійної густини діелектричних втрат, при якому ще можливий усталений тепловий режим. Це можна пояснити тим, що при збільшенні товщини збільшується об'єм ізоляції і, відповідно, сумарне виділення діелектричних втрат в електрообладнанні.

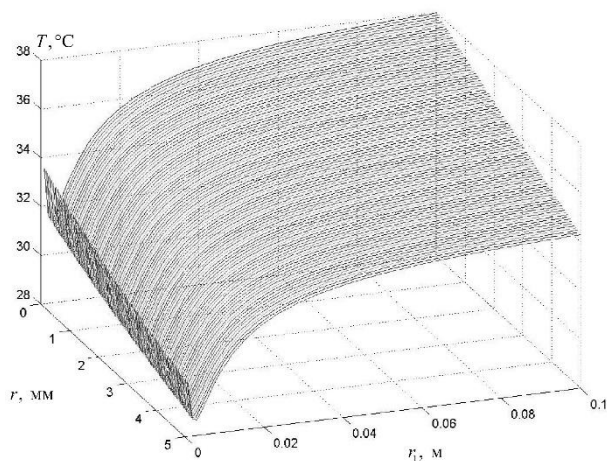


Рисунок 3 – Розподіл температури в циліндричному діелектрику в залежності від внутрішнього радіуса.

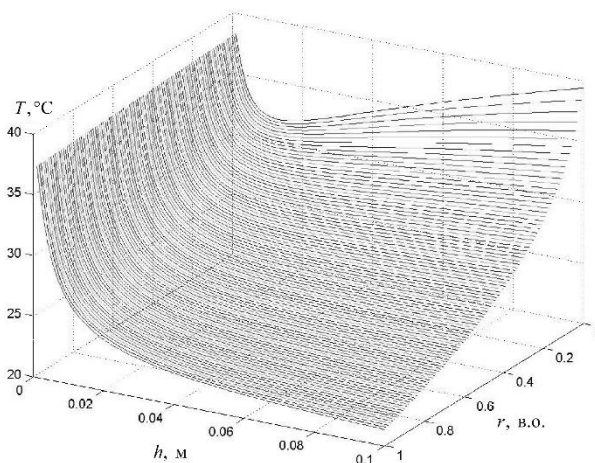


Рисунок 4 – Розподіл температури в циліндричному діелектрику в залежності від товщини.

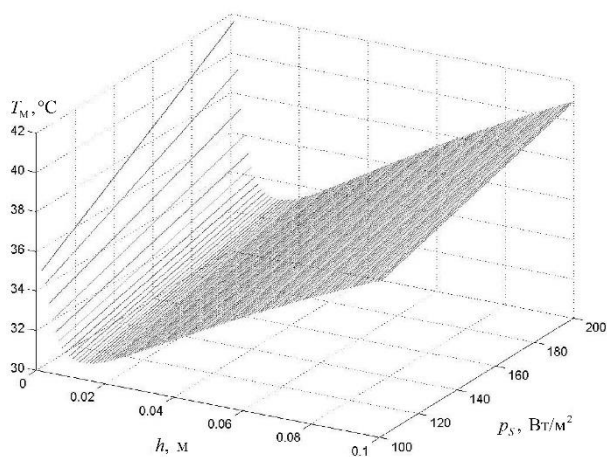


Рисунок 5 – Залежність максимальної температури в циліндричному діелектрику від h і p_s

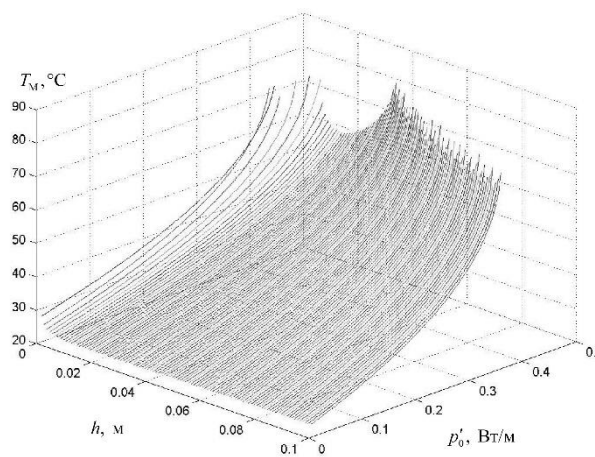


Рисунок 6 – Залежність максимальної температури в циліндричному діелектрику від h і p'_0

Висновки:

1. Отримано аналітичний вираз для розподілу температури в ізоляції циліндричної форми з врахуванням потоку теплоти від сторонніх джерел зі сторони внутрішнього радіуса і експоненційної залежності її $tg\delta$ від температури, що дозволить більш адекватно описувати розвиток процесів руйнування та спрацювання ресурсу високовольтної ізоляції електротехнічного обладнання, пов'язаних з тепловими режимами їх роботи.

2. Діелектричні втрати є визначальним режимним фактором для максимальної температури і загального температурного режиму циліндричної ізоляції і наближене їх обчислення без врахування температурозалежної зміни величини $tg\delta$ вздовж шару ізоляції, особливо при великих товщинах, де спостерігаються значні перепади температур, може стати причиною неточності розрахунків.

3. Сторонні джерела теплоти суттєво підвищують температуру циліндричної ізоляції, особливо при малих товщинах, про що свідчить розрахунок максимальної температури на її внутрішній поверхні, а значить впливають на спрацювання ресурсу ізоляції і на можливість її теплового пробую.

4. На температурний режим циліндричної ізоляції електрообладнання значною мірою впливають її геометричні розміри, оскільки на всіх досліджених залежностях існує явно виражений мінімум при загальновідомому співвідношенні внутрішнього і зовнішнього радіусів циліндричної ізоляції.

Список використаної літератури

1. Г. И. Сканава, Физика диэлектриков (область сильных полей). М.: Гос. изд., 1985.
2. С. Н. Койков, А. Н. Цикин, "Обобщение теории теплового пробоя твердых диэлектриков с учетом несимметричных условий охлаждения, тепловыделения в электродах и изменения активной проводимости по толщине образца." В сб.: Пробой диэлектриков и полупроводников, М.-Л.: Энергия, с. 277-284, 1964
3. J. J. O'Dwyer and B. L. Beers, "Thermal dielectric breakdown with cylindrical electrodes// Journal of Applied Physics" (ISSN 0021-8979), vol. 54, p. 4083-4086, July 1983. doi: 10.1063/1.332539
4. Э. Т. Ларина, Силовые кабели и кабельные линии: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Дмитриевский В. С. Расчет и конструирование электрической изоляции: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоиздат, 1981.
6. Д. И. Зализный, М. Н. Новиков, Н. М. Ходанович, А. Ю. Шутов, "Методика численного расчета нестационарных тепловых процессов в изоляции силового кабеля", Вестник Гомельского гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого, №4, с.86-95, 2010.
7. В. М. Кириленко, Чань Ван Тхань. "Распределение температуры в электротехническом материале при экспоненциально зависящем от температуры тепловыделении", Праці Інституту електродинаміки національної академії наук України. Електроенергетика, №2, с.200-205, 1999
8. Чан Ван Тхань. "Тепловой режим твердой электрической изоляции высоковольтного оборудования", дис. канд. наук, НТУУ «КПІ», Киев, 1999.
9. Э. М. Карташов, Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М.: Высш. школа, 1985.
10. Г. С. Кучинский. и др. Изоляция установок высокого напряжения: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987.

R. Vozhakov, Teaching Fellow, **ORCID ID** 0000-0001-8534-6227

V. Kyrylenko, Cand. Sc., Assoc. Prof., **ORCID ID** 0000-0002-6168-2469

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

SUSTAINED TEMPERATURE DISTRIBUTION (SPREADING) IN CYLINDRICAL INSULATION IN THE PRESENCE OF EXTRANEIOUS SOURCES OF HEAT

The article is devoted to the consideration of the temperature conditions of the electrical insulation of a cylindrical shape in the presence of extraneous sources of heat. A brief analysis of the most common methods of calculation (modeling) of the sustained thermal conditions of insulation of electrical equipment is carried out. On the basis of the differential heat equation, which describes the thermal conditions of the physical body, the analytical expression of the transverse temperature distribution in the cylindrical dielectric layer for the exponential temperature dependence of the dielectric losses on the electrical conductivity and the additional heating of the dielectric from extraneous heat sources was first discovered. The effect of power of dielectric losses and extraneous sources of heat, as well as geometrical sizes of insulation on the distribution of the sustained temperature along the dielectric and its maximum temperature is considered. The corresponding graphic dependences are presented. On its basis authors made conclusions about the influence of heating both on dielectric losses, and on extraneous sources of heat, as well as geometrical sizes of insulation on its temperature conditions.

Keywords: temperature distribution, cylindrical insulation, dielectric losses. extraneous sources of heat.

References

1. G. I. Skanavi, Physics of dielectrics (area of a strong field). M.: Gov. publ., 1985.
2. S. N. Koykov, F. N. Tsikin, " Generalization of the theory of thermal breakdown of solid dielectrics taking into account asymmetric cooling conditions, heat generation in electrodes and changes in the active conductivity through the specimen thickness." In the col.: Dielectric and semiconductor breakdown, M.-L.: Energiya, pp.277-284, 1964.
3. J. J. O'Dwyer and B. L. Beers, «Thermal dielectric breakdown with cylindrical electrodes// Journal of Applied Physics" (ISSN 0021-8979), vol. 54, pp. 4083-4086, July 1983. doi: 10.1063/1.332539
4. E. T. Larina, Power cables and cable lines: tutorial for a higher school. M.: Energoatomizdat, 1984
5. V. S. Dmitriyevskiy, Calculation and designing of electrical insulation. M.: Energoizdat, 1981.
6. D. I. Zaliznyy, M. N. Novikov, N. M. Khodanovich, A. YU. Shutov, "Method of numerical calculation of non-stationary heat processes in the insulation of a power cable" //P. O. Sukhoy Gomel gov. techn. un-ty Bulletin, vol.4, pp.86-95, 2010.
7. V. M. Kyrylenko, Chan' Van Tkhan'. "Temperature distribution in the electrotechnological material whith calorification exponentially depended on temperature", Works of the Institute of electrodynamics of the national academy of science of Ukraine. Electric power engineering, vol.2, pp.200-205, 1999.
8. Chan Van Tkhan', "Heat coditions of solid electrical insulation of high voltage equipment", Ph.D. thesis, Dept. Electrical eng. NTUU "KPI". Kiev, 1999.
9. E. M. Kartashov, Analytical methods in the theory of thermal conductivity of solids. M.: Higher school, 1985.
10. G. S. Kuchinskiy i dr., Insulation of a high voltage plants. M.:Energoatomizdat.,1987.

Надійшла 21.01.2019
Received 21.01.2019

УДК 532.529

Б.А. Кутний, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-0548-7925
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
А.М. Павленко, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8103-2578
Келецький технологічний університет (Польща)

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФАЗОВОПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ГАЗО-РІДИННИХ СИСТЕМАХ

Роботу присвячено дослідженню перехідних тепломасообмінних процесів що відбуваються у рідині, яка оточує газопарову бульбашку. Запропоновано числовий метод рішення, який дозволяє розраховувати температурні поля у рідині з урахуванням фазових переходів, руху стінки бульбашки та теплообмінних процесів біля її поверхні. Також враховано зміну теплофізичних характеристик рідини при зміні її температури. Наведено результати математичного моделювання теплообмінних процесів при розширенні та стисканні бульбашки. Порівняння мас промерзлих шарів показує, що при розширенні бульбашки інтенсивність фазовоперехідних процесів у рідині підвищується, а при стисканні – знижується, у порівнянні з нерухомою стінкою бульбашки. Аналіз отриманих результатів математичного моделювання показав, що вони є прогнозованими й повністю відповідають фізичним уявленням про перебіг теплообмінних та фазовоперехідних процесів у рідині. Розроблена математична модель може застосовуватися для оптимізації різноманітних технологічних процесів пов'язаних з кавітацією, кипінням та утворенням газових гідратів.

Ключові слова: теплофізичні характеристики рідини, газопарова бульбашка, теплообмін в двохфазному середовищі, фазові перетворення.

1. Вступ

В багатьох технологічних процесах газопарові бульбашки відіграють головну роль. В якості прикладу зазначимо наступні технології: дегазація води, перегонка нафтопродуктів, очищення поверхонь кавітацією, гомогенізація палива, змішування колоїдних розчинів, піноутворення в харчовій промисловості, тощо. Сучасні технології виготовлення теплоізоляційних матеріалів [1], опріснення морської води за допомогою гідрату ізобутану [2–4], отримання гідрату природного газу [5, 6] для транспортування та зберігання також ґрунтуються на тепломасообмінних процесах в газорідних системах.

Зазвичай утворення та існування газопарових бульбашок супроводжується інтенсивними теплообмінними, масообмінними та фазовоперехідними процесами. Складність здійснення «прямих» спостережень (малі розміри бульбашок, висока швидкість процесів) зумовили широке застосування методів математичного моделювання для дослідження. Математичні моделі дозволяють визначити найбільш впливові фактори та оптимізувати технологічні процеси. Коректність математичних моделей газопарових бульбашок визначається точністю урахування всіх теплофізичних процесів у рідині та газі.

Як правило, відомі методи розрахунку тепломасообмінних процесів такого типу лише наближено враховують температурний режим рідини та фазовоперехідні процеси, що відбуваються навколо газопарових бульбашок. Урахування перехідних процесів у рідині дозволить суттєво підвищити точність розрахунку та розширити межі застосування таких математичних моделей. Саме тому дослідження в даному напрямку є надзвичайно актуальними.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для підвищення точності моделювання теплообмінних процесів у газопаровій бульбашці необхідно враховувати перенесення теплоти в середовищі рідини. Ряд авторів приймають температуру рідини постійною: при розрахунку сплучення матеріалів [1], при визначенні термодинамічних характеристик парових [7] та кавітаційних бульбашок [8]. В роботі [9] температура рідини описується експоненційною функцією, котра не залежить від часу та напрямку руху стінки бульбашки. Деякі автори [10] вважають теплообмінний шар рідини настільки тонким, що кривизну поверхні бульбашки можна не враховувати. Проте, такі припущення можливі лише для дуже обмеженої групи задач. В роботі [11] для кавітаційних та в роботі [12] для парових бульбашок, наведено аналітичне вирішення задачі нестационарної теплопровідності в шарі рідини, що оточує осцилюючу бульбашку. Внаслідок введених автором припущень, у рішенні даної

задачі отримано розв'язок, у якому теплообмінний шар рідини рівний радіусу бульбашки і не залежить від теплофізичних характеристик рідини. В роботі [13] враховано лише теплопровідність в рідині, без урахування фазовоперехідних процесів. Огляд вищенаведених літературних джерел показує, що фазовоперехідні процеси в рідині, яка оточує газопарову бульбашку, досліджені недостатньо.

Температурний режим газу всередині бульбашки може змінюватися у широких межах: від температури нижчої за температуру замерзання рідини у періоди «росту» бульбашки до температури вищої за температуру кипіння рідини в періоди стискання бульбашки. Зміна фазового стану рідини призводить до значної зміни тепломасообмінних процесів на її границі.

Для розширення меж математичного моделювання газопарової бульбашки необхідно врахувати фазовоперехідні процеси теплопередачі в рідині, що оточує газопарову бульбашку. Внаслідок цього теплофізичні характеристики речовини на границі з бульбашкою можуть суттєво змінюватися. Особливостями даної задачі є рух стінки бульбашки, швидкість якої, в окремі моменти часу може сягати декількох десятків метрів за секунду.

3. Мета і завдання дослідження

Мета статті полягає у створенні математичної моделі передачі теплоти в рідині яка оточує осцилюючу газопарову бульбашку. Ця математична модель повинна враховувати рухливості стінки бульбашки, можливість фазовопрехідних процесів у шарах рідини та зміну її теплофізичних характеристик. Для перевірки працездатності математичної моделі в різних умовах необхідно виконати ряд розрахункових експериментів та проаналізувати отримані результати.

4. Математична модель фазовоперехідних процесів у рідині

Для розробки математичної моделі теплопередачі в рідині застосовано наступні спрощуючі припущення:

- біля поверхні бульбашки задано граничні умови другого роду;
- газопарова бульбашка має сферичну форму і оточена безкінечною кількістю рідини;
- центр бульбашки відносно рідини не переміщується.

Для визначення температури в товщі рідини, яка оточує газопарову бульбашку, необхідно розглянути процес теплопередачі в рідині. Для розрахунку теплопередачі шляхом теплопровідності зазвичай застосовують рівняння теплопровідності Фур'є, а урахувати конвекцію можна використовуючи ефективний коефіцієнт теплопровідності.

Позначимо через « x » координату, по якій змінюється радіус бульбашки. Для визначення невідомої температури на поверхні бульбашки та в масиві рідини ($T(x, \tau)$) можна застосувати нелінійне рівняння теплопровідності Фур'є для кулі з урахуванням рухливості її стінок [9] та дії об'ємних джерел теплоти

$$\frac{\partial(\rho_r c_r T(x, \tau))}{\partial \tau} + \dot{x} \frac{\partial(\rho_r c_r T(x, \tau))}{\partial x} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_r x^2 \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right) + q_v(x, T), \quad (1)$$

де ρ_r – густина рідини, кг/м³; c_r – її теплоємність, Дж/(кг°C); τ – часова координата, с; \dot{x} – швидкість зміни радіуса бульбашки, м/с; λ_r – ефективний коефіцієнт теплопровідності рідини, Вт/(м°C); q_v – потужність об'ємних джерел теплоти, Вт/м³. В результаті теплообмінних процесів на границі бульбашки рідина може змінювати свої теплофізичні характеристики, тому задачу будемо розв'язувати як нелінійну. Застосування джерел теплоти робить рівняння (1) неоднорідним.

Зважаючи на те, що біля поверхні бульбашки відомий питомий тепловий потік (q), запишемо граничну умову другого роду

$$-\frac{\partial \lambda_r T(R, \tau)}{\partial x} = q(R, \tau). \quad (2)$$

Рівняння (2) враховує зміну коефіцієнту теплопровідності на границі бульбашки, наприклад у разі замерзання рідини.

В такій постановці задачу зручно розв'язувати методом кінцевих елементів. Для опису теплопровідності в рідині, яка оточує бульбашку радіусом R , розділимо шар рідини на ряд концентричних оболонок (i), рис. 1. Задамо розподіл мас кожної оболонки

$$m_r(2) = 2K_r m_r(1), \quad m_r(i) = K_r m_r(i-1), \quad (3)$$

де $m_{r(1)}$ – маса оболонки 1-го (внутрішнього) шару, кг; $m_{r(i)}$ – маса кожної наступної оболонки, кг; K_r – коефіцієнт пропорційності. Цей коефіцієнт дозволяє «згустити» сітку елементів біля границі бульбашки і «розрідити» в більш глибоких шарах рідини. Він застосовується для оптимізації розрахунків і його типові значення знаходяться в межах 1,5–2.

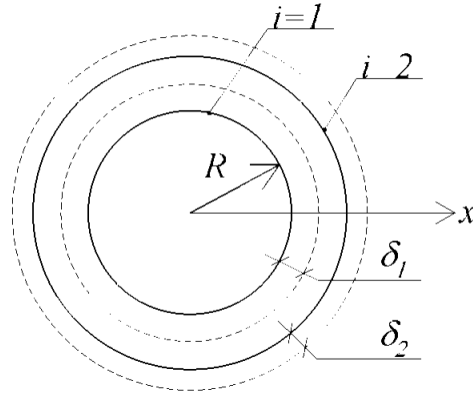


Рисунок 1 – Схема поділу рідини на ряд концентричних оболонок

Визначимо температуру на внутрішній поверхні першої (внутрішньої) оболонки. Для цього запишемо загальне диференціальне рівняння її теплового балансу

$$m_{r(1)}c_{r(1)}\frac{dT_{(R,\tau)}}{d\tau} = -F_R q_{(R,\tau)} + \frac{4\pi\lambda_{r(1)}(T_{(R+\delta_1,\tau)} - T_{(R,\tau)})}{\frac{1}{r(1)} - \frac{1}{r(1) + \delta_1}} + r_{\Phi} \frac{dm_{\Phi(1)}}{d\tau}. \quad (4)$$

де $c_{r(1)}$ – теплоємність середовища 1-ї оболонки, Дж/(кг°C). F_R – площа теплообмінної поверхні, м²; r_{Φ} – теплота фазового переходу, Дж/кг; $m_{\Phi(1)}$ – маса твердої фази оболонки 1-го (внутрішнього) шару, кг. Остання складова рівняння (4) існує лише за наявності фазового переходу.

Аналогічним чином можна записати диференціальні рівняння для усіх наступних оболонок

$$m_{r(i)}c_{r(i)}\frac{dT_{(x,\tau)}}{d\tau} = \frac{4\pi\lambda_r(T_{(i-1)} - T_{(i)})}{\frac{1}{r_{(i-1)}} - \frac{1}{r_{(i)}}} - \frac{4\pi\lambda_r(T_{(i)} - T_{(i+1)})}{\frac{1}{r_{(i)}} - \frac{1}{r_{(i+1)}}} + r_{\Phi} \frac{dm_{\Phi(i)}}{d\tau}. \quad (5)$$

В окремі моменти часу в різних оболонках можуть створюватися сприятливі умови для здійснення фазового переходу. При цьому потрібно враховувати три складових: температурний режим, масу твердої та рідкої фаз, дію об'ємних джерел теплоти. Умови фазового переходу першого роду складаються з двох частин: умова намерзання льоду та умова танення льоду. Умова намерзання льоду

$$T_{(r_i,\tau)} \leq T_{\Phi} \text{ та } m_{\Lambda(r_i,\tau)} < m_{(r_i,\tau)} \text{ та } Q_{\Phi(r_i,\tau)} > 0, \quad (6)$$

де T_{Φ} – температура фазового переходу, °C; $m_{\Lambda(r_i,\tau)}$ – маса твердої фази в i -му шарі у будь-який момент часу, кг; $Q_{\Phi(r_i,\tau)}$ – тепловий потік, який відводиться з i -го шару для здійснення фазового переходу, Вт.

Умова танення льоду

$$T_{(r_i,\tau)} \geq T_{\Phi} \text{ та } m_{\Lambda(r_i,\tau)} > 0 \text{ та } Q_{\Phi(r_i,\tau)} < 0. \quad (7)$$

Якщо у i -му шарі відбувається фазовий перехід, то температура цього шару не змінюється і

$$\frac{dT_{(r_i, \tau)}}{d\tau} = 0.$$

У цьому випадку потужність об'ємних джерел теплоти можна визначити за формулою

$$q_{v(i)} = \frac{4\pi}{V_{r(i)}} \left(K_3 \left(T_{(r_i, \tau)} - T_{(r_i - \delta i, \tau)} \right) - K_1 \left(T_{(r_i + \delta i, \tau)} - T_{(r_i, \tau)} \right) \right). \quad (8)$$

Аналогічним чином можна знайти потужність об'ємних джерел теплоти для 1-ї оболонки

$$q_{v(1)} = \frac{4\pi}{V_{r(1)}} \left(R^2 q - K_1 \left(T_{(R + \delta 1, \tau)} - T_{(R, \tau)} \right) \right). \quad (9)$$

Знаючи інтенсивність об'ємних джерел можна визначити зміну маси твердої фази.

$$m_{\Lambda(r_i, \tau + \Delta\tau)} = m_{\Lambda(r_i, \tau)} + \frac{q_{v(i)} \cdot \Delta\tau \cdot V_{r(i)}}{r_{\Phi}}. \quad (10)$$

У разі фазового переходу в i -му шарі рідини буде відбуватися зміна теплофізичних властивостей. Тому, на кожному ітераційному крокові теплофізичні характеристики шарів необхідно уточнювати за формулами:

– середня густина водо-льодяної суміші i -го шару

$$\rho_{r(i)} = \frac{\rho_{\Lambda(i)} m_{\Lambda(i)} + \rho_{w(i)} (m_{(i)} - m_{\Lambda(i)})}{m_{(i)}}; \quad (11)$$

– середня теплопровідність водо-льодяної суміші i -го шару

$$\lambda_{r(i)} = \frac{\lambda_{\Lambda(i)} m_{\Lambda(i)} + \lambda_{w(i)} (m_{(i)} - m_{\Lambda(i)})}{m_{(i)}}; \quad (12)$$

Зміна густини, при постійній масі, призведе до зміни розміру шарів, що може ускладнити розрахунковий процес. Враховуючи, що густина і теплоємність в формулі (1) застосовуються у вигляді добутку, зміну густини можна замінити еквівалентною зміною теплоємності. Це дозволяє отримати точне значення температури при незначній помилці в координаті. Наприклад, для фазового переходу вода-лід така помилка не перевищує 3%. З урахуванням поправки на густину теплоємність i -го шару визначається за формулою

$$c_{r(i)} = \frac{\rho_{r(i)}}{\rho_w} \times \frac{c_{\Lambda(i)} m_{\Lambda(i)} + c_{w(i)} (m_{(i)} - m_{\Lambda(i)})}{m_{(i)}}, \quad (13)$$

де ρ_w – густина рідини при початковій температурі, кг/м^3 . У цьому випадку густина усіх шарів задається однаковою $\rho_{r(i)} = \rho_w$.

Для розв'язку системи диференціальних рівнянь (4) та (5) застосовується метод Рунге-Кутта 4-го порядку [14]. З метою оцінки адекватності розробленої математичної моделі була написана комп'ютерна програма і виконано ряд математичних експериментів. Результати розрахунку відображено в наступних дослідях.

5. Результати досліджень фазовоперехідних процесів у рідині

Розглянемо тепломасообмінні процеси в рідині на початковому етапі барботажного введення бульбашок газу у воду [15]. Технологічно такі процеси характерні для карбонування [16], утворення гідрату ізобутану [17] та інших гідратів [18–20]. Тривалість розрахункового інтервалу часу 3–6 мкс (мікросекунд). Часовий крок 0,005–0,01 нс, питомий тепловий потік біля поверхні бульбашки (гранична умова 2-го роду) 1 МВт/м^2 . Початковий діаметр бульбашки 0,1 мм, початкова температура води $+0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розрахункових шарів 12, коефіцієнт $K_f=1,5$. Початкові значення теплопровідності, густини і теплоємності води прийняті при температурі $+0,5$ °С. Теплота фазового переходу вода–лід 335 кДж/кг. Температура парогазового середовища реальної бульбашки може змінюватися в досить широких межах. Для дослідження фазовоперехідних процесів у воді бульбашку з температурою парогазового середовища нижчою за температуру фазового переходу будемо називати «холодною». Бульбашку з температурою парогазового середовища вищою за температуру фазового переходу назвемо «гарячою».

Дослід № 1. Розглянемо бульбашку у воді що утворилася при барботажному дроселюванні газу через щільну насадку. Внаслідок ефекту Джоуля-Томпсона температура газу в бульбашці є нижчою за температуру оточуючої рідини. Вважаючи тиск газу в бульбашці рівним тиску води (з урахуванням сил поверхневого натягу), прийнемо швидкість руху стінок бульбашки рівною 0 м/с. Результати розрахунку температурного режиму рідини, яка оточує «холодну» бульбашку, зображено на рис. 2.

Дослід № 2. Якщо тиск газу в бульбашці перевищує тиск рідини – бульбашка розширяється. Розглянемо процеси в рідині під час розширення «холодної» бульбашки зі швидкістю стінки 10 м/с, оскільки така швидкість є характерною для резонансного режиму осциляцій бульбашки. Результати розрахунку зображено на рис. 3.

Дослід № 3. В процесі осциляції фаза розширення бульбашки змінюється фазою стиснення. Розглянемо процеси в рідині в період стиснення бульбашки з «холодним» газом зі швидкістю стінки -10 м/с. Результати розрахунку зображено на рис. 4.

Під час періоду стиснення бульбашки температура газу в ній підвищується і створюються сприятливі умови для танення льодяної кірки, що утворилася в попередніх стадіях осциляції бульбашки. З часом рух стінки бульбашки сповільнюється і починається процес розширення в умовах підвищеної температури газу. Наступна серія розрахунків проведена для дослідження фазовоперехідних процесів навколо «гарячої» бульбашки.

6. Обговорення результатів математичного моделювання фазовоперехідних процесів у рідині

Верхня частина рис. 2 показує порівняно швидке охолодження рідини до температур, близьких до температури фазового переходу (0 °С). Сам фазовий перехід спостерігаємо у вигляді майже горизонтальної площадки приблизно по центру діаграми. Ліва частина діаграми відображає процес охолодження льоду. Ступінчастий характер температури льоду пояснюється невеликою кількістю розрахункових шарів (12 шт.). За 2,0 мкс глибина промерзання складала 5 розрахункових шарів рідини навколо бульбашки.

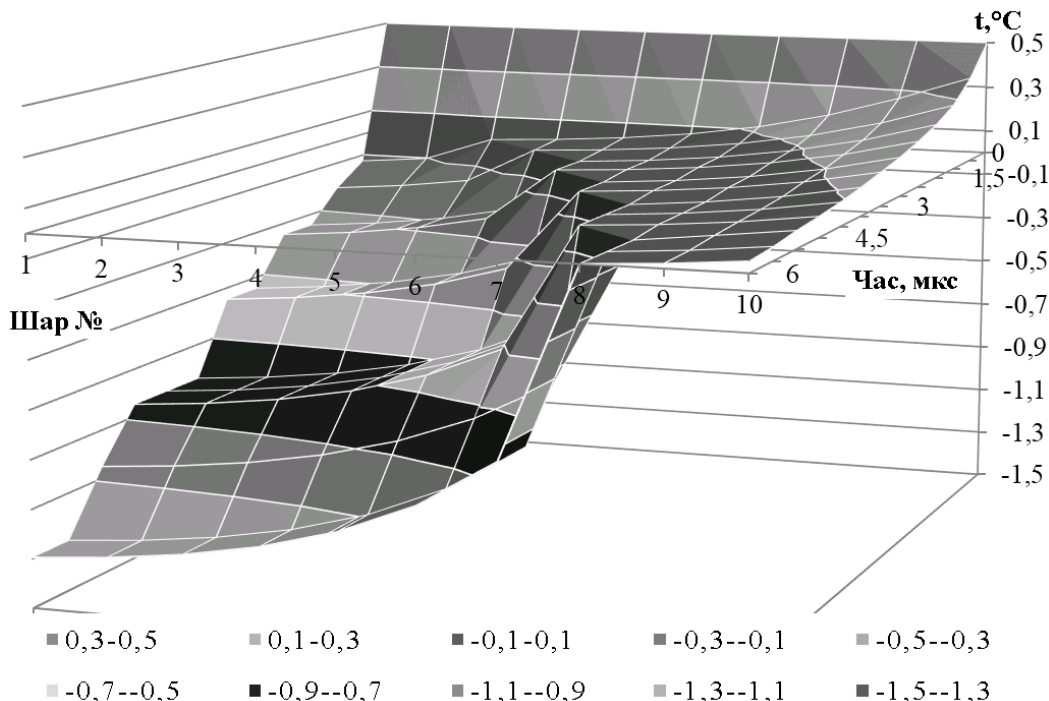


Рисунок 2 – Діаграма температурних полів у воді, що оточує «холодну» бульбашку з нерухомою стінкою ($\dot{R}=0$ м/с).

Як бачимо на рис. 3, за 2 мкс глибина промерзання складала 6 шарів рідини. Порівняння мас промерзлих шарів дослідів 1 та 2 показує, що при розширенні бульбашки промерзання рідини відбувається

скоріше приблизно у 1,6 рази. Це відбувається внаслідок збільшення площі теплообмінної поверхні при збільшенні розміру бульбашки. У лівій частині діаграми температура льоду має зубчастий характер. Невеликий підйом температури спостерігається внаслідок зменшення товщини і термічного опору оболонки у процесі розширення бульбашки. Загалом зменшення товщини оболонки з твердою фазою призводить до того, що температура поверхні бульбашки знаходиться ближче до температури фазового переходу, аніж у 1-му досліді.

Наведені на рис. 4 результати розрахунку стиснення «холодної» бульбашки показують, що у цьому випадку процес промерзання рідини значно сповільнюється. Зокрема товщина льоду склала лише 60 % від варіанту з нерухомою стінкою бульбашки. Це пояснюється зменшенням площі теплообмінної поверхні. Внаслідок збільшення товщини промерзаючих шарів відбувається підвищення термічного опору і температура на внутрішній поверхні бульбашки знижується скоріше, аніж у досліді 1 та 2.

Результати розрахунку нерухомої «гарячої» бульбашки показують порівняно швидке початкове прогрівання шарів льоду до температури фазового переходу. Порівнюючи результати з дослідом № 1 можна відмітити що процес танення відбувається майже з тією-ж швидкістю, що і процес замерзання. Цьому сприяє гранична умова 2-го роду. Майже у чотири рази менша теплопровідність води порівняно з льодом, призводить до більш інтенсивного нагрівання міжфазної поверхні рідини-газ.

Результати розрахунку стиснення «гарячої» бульбашки показують значне сповільнення процесу танення льоду порівняно з її розширенням. Температура внутрішніх шарів води зростає значно скоріше ніж у досліді з розширенням бульбашки. Цьому сприяють як збільшення товщини шарів води при стисненні бульбашки, так і значно менша теплопровідність води порівняно з льодом (приблизно в 4 рази). Зменшення кількості льоду, який розтав пояснюється зменшенням площі поверхні теплообміну і як наслідок, зменшенням загальної кількості теплоти, котра підводиться до міжфазної поверхні бульбашки.

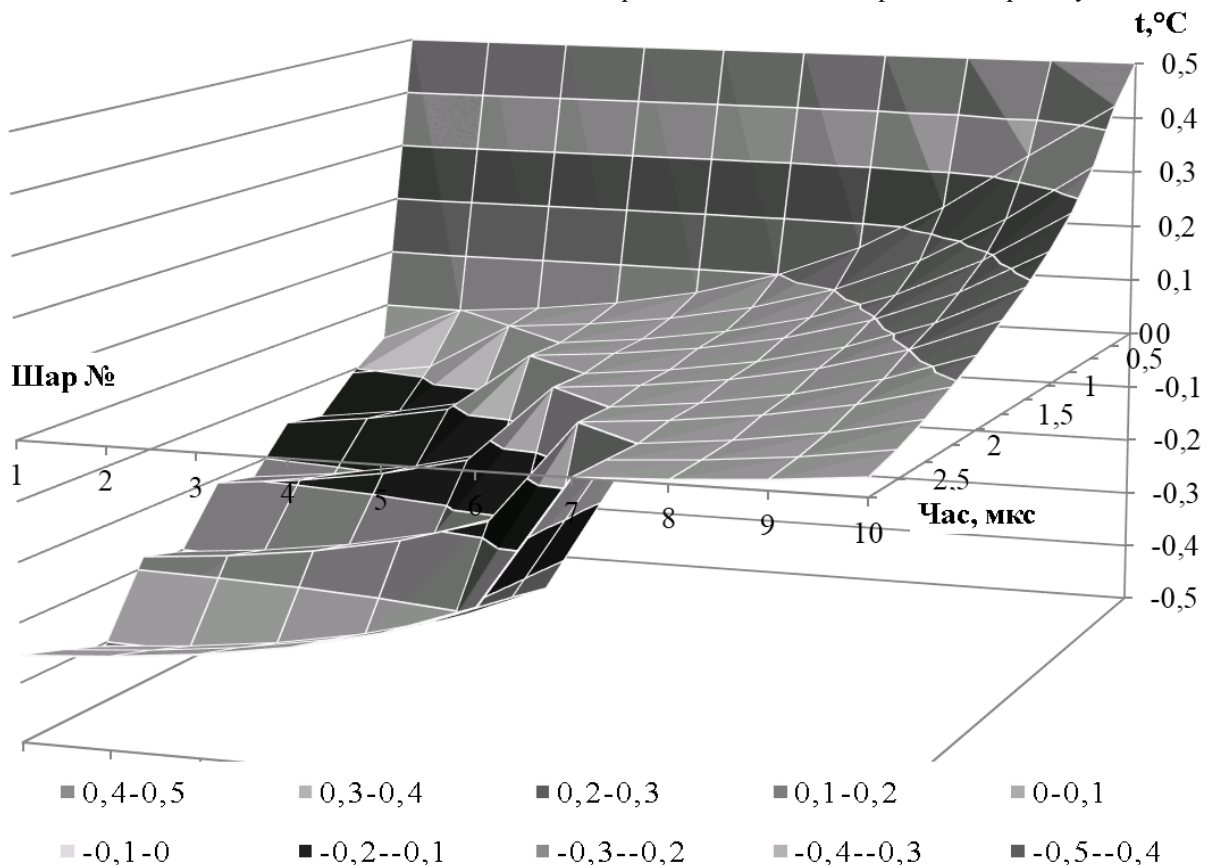


Рисунок 3 – Діаграма температурних полів у воді, що оточує «холодну» бульбашку, яка розширяється зі швидкістю $\dot{R}=10$ м/с.

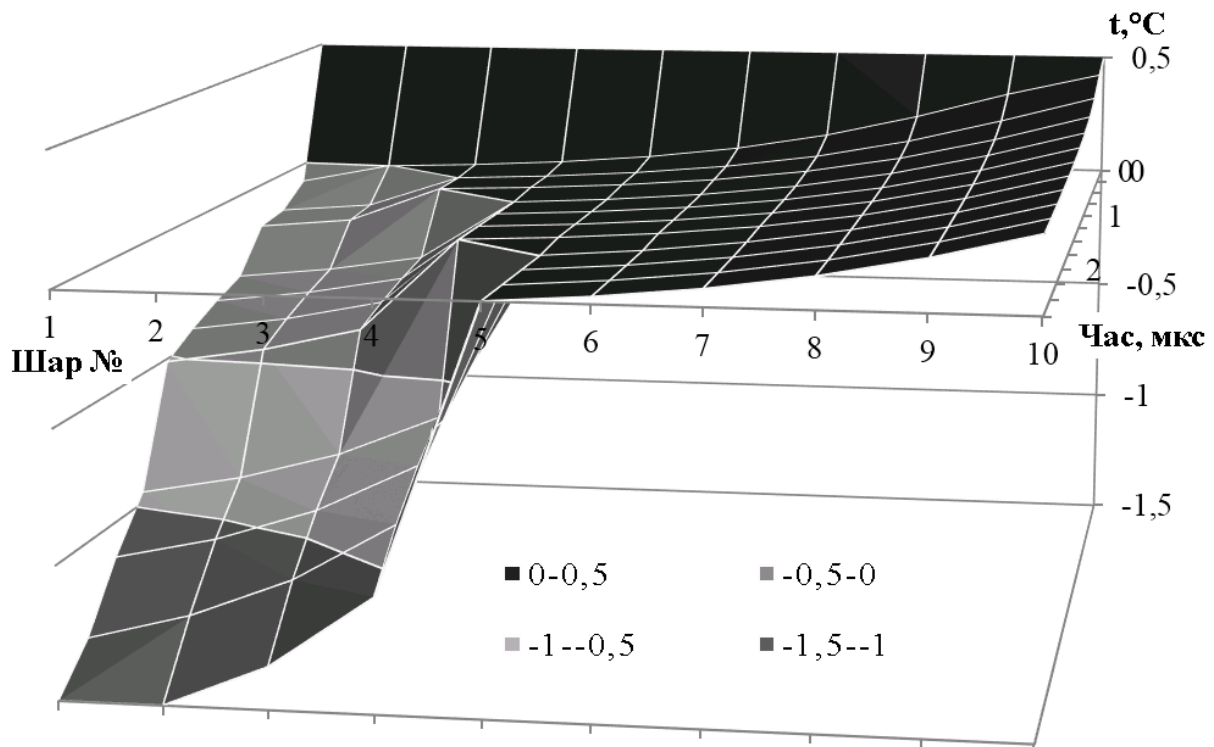


Рисунок 4 – Діаграма температурних полів у воді, що оточує «холодну» бульбашку, яка стискається на швидкості $\dot{R} = -10$ м/с.

Таким чином, за допомогою математичного моделювання отримано розподіл температурних полів у рідині в умовах фазовоперехідних процесів та зміни розміру бульбашки. Виконані дослідження показують що, застосований метод кінцевих елементів (3)–(13), для математичної моделі нестационарної передачі теплоти в рідині (1)–(2), яка оточує осцилюючу газопарову бульбашку коректно відображає фізичні процеси. Вона враховує зміну теплофізичних характеристик рідини (11)–(13), зміну розміру бульбашки (4)–(5), теплообмінні процеси на її границі (4) та фазовоперехідні процеси у товщі рідини (6)–(10). Створену математичну модель можна використовувати для оцінки термодинамічних параметрів двофазної рідини у різних технологічних процесах.

Запропонована методика розрахунку може застосовуватися для визначення теплофізичних характеристик рідини та пари у різноманітних технологічних процесах, пов'язаних з розчиненням газів у рідині, твердінням піни та утворенням газових гідратів.

7. Висновки

В статті розроблено математичну модель нестационарної теплопровідності рухливої стінки бульбашки, яка враховує зміну агрегатного стану та теплофізичних характеристик речовини. Показано, що при застосуванні методу кінцевих елементів вона представляє собою систему нелінійних диференціальних рівнянь 1-го порядку. Урахування в математичній моделі зазначених особливостей дозволяє у будь-який момент часу отримувати значення температур рідкої та твердої фаз при зміні розміру бульбашки, зміні напрямку теплового потоку на її границі. Для аналізу коректності математичного моделювання перехідних процесів у рідині виконано ряд оціночних розрахунків (дослідів). Їх суть полягала у перевірці відтворення математичною моделлю різних термодинамічних умов та режимів газопарової бульбашки: нагрівання і охолодження разом з фазовоперехідними процесами, стискування та розширення. Для кожного досліді побудовано діаграму температурних полів у речовині, що оточує газопарову бульбашку.

Наведені в роботі результати розрахунку для нерухомої бульбашки діаметром 0,1 мм при граничній умові 2-го роду показують, що швидкість замерзання льоду і швидкість його танення майже рівні, проте температура на міжфазній поверхні газ-вода приблизно у чотири рази більша за температуру поверхні газ-лід, що відповідає співвідношенню теплопровідності води та льоду. Температура в області фазового переходу рідина-лід практично постійна. Порівняння мас промерзлих шарів свідчить проте, що при розширенні бульбашки промерзання рідини та танення льоду відбувається скоріше ніж у нерухомій бульбашці приблизно у 1,6 рази. При стисканні бульбашки товщина льоду, що утворився чи розтанув приблизно в 1,7 рази менша порівняно з нерухомою стінкою бульбашки.

Таким чином, аналіз отриманих результатів показав, що вони є прогнозованими і повністю

відповідають фізичним уявленням про перебіг теплообмінних та фазовоперехідних процесів у рідині, а запропонована математична модель може застосовуватися для їх розрахунку.

Список використаної літератури

1. Pavlenko, A. M. Regularities of boiling-up of emulsified liquids / A. M. Pavlenko, B. I. Basok // *Heat Transfer Research*, – 2005. 36 (5), – pp. 419.
2. Якушев, В. С. Современное состояние газогидратных технологий / В. С. Якушев, В. Г. Квон, Ю. А. Герасимов, В. А. Истомина // – М.: ООО «ИРЦ Газпром», – 2008. – 88 с.
3. Takeya, S. Self-preservation effect and dissociation rates of CH₄ hydrate / S. Takeya, T. Ebinuma, T. Uchida et al. // *J. Crystal Growth*. – 2002. – V.237-239. – P. 379–382.
4. Stem, L.A. Temperature, pressure and composition effects on anomalous or "self preservation of gas hydrates / L.A. Stem, S. Circone, S.H. Kirby, W.B. Durham // *Can. J. Phys.* – 2003. – V.81. – P. 271–283.
5. Behkish, A. Novel correlations for gas holdup in large-scale slurry bubble column reactors operating under elevated pressures and temperatures / A. Behkish, R. Lemoine, R. Oukaci, B. I. Morsi // *Chemical Engineering Journal*. – 2006. Vol. 115, – P. 157–171.
6. Shahrzad Hashemi Dynamic Simulation of Gas Hydrate Formation in an Agitated Three-Phase Slurry Reactor / Hashemi Shahrzad, Macchi Arturo, Servio Phillip // *The 12th International Conference on Fluidization - New Horizons in Fluidization Engineering*. – 2007. Art. 39. – P. 329–336.
7. Шагапов В. Ш. К теории роста паровых пузырьков в метастабильной жидкости / В. Ш. Шагапов, В. В. Коледин // *Теплофизика высоких температур / Институт механики Уфимского научного центра РАН*. – 2013, том 51. – № 4. – С. 543–551.
8. Веретельник Т. И. Математическое моделирование кавитационного потока жидкости в химико-технологической системе / Т. И. Веретельник, Ю. Н. Дифучин / *Черкаський державний технологічний університет // Вісник ЧДТУ*. – Черк., – 2008. – №3. – С. 82 – 85.
9. Актершев С. П. Моделирование вскипания метастабильной жидкости при наличии фронтов испарения [Текст] / С. П. Актершев, В. В. Овчинников // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. – Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН. – 2013. – №1. – С. 77–82.
10. Нигматулин Р. И. Динамика и тепломассообмен парогазовых пузырьков с жидкостью [Текст] / Р. И. Нигматулин, Н. С. Хабеев // *Некоторые вопросы механики сплошной среды. (посвящено 70-летию акад. Л.И.Седова)*. М.: Ин-т механики МГУ, – 1978. – С. 229–243.
11. Кулінченко В. Р. Передумови створення математичної моделі – основні положення і рівняння руху Релея / В. Р. Кулінченко, В. Л. Зав'язлов, Т. Г. Мисюра // *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. – 2007. – №22. – С. 36–41.
12. Долинский А. А. Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. Модель динамики одиночного парового пузырька / А. А. Долинский, Г. К. Иваницкий // *Пром. теплотехника*. – 1995. Т.17, – №5. – С. 3–28.
13. Pavlenko, A.M., Basok, B.I. (2005). Kinetics of water evaporation from emulsions / A.M. Pavlenko, B.I. Basok // *Heat Transfer Research*. 36, (5), – P. 425–430.
14. Butcher, J. C. Numerical Methods for Ordinary Differential Equations / J. C. Butcher – New York: John Wiley & Sons, – 2008. – pp. 482.
15. Кушнір, С. В. Барботажні хімічні ефекти: їх види, механізми виникнення та геохімічні прояви / С. В. Кушнір, М. В. Кость, Р. П. Козак / *Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, м. Львів: Вода і водоочисні технології. Наково-технічні вісті №3 (20)*, – 2016. – С. 30–47.
16. Ермолаева, Г. А. Технология и оборудование производства пива и безалкогольных напитков / Г. А. Ермолаева, Р. А. Колчева // *Учеб. для нач. проф. образования*. – М.: ИРПО; Изд. центр «Академия», – 2000. – 416 с.
17. Мосин, О. В. Физико-химические основы опреснения морской воды / О. В. Мосин // *Сознание и физическая реальность*, – 2012, – № 1, – С. 19–30.
18. Семенов, М. Е. Синтез гидратов газов лабораторных условиях / М. Е. Семенов, Е. Ю. Шиц // *Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. XVII междунар. науч.-практ. конф. Часть II*. – Новосибирск: СибАК, – 2013. – С. 55–61.
19. Okutani, K. Surfactant effects on hydrate formation in an unstirred gas/liquid system: An experimental study using methane and sodium alkyl sulfates / K. Okutani, Y. Kuwabara, Y. Mori // *Chemical Engineering Science*,. – 2008. V.63. P. 183–194
20. Мельников В. П. Релаксационный ямр-анализ фазовых превращений воды в дисперсной системе вода/гидрат фреона -12/углеводород при диссоциации гидрата / В. П. Мельников, Л. С. Поденко, А. Н. Нестеров, А. М. Решетников // *ДАН*, – 2010. Т.433. – №1. – С. 59–61.

B. Kutnyi, PhD, Associate Professor ORCID 0000-0002-0548-7925
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
A. Pavlenko, Dr. Sc. Sciences., Prof. ORCID 0000-0002-8103-2578
Politechnika Świętokrzyska

MATHEMATICAL MODELING OF PHASE-TRANSFER PROCESSES IN GAS-LIQUID SYSTEMS

The results of designing the mathematical model of non-stationary thermal conductivity of the bubble's oscillating wall, with account of the changes in the aggregate state and the thermal and physical characteristics of the substance, are presented. It is shown that when applying the finite elements method, it is a system of nonlinear differential equations of the 1st order. Consideration of these features in the mathematical model allows obtaining the temperature values of liquid and solid phases at any time when changing the bubble's size and the heat flow direction at its boundary.

Based on the suggested mathematical model, a series of assessment calculations was performed. Applying mathematical modeling, the temperature fields' distribution in the liquid under the conditions of the phase transition processes and changes in the bubble size is obtained. The performed studies show that for an immobile bubble under the boundary condition of the 2nd kind, the icing and ice melting velocities are almost equal, but the temperature on the interphase gas-water surface is approximately four times exceeding the temperature on the gas-ice surface, which corresponds to the water and ice thermal conductivity ratio. The temperature in the phase liquid-ice transition zone is practically constant. With the expansion of the bubble, liquid freezing and ice melting are going more than 1.6 times faster than in the immobile bubble. The analysis of the results obtained has shown that they are predictable and fully correspond to the physicists' ideas of the heat transfer and phase transition processes flow in the liquid.

The suggested calculation method can be used to determine the thermal characteristics of the liquid and steam in various technological processes associated with gases dissolution in the liquid, foam hardening and gas hydrates formation. The mathematical model designed can be applied as a component for calculation of more complicated physical processes. The study results can be applied to optimize various technological processes associated with materials swelling, gases adsorption, liquids boiling and gas hydrates formation.

Keywords: thermal and physical characteristics of liquid, gas-to-steam bubble, heat transfer in two-phase medium, phase transformations.

References

- [1] Pavlenko, A. M. Regularities of boiling-up of emulsified liquids / A. M. Pavlenko, B. I. Basok // Heat Transfer Research, – 2005. 36 (5), – pp. 419.
- [2] Yakushev, V. S. Sovremennoe sostoyanie gazogidratnykh tekhnologiy / V. S. Yakushev, V. G. Kvon, Yu. A. Gerasimov, V. A. Istomin. – Moscow: OOO «IRTS Gazprom», – 2008. – 88 p.
- [3] Takeya, S. Self-preservation effect and dissociation rates of CH₄ hydrate / S. Takeya, T. Ebinuma, T. Uchida et al. // J. Crystal Growth. – 2002. – V.237-239. – P. 379–382.
- [4] Stem, L.A. Temperature, pressure and composition effects on anomalous or "self preservation of gas hydrates / L.A. Stem, S. Circone, S.H. Kirby, W.B. Durham // Can. J. Phys. – 2003. – V.81. – P. 271–283.
- [5] Behkish, A. Novel correlations for gas holdup in large-scale slurry bubble column reactors operating under elevated pressures and temperatures / A. Behkish, R. Lemoine, R. Oukaci, B. I. Morsi // Chemical Engineering Journal. – 2006. Vol. 115, – P. 157–171.
- [6] Shahrzad Hashemi Dynamic Simulation of Gas Hydrate Formation in an Agitated Three-Phase Slurry Reactor / Hashemi Shahrzad, Macchi Arturo, Servio Phillip // The 12th International Conference on Fluidization - New Horizons in Fluidization Engineering. – 2007. Art. 39. – P. 329–336.
- [7] Shagapov, V. Sh. K teoryi rosta parovykh puzyr'kov v metastabil'noy zhidkosti / V. Sh. Shagapov, V. V. Koledin // Teplofizika vysokih temperatur. – 2013. – Vol. 51, Issue 4. – P. 543–551. doi: 10.7868/s0040364413040212
- [8] Veretel'nik, T. I. Matematicheskoe modelirovanie kavitatsionnogo potoka zhidkosti v himiko-tekhnologicheskoy sisteme / T. I. Veretel'nik, Yu. N. Difuchin // Visnyk ChDTU. – 2008. – Issue 3. – P. 82–85.
- [9] Aktershev, S. P. Modelirovanie vskipaniya metastabil'noy zhidkosti pri nalichii frontov isparennya / S. P. Aktershev, V. V. Ovchinnikov // Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologi. – 2013. – Issue 1. – P. 77–82.
- [10] Nigmatulin, R. I. Dinamika i teplomassoobmen parogazovykh puzyr'kov s zhidkost'yu / R. I. Nigmatulin, N. S. Habeev // Nekotorye voprosy mekhaniki sploshnoy sredy. – Moscow: In-t mekhaniki MGU, – 1978. – P. 229–243.

[11] Kulinchenko, V. R. Peredumovy stvorennia matematychnoi modeli – osnovni polozhennia i rivniannia rukhu Releia / V. R. Kulinchenko, V. L. Zavialov, T. H. Mysiura // Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohyi. – 2007. – Issue 22. – P. 36–41.

[12] Dolinskiy, A. A. Teoreticheskoe obosnovanie printsipa diskretno-impul'snogo vvoda energii. Model' dinamiki odinochnogo parovogo puzyr'ka [Text] / A. A. Dolinskiy, G. K. Ivanitskiy // Prom. teplotekhnika. – 1995. – Vol. 17, Issue 5. – P. 3–28.

[13] Pavlenko, A.M., Basok, B.I. (2005). Kinetics of water evaporation from emulsions / A.M. Pavlenko, B.I. Basok // Heat Transfer Research. 36, (5), – P. 425–430.

[14] Butcher, J. C. Numerical Methods for Ordinary Differential Equations [Text] / J. C. Butcher – New York: John Wiley & Sons, – 2008. – pp. 482.

[15] Kushnir, S. V. Barbotazhni khimichni efekty: yikh vydy, mekhanizmy vynyknennia ta heokhimichni proiavy / S. V. Kushnir, M. V. Kost, R. P. Kozak // Naukovo-tekhnichni visti. – 2016. – Issue 3 (20). – P. 30–47.

[16] Ermolaeva, G. A. Tekhnologiya i oborudovanie proizvodstva piva i bezalkogol'nyh napitkov: ucheb. / G. A. Ermolaeva, P. A. Kolcheva. – Moscow: IRPO; Izd. tsentr «Akademiya», – 2000. – 416 p.

[17] Mosin, O. V. Fiziko-himicheskie osnovy opresneniya morskoy vody / O. V. Mosin // Soznanie i fizicheskaya real'nost'. – 2012. – Issue 1. – P. 19–30.

[18] Semenov, M. E. Sintez gidratov gazov v laboratornykh usloviyah: XVII mezhdunar. nauch.-prakt. konf / M. E. Semenov, E. Yu. Shits // Tekhnicheskije nauki – ot teoryi k praktike. – Novosibirsk: SibAK, – 2013. – P. 55–61.

[19] Okutani, K. Surfactant effects on hydrate formation in an unstirred gas/liquid system: An experimental study using methane and sodium alkyl sulfates / K. Okutani, Y. Kuwabara, Y. Mori // Chemical Engineering Science, – 2008. V.63. P. 183–194

[20] Mel'nikov, V. P. Relaksatsionnyy YAMR-analiz fazovyh prevrashcheniy vody v dispersnoy sisteme voda/gidrat freona -12/uglevodorod pri dissotsiatsyi gidrata / V. P. Mel'nikov, L. C. Podenko, A. N. Nesterov, A. M. Reshetnikov // DAN. – 2010. – Vol. 433, Issue 1. – P. 59–61.

Надійшла 06.02.2019

Received 03.02.2019

СИСТЕМНІ ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ENVIRONMENTAL AND ENERGY SYSTEM RESEARCH

УДК 504/510

І.О. Рабош, аспірант ORCID 0000-0001-6863-3945

О.В. Кофанова, д-р. пед. наук, канд. хім. наук, проф. ORCID 0000-0002-9851-6392

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

ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ДЛЯ ЗДОРОВ'Я НАСЕЛЕННЯ ВНАСЛІДОК ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ АВТОТРАНСПОРТОМ (НА ПРИКЛАДІ МІСТА КИЄВА)

Проведено аналіз впливу автотранспортного комплексу на здоров'я людей, що проживають на придорожніх територіях Шевченківського та Святошинського районів м. Києва. Актуальність роботи визначається збільшенням техногенного навантаження на навколишнє середовище внаслідок зростання потоків автотранспортних засобів на автомагістралях міста. На основі аналізу даних про середньорічні концентрації шкідливих речовин в атмосферному повітрі на досліджуваних територіях визначено потенційний ризик здоров'ю населення при хронічному впливі забруднення атмосфери. Також встановлено рівні забруднення атмосферного повітря від автотранспорту. Науковою новизною є теоретичне обґрунтування та практичне підтвердження інгредієнтного забруднення від автотранспорту з отриманням величини ризику, що наноситься здоров'ю населення на досліджуваних територіях. Аналіз даних може дати змогу оцінити кількість населення, що зазнає негативного впливу від забруднення повітря, з метою розробки рекомендацій щодо мінімізації ризиків для здоров'я людей.

Ключові слова: автотранспортний комплекс, екологічна безпека, шкідливі речовини, середньорічні концентрації, потенційний ризик, рівень забруднення.

Вступ. Об'єкти автотранспортного комплексу (АТК) до яких відносяться автотранспортні засоби (АТЗ), автомагістральні шляхи, автозаправні станції (АЗС), автомийні комплекси, станції технічного обслуговування (СТО), стоянки АТЗ тощо чинять значне екологічне навантаження на всі складові урбанізованих територій. Вони спричинюють забруднення атмосферного повітря викидами оксидів Карбону, оксидів Нітрогену, вуглеводнів, оксидів Сульфуру; ґрунтового покриву – важкими металами, солями слабких кислот, нафтопродуктами, поверхнево-активними речовинами (ПАР); забруднення водойм, особливо нафтопродуктами. При цьому перераховані впливи вкрай негативно відбиваються на життєдіяльності тваринного та рослинного світу, а також на житті та здоров'ї людини.

Постановка проблеми. Згідно статистичних даних, в Україні відбувається значне збільшення кількості АТЗ, особливо за рахунок приватних автомобілів, що призводить до збільшення кількості об'єктів для їх обслуговування, а разом з тим і до підвищення екологічного навантаження на міське середовище. Водночас домінуючий вклад в забруднення повітря вносять саме пересувні джерела, що є наслідком найбільшого негативного впливу на здоров'я населення. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) 20 % економічного збитку від захворювань, інвалідності та смертності обумовлені якістю довкілля [1]. Водночас вплив підвищеного рівня забруднення спричинює близько 7 % смертності населення урбанізованих територій [2]. Таким чином, важливими завданнями є визначення порогового рівня впливу антропогенно порушеного середовища на здоров'я людей на територіях з підвищеним техногенним навантаженням, що передбачає оцінку ризику.

Аналіз останніх досліджень. Великою мірою, на здоров'я населення впливає забруднення міського середовища, про що свідчать істотні відмінності в захворюваності населення в міській та сільській місцевостях. Відпрацьовані гази (ВГ) двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) АТЗ чинять найбільшу небезпеку для довкілля і, зокрема, атмосферного повітря. Серед трьох основних джерел викидів (ВГ, картерні гази, випаровування з системи живлення) ВГ складають 100 % CO, 55 % C_mH_n, 100 % NO_x викидів [3]. Крім цього, до складу викидів ВГ входять альдегіди, канцерогенні речовини, а саме бенз(а)пірен (C₂₀H₁₂), сполуки Сульфуру та тверді частинки (сажа). При поганому дорожньому покритті, на перехрестях, при роботі двигуна на холостому ходу, різкому гальмуванні чи збільшенні швидкості концентрація ШР в повітрі підвищується в 2,5–4 рази [4]. Влітку ШР накопичується в зелених зонах міста, особливо на закритих дворових територіях.

Більше 80 % населення, що проживає в містах підлягають впливу забруднення повітряного

середовища, рівень якого значно перевищує допустимі значення, що встановлені ВООЗ. До хвороб, викликаних забрудненням об'єктами АТК відносяться: хвороби серцево-судинної системи; хвороби органів дихання; хвороби органів травлення тощо [5]. Деякі зі шкідливих наслідків від токсичного впливу очевидні і виявляються відразу, в результаті чого легко встановити конкретні джерела. Інші наслідки проявляються через деякий час, що ускладнює визначення частки відповідальності об'єкта, що викликав це негативне явище [6]. У ряді ж випадків зв'язок погіршення здоров'я з впливом об'єктів АТК встановити дуже важко чи взагалі неможливо.

Згідно з прогнозами, в 2020 році 70% жителів європейських міст будуть проживати на територіях з перевищенням ГДК по пилю, 20% жителів – з перевищенням ГДК по діоксиду Нітрогену, 15% жителів – з перевищенням ГДК по бензолу [7]. У міру зростання кількості АТЗ серйозною проблемою в містах Європи стає фотохімічний смог, причиною якого є викиди сполук Нітрогену та Карбону в атмосферу. В останні роки спостерігається різке збільшення астми серед дітей через забруднення повітря в європейських містах. Встановлена кількісна залежність між рівнем канцерогенів в атмосфері і раком легенів у жителів європейських країн [8]. Роботи присвячені оцінюванню ризиків для здоров'я населення на певних територіях, обумовлених дією антропогенних чинників, проводяться як вітчизняними науковцями, так і науковцями з інших країн. Отже, оцінювання та прогнозування екологічних ризиків, які виникають внаслідок підвищеного навантаження з боку автотранспорту може бути основним механізмом прийняття науково обгрунтованих рішень зі зменшення та запобігання негативним наслідкам техногенних змін.

Метою роботи є визначення рівня ризику для населення м. Києва, що перебувають на досліджуваних територіях з визначеним рівнем забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту.

Викладення основного матеріалу. Для дослідження впливу автотранспорту на довкілля обрані території, де знаходяться 4 пости спостереження (ПС) Центральної геофізичної обсерваторії (ЦГО) м. Києва, що розташовані вздовж проспекту Перемоги за адресами: ПС № 2 – вул. Довженко, 8, ПС № 6 – площа Перемоги, ПС № 7 – Бессарабська площа (Шевченківський район) і № 11 – проспект Перемоги, 98/2 (Святошинський район). На рис. 1 наведено розташування ПС.

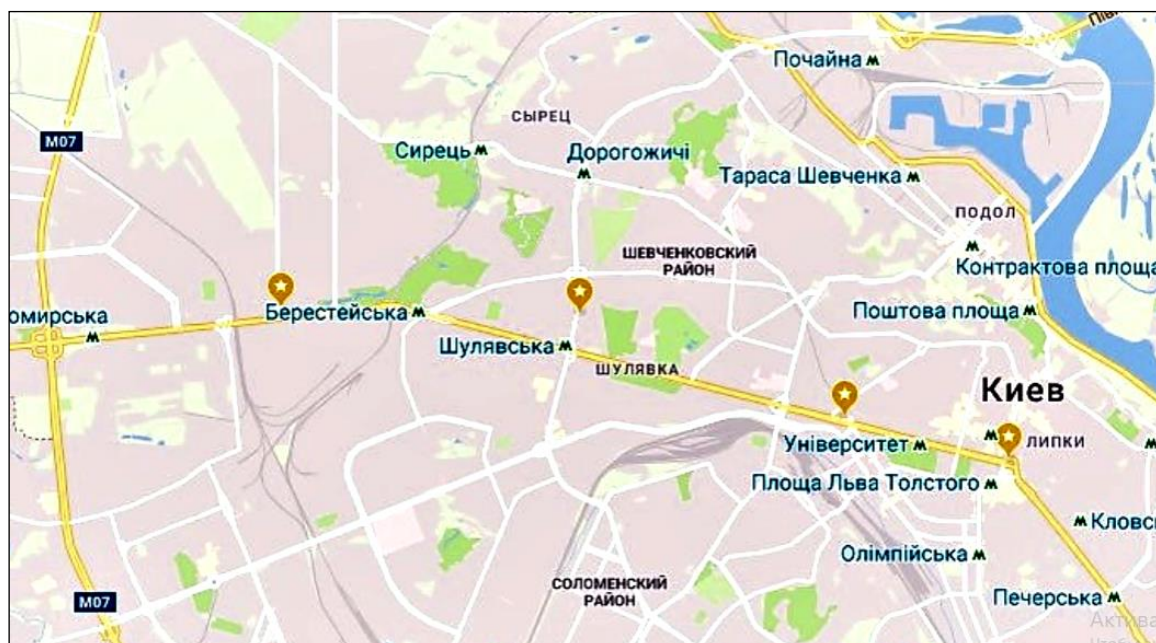


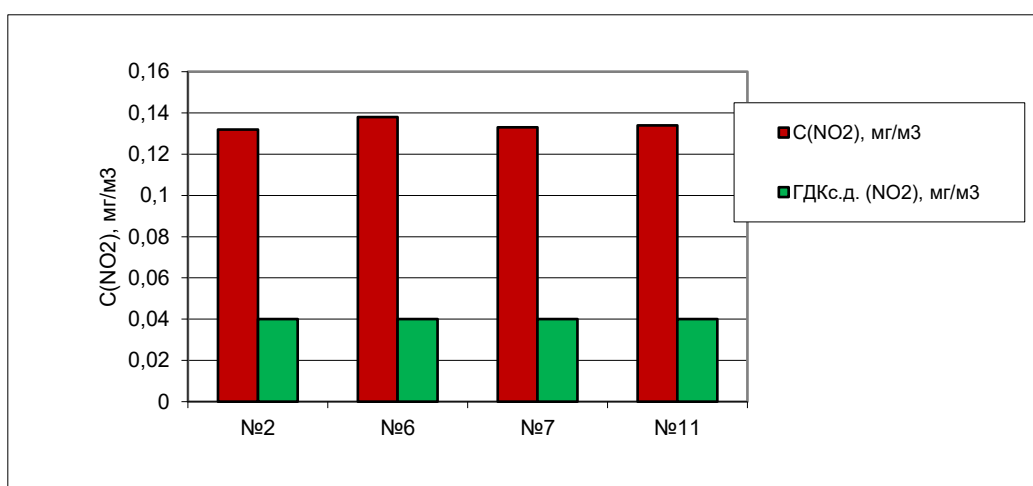
Рисунок 1 – Карта розташування обраних ПС ЦГО м. Києва

Дані пости розташовані поряд з автомагістраллю з інтенсивним рухом АТЗ. Кількість шкідливих викидів, що поступає в повітря при русі АТЗ залежить від кількісного та якісного складу автопарку, умов організації руху, дорожнього покриття тощо. При цьому поблизу потужної автомагістралі знаходяться житлові будинки, офісні споруди, школи, дитячі садки, торгові центри, зупинки транспорту тощо, що є причиною перебування населення в зонах значного забруднення автотранспортом. Вздовж автомагістралі розташована велика кількість об'єктів автотранспортної інфраструктури, де відбуваються часті зміни режимів руху АТЗ, що спричинює викиди найбільшої кількості ШР, особливо при гальмуванні. Надзвичайно шкідливий вплив чинять забруднюючі домішки в атмосферному повітрі на здоров'я дітей [9, 10].

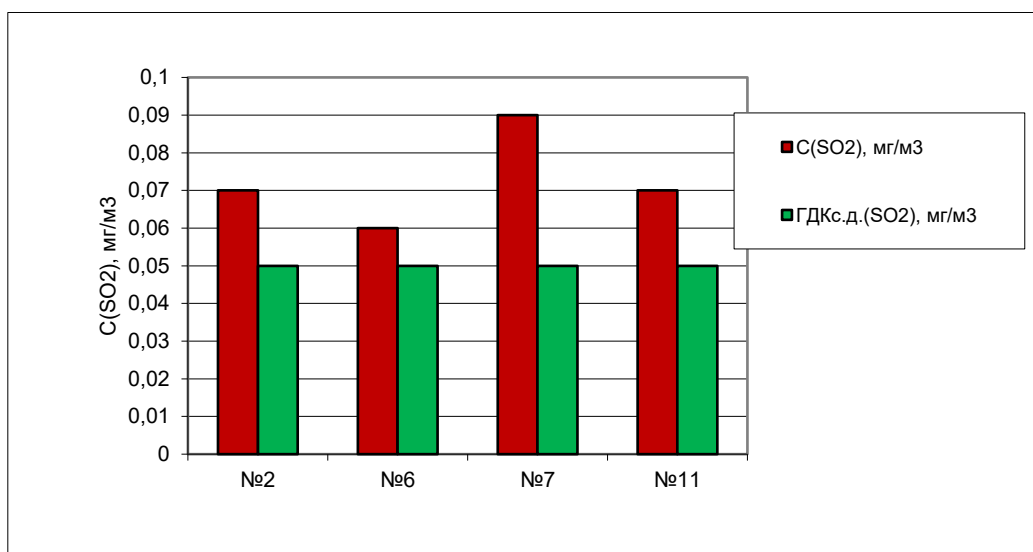
Згідно даних ЦГО пріоритетними ШП, що стабільно перевищують ГДК у атмосферному повітрі на даних ПС є: діоксиди Нітрогену (NO_2), діоксиди Сульфуру (SO_2) і формальдегід [11]. На рис.2 наведено рівні забруднення атмосферного повітря (середньорічні концентрації ШП) на 4 ПС за 2018 р.

Оксид Нітрогену NO потрапляє в атмосферне повітря безпосередньо з вихлопної труби і його утворення залежить від температури, чим вона вище тим більше утворення викидів NO [3]. Таким чином, концентрації NO в повітрі підвищуються під час заторів, тобто багаторазових гальмувань та розгонів АТЗ, коли температура двигуна збільшується. Оксид Нітрогену NO за 3–3,5 год при нормальних атмосферних умовах перетворюється в діоксид Нітрогену NO_2 [12]. Він набагато важчий за повітря, тому накопичується в канавах, заглиблених місцях, тунелях. Вміст діоксиду Нітрогену максимальний поблизу потужних автомагістралей та в центрі міст.

Отже, утворення оксидів Нітрогену (NO_x), зокрема NO та NO_2 , виникає внаслідок згоряння палива у циліндрах двигуна, концентрація цих речовин залежить від складу паливної суміші. Окиснення Нітрогену можна представити реакціями (1–3) [13]:



а)



б)

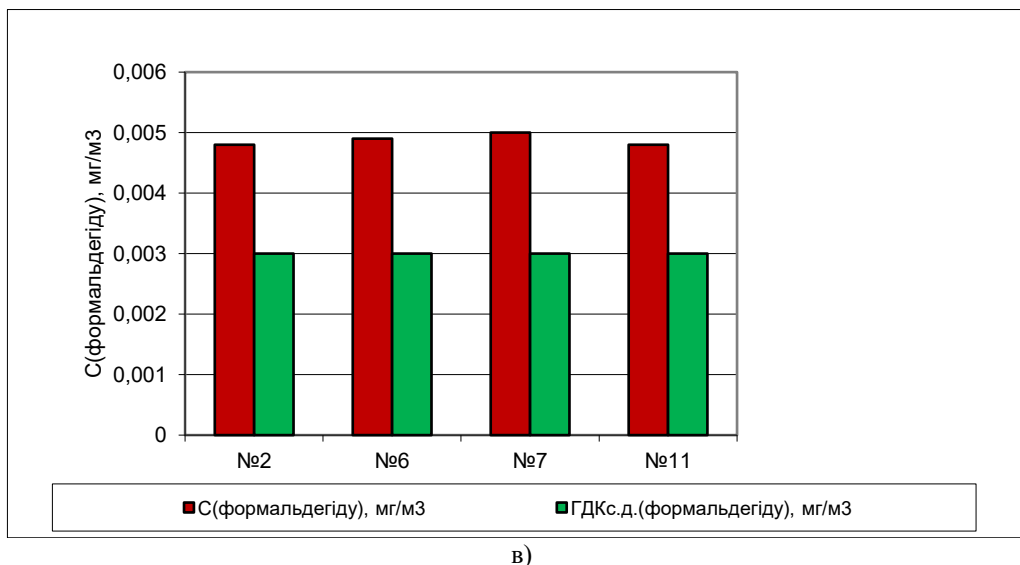
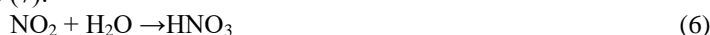


Рисунок 2 – Середньорічні концентрації ШП в атмосферному повітрі на ПС: а) рівень забруднення NO₂; б) рівень забруднення SO₂; в) рівень забруднення формальдегідом.

При цьому мають місце реакції (4, 5), котрі відбуваються не лише в камері згоряння, а також у випускній системі двигуна та в атмосфері:



Діоксид Нітрогену вступає в реакцію (6) з парою води, утворюючи азотну кислоту, яка є нестійкою і частково розпадається на NO і O за реакцією (7):



В атмосферному повітрі під впливом сонячного ультрафіолетового випромінювання сполуки Нітрогену утворюють фотохімічні тумани, а розчини NO₂ у воді є складовою «кислотних дощів».

Сульфур входить до складу вуглеводневих палив як шкідлива домішка [14]. В камері згоряння, з'єднуючись з киснем ця домішка утворює діоксид Сульфуру та інші сполуки за реакціями (8–10):



Потрапляючи разом з ВГ у атмосферу, діоксид Сульфуру вступає в реакцію з киснем повітря, утворюючи ангідрид Сульфуру або розчиняється у водяній парі, утворюючи сірчисту кислоту. Ангідрид Сульфуру, у свою чергу, сполучається з водяною парою, утворюючи таким чином сірчану кислоту за реакцією (11):



При потраплянні в атмосферне повітря відбуваються також реакції (12, 13):



Діоксид Сульфуру SO₂ вражає органи дихання, змінює склад крові, погіршує імунітет, порушує білковий обмін речовин в організмі. Крім цього руйнує вітамін B₁ у крові та збільшує накопичення цукру і білку. Високі концентрації SO₂ у повітрі викликають гострий бронхіт, задуху, можливу смерть внаслідок рефлекторного спазму горла [8]. Сполуки Сульфуру SO₂, SO₃, H₂SO₃, H₂SO₄ спричинюють закислення ґрунтів, пригнічують рослинний світ. Ці речовини є основними складовими смогу і кислотних дощів.

Формальдегід відноситься до недоокиснених вуглеводнів, що виникають у результаті взаємодії активних радикалів, які утворилися під час передполум'яних реакцій з молекулами кисню. В місцях з інтенсивним рухом АТЗ можна виявити формальдегіди з концентраціями від 2 до 10 мг/м³ [11]. Рівень забруднення повітря формальдегідом в районах, що знаходяться поблизу потужних автомагістралей, в 1,6 разів вище, ніж у житлових забудовах [3]. Формальдегід шкідливо впливає на органи дихання і слизові оболонки, уражає діяльність центральної нервової системи, печінки, нирок. Концентрації формальдегіду у повітрі приблизно 0,007 % спричинюють легке подразнення дихальних шляхів та слизових оболонок очей і носа, а за концентрації 0,18 % – подразнення дуже сильне [6].

Дія хімічних сполук зумовлює широкий спектр шкідливих ефектів, які залежать від шляху та тривалості надходження в організм, рівнів доз або концентрацій сполук. У методології оцінки ризику прийнято орієнтуватися на той шкідливий ефект, який виникає за впливу найменшої із ефективних доз (критичний ефект, критичні органи/системи) [15]. В табл. 1, 2 наведено референтні концентрації за хронічного інгаляційного впливу ШПР в атмосферному повітрі та основні показники здоров'я дорослого та дитячого населення м. Києва [16–18].

Таблиця 1 – Референтні концентрації за хронічного інгаляційного впливу найбільш поширених газоподібних сполук в атмосферному повітрі

Речовина	RfC, мг/м ³	Критичні органи/системи	Клас небезпеки
Оксид Нітрогену	0,08	Органи дихання	3
Діоксид Нітрогену	0,04	Органи дихання	3
Діоксид Сульфуру	0,05	Органи дихання	3
Оксид Карбону	3	Центральна нервова система, серцево-судинна, кров	4
Формальдегід	0,003	Органи дихання, імунна система	2

Примітка¹ RfC – референтні концентрації ШПР в атмосфері за хронічного інгаляційного впливу (джерело Всесвітня організація охорони здоров'я, CalEPA – каліфорнійське Агентство з охорони навколишнього середовища, IRIS – інтегрована інформаційна система про ризики (U.S.EPA).

Таблиця 2 – Основні показники здоров'я населення м. Києва за 2018 рік (вибрано дані по Києву та районах спостереження)

Райони	Загальна і первинна захворюваність					
	Всього населення м. Києва		Дорослого населення (18 років і старші)		Дітей та підлітків (0-17 років)	
	Зареєстровано хвороб	Вперше виявлені	Зареєстровано хвороб	Вперше виявлені	Зареєстровано хвороб	Вперше виявлені
Святошинський р-н	276441	71014	237583	45254	38858	25760
Шевченківський р-н	211383	74303	175479	50167	35904	24136
м.Київ	2431840	732270	2064930	480448	366910	251822

За таких умов оцінка потенційного ризику здоров'ю населення, котрі перебувають на територіях спостереження при хронічному впливі ШПР є вкрай важливою.

Ймовірність розвитку неспецифічних токсичних ефектів при хронічній інтоксикації в заданих умовах визначається за формулою (14) [19]:

$$Risk = 1 - \exp(\ln 0,84 \cdot (C / ГДК_{с.д.})^b / K_3) \quad (14)$$

де C – середньорічна концентрація ШПР в атмосферному повітрі, $ГДК_{с.д.}$ – середньодобова гранично допустима концентрація цієї речовини в повітрі, K_3 – коефіцієнт запасу, що визначається з таблиці 3, b – коефіцієнт, що дозволяє оцінювати ізоефекти домішок різних класів небезпеки відповідно таблиці 3.

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів K_3 і b для ШПР

Найменування ШПР	ГДКм.р., мг/м ³	ГДКс.д., мг/м ³	Клас небезпеки	Коефіцієнт запасу, K_3	Коефіцієнт b
NO ₂	0,2	0,04	3	4,5	1,0
SO ₂	0,5	0,05	3	4,5	1,0
Формальдегід	0,035	0,003	2	6,0	1,28

Під комбінованою дією оцінюється вплив декількох домішок, що надходять через один з компонентів навколишнього середовища. Потенційний ризик здоров'ю населення при комбінованому впливі забруднення навколишнього середовища оцінюється за правилом множення ймовірностей, де як множник виступають не величини ризику здоров'ю, а значення, що характеризують ймовірність його відсутності і розраховується за формулою (15) [19]:

$$Risk_{\text{сум}} = 1 - (1 - Risk_1) (1 - Risk_2) (1 - Risk_3) \dots (1 - Risk_n) \quad (15)$$

де $Risk_{\text{сум}}$ – потенційний ризик комбінованого чи комплексного впливу домішок, $Risk_1 \dots Risk_n$ – потенційний ризик впливу кожної окремої домішки.

Для трактування отриманих величин потенційного ризику здоров'ю населення використовують рангову шкалу, яка наведена в таблиці 4 [19].

Таблиця 4 – Залежність ваги ефектів від величини ризику здоров'ю населення

Вага ефектів	Risk
Рівні мінімального ризику	<0,1
Граничні хронічні ефекти	0,1-0,19
Важкі хронічні ефекти	0,2-0,59
Важкі гострі ефекти	0,6-0,89
Смертельні ефекти	0,9-1,0

В таблиці 5 наведено дані розрахунків ризику по кожній ШП і потенційний ризик здоров'ю населення при комбінованому впливі.

Таблиця 5 – Розрахунок ризиків для здоров'я населення

ПС	$Risk (NO_2)$	$Risk (SO_2)$	$Risk$ (Формальдегід)	$Risk$ сумарний	Вага ефектів
№2	0,120	0,053	0,051	0,209	Важкі хронічні ефекти
№6	0,126	0,046	0,053	0,210	
№7	0,125	0,067	0,055	0,229	
№11	0,121	0,053	0,051	0,210	

Таким чином, при постійному впливі атмосферного повітря, забрудненого даними ШП у 209 – 230 чоловік з 1000, що часто перебувають або постійно проживають на досліджуваній території протягом свого життя, можуть проявитися симптоми важкої хронічної інтоксикації. При цьому максимальні концентрації ШП від викидів ВГ автомобілів знаходяться на самій автомагістралі, а на придорожній смузі різко знижуються, досягаючи фонових рівнів на відстані 15 - 30 м від автошляхів.

Для визначення комплексного екологічного ризику від навантаження АТК необхідно також враховувати оцінку потенційного ризику здоров'ю населення при рекреативному використанні водних об'єктів, оцінку потенційного ризику токсикологічної небезпеки поверхневих вод та оцінку потенційного ризику здоров'ю населення в залежності від якості ґрунту та рівня шуму. При цьому важливим етапом є оцінювання вартості екологічного ризику як міри економічного збитку. А саме одним з прийнятних способів вимірювання витрат, пов'язаних зі збитком навколишньому середовищу є вартість компенсації або пом'якшення наслідків та вартість запобігання причині впливу. При цьому сума завданих збитків залежить від кількості мешканців, що підлягають ризику, рівня забруднення складової навколишнього середовища, наприклад атмосферного повітря, народногосподарського значення населеного пункту тощо.

Висновки

В результаті проведеного дослідження виявлено, що рівень забруднення атмосферного повітря поблизу автомагістралі, в найбільшій мірі, спричинений перевищенням ГДК діоксиду Нітрогену в 3,3 рази, діоксиду Сульфуру – в 1,4 рази, формальдегіду – в 1,6 разів. Сумарний ризик здоров'ю населення, внаслідок забруднення трьома шкідливими домішками становить більше 0,2, що означає проявлення в людей, що проживають на досліджуваних територіях важких хронічних ефектів протягом життя. Таким чином стан атмосферного повітря у Шевченківському та Святошинському районах м. Києва вважається небезпечним для здоров'я населення і потребує заходів щодо мінімізації екологічних ризиків. При цьому рівні ризиків для здоров'я населення на територіях житлових забудов, де утворюються масштабні стоянки приватних АТЗ є на порядок вищими.

Список використаної літератури

1. ВООЗ: Всесвітня статистика здоров'я [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.who.int/gho/publications/world_health_statistics/2018/en. – Назва з екрана.
2. Чепелевська Л. А. Тенденції медико-демографічних показників України у XXI столітті // Л. А. Чепелевська // Україна. Здоров'я нації. – 2018. №1. – С. 48–53.
3. Транспортна екологія: навчальний посібник / [О. І. Запорожець, С. В. Бойченко, О. Л. Матвеева, С. Й. Шаманський та ін.] – К.: «Центр учбової літератури», 2017. – 508 с.
4. Кофанов, А. Е. Геоэкологические аспекты моделирования локального загрязнения приземного атмосферного воздуха отработавшими газами автотранспортных средств / А. Е. Кофанов, Ю. Р. Холковский // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 4. – С. 20–33.

5. АОНС США. Здоров'я людини: оцінка впливу [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/human_health_exposure.htm. – Назва з екрана.
6. АОНС США. Регіональні рівні концентрації. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/rbconcentration_table/Generic_Tables/docs/params_shtable_run_JAN2018.pdf. – Назва з екрана.
7. United States Environmental Protection Agency: region 3 risk assessment: [Електронний ресурс]. – 2011. – Режим доступу : <http://www.epa.gov/> (Методичні аспекти оцінки ризику (US EPA Region 3 Risk Assessment). <http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/riskmenu.htm>). – Назва з екрана.
8. Мезенцева Н. І. Захворюваність і здоров'я населення в Україні: суспільно-географічний вимір: Монографія / Н. І. Мезенцева, С. П. Батиченко, К. В. Мезенцев. – К.: ДП «Прінт Сервіс», 2018. – 136 с.
9. Стан здоров'я дитячого населення – майбутнє країни (частина 1) / [Ю. Г. Антипків, О. П. Волосовець, В. Г. Майданник та ін.] // *Здоров'я ребенка*, 2018. – №1. – С. 11–21
10. Дудіна О. О. Медичні аспекти народжуваності (стан дітородної діяльності) / О. О. Дудіна, Ю. Ю. Габорець // *Україна. Здоров'я нації*. – 2017. №4/1. – С. 39–46
11. Щорічник стану забруднення атмосферного повітря на території України за даними державної системи спостережень гідрометслужби за 2018 рік. ЦГО. – К., 2018. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.cgo.kiev.ua/index.php?dv=vidximzab>. – Назва з екрана.
12. Кухтик Н. О. Прогрів каталітичного нейтралізатора після запуску холодного двигуна і його вплив на ефективність нейтралізації забруднюючих речовин / Н. О. Кухтик // *Вісник Національного транспортного університету. Серія : Технічні науки : наук.-тех. збірник*. – К.: НТУ, 2017. – Вип. 1 (37). – С. 195–202.
13. Канило, П. М. Автотранспорт. Топливо-екологічні проблеми і перспективи: монографія / П. М. Канило. – Х.: ХНАДУ. – 2013. – 272 с.
14. Трифонов Д. М. Поліпшення паливної економічності і екологічних показників автомобіля використанням теплових акумуляторів фазового переходу для прогріву двигуна: дис. к.т.н.: спец. 05.22.20 / Д. М. Трифонов. – Київ, 2018. – С. 236.
15. Нормативи порогових мас небезпечних речовин для ідентифікації об'єктів підвищеної небезпеки. Затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 11.07.2002 р. №956. ДНАОП 0.00-3.07-02. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.qdpro.com.ua/document/11441>. – Назва з екрана.
16. Перелік гранично допустимих концентрацій (ГДК) та орієнтовних безпечних рівнів дії (ОБРД) забруднюючих речовин в атмосферному повітрі населених місць [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.eco.ck.ua/docs/Perelik%20rechovyn,%20klas%20nebezpeky.doc. – Назва з екрана.
17. Державна служба статистики України [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua/> – Назва з екрана.
18. Методичні рекомендації МР 2.2.12-142-2007. Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря. Затв. Наказом МОЗ України від 13.04.07 № 184. – Київ, 2007. – 40 с.
19. Інструкція 2.1.6.11-9-29-2004 [Електронний ресурс] / Міністерства здравоохрания республіки Беларусь «Оценка риска для здоровья населения от воздействия химических веществ, загрязняющих атмосферный воздух» – Режим доступа : <http://med.by/methods/pdf/2.1.6.11-9-29-2004.pdf>.

I. Rabosh, Ph.D. student, ORCID 0000-0001-6863-3945

O. Kofanova, Dr. Sc., Cand. Sc. (Chem.), Prof. ORCID 0000-0002-9851-6392

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

ASSESSMENT OF THE RISKS FOR THE PUBLIC HEALTH ASSOCIATED WITH THE ENVIRONMENTAL POLLUTION CAUSED BY AUTOMOBILE TRANSPORT (ON THE KYIV CITY EXAMPLE)

An analysis of the impact of the motor transport complex on the health of the people living on the roadside areas of Shevchenkivskiy and Svyatoshinsky districts of Kyiv was carried out. The importance of the work is determined by an increase of the technogenic load on the environment in a result of the growth of streams of motor vehicles on the highways of the city. On the basis of the analysis of data about the average annual concentrations of harmful substances in the atmosphere on the studied areas, a potential risk for the public health in terms of the constant influence of atmospheric pollution was determined. Levels of the air pollution caused by motor vehicles also were determined. The scientific novelty is formed by the theoretical substantiation and practical confirmation of the ingredient pollution from motor vehicles, as well as by the determination of the levels of the risks that influence the public health on studied territories. Data analysis can help to assess the number of people influenced by the negative impacts caused by air pollution in order to develop recommendations for minimization of the risks.

Key words: motor transport complex, ecological safety, harmful substances, average annual concentrations, potential risk, pollution level.

References

- [1] VOOZ: Vsesvitnia statystyka zdorov'ia [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: http://www.who.int/gho/publications/world_health_statistics/2018/en. – Nazva z ekrana.
- [2] L. A. Chepelevska, Tendentsii medyko-demografichnykh pokaznykiv Ukrainy u XXI stolitti [Trends in the medical and demographic indicators of Ukraine in the XXI century], *Ukraina. Zdorov'ia natsii*. [Ukraine. The health of the nation.], no 1, pp. 48–53, 2018.
- [3] O. I. Zaporozhets, S. V. Boichenko, O. L. Matvieieva, S. Y. Shamanskyi and others, *Transportna ekolohii: navchalnyi posibnyk [Transport ecology]*. K.: «Tsentr uchbovoi literatury» [Center for Educational Literature], 2017, p. 508.
- [4] Kofanov, O., Kholkovskiy, Yu. Geoekologicheskie aspekty modelirovaniya lokal'nogo zagryazneniya prizemnogo atmosfernogo vozdukhа otrabotavshimi gazami avtotransportnykh sredstv [Geoecological aspects of modeling of local pollution of surface atmospheric air by exhaust gases of motor vehicles]. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie [Mining mechanical engineering and machine building]*, 2017, 4, 20–33.
- [5] AONS SShA. Zdorov'ia liudyny: otsinka vplyvu [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/human_health_exposure.htm. – Nazva z ekrana.
- [6] AONS SShA. Rehionalni rivni kontsentratsii. [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/rbconcentration_table/Generic_Tables/docs/params_sltable_run_JAN2018.pdf. – Nazva z ekrana. [7] United States Environmental Protection Agency: region 3 risk assessment: [Elektronnyi resurs]. – 2011. – Rezhim dostupu : <http://www.epa.gov/> (Методичні аспекти оцінки ризику (US EPA Region 3 Risk Assessment). <http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/riskmenu.htm>). – Назва з екрана.
- [8] N. I. Mezentseva, S. P. Batychenko, K. V. Mezentsev, *Zakhvoriuvanist i zdorov'ia naseleння v Ukraini: suspilno-heohrafichnyi vymy: Monohrafiia [The incidence and health of the population in Ukraine: socio-geographical dimension: Monograph]*, K.: DP «Print Servis», 2018, p. 136.
- [9] Yu. H. Antypkin, O. P. Volosovets, V. H. Maidannyk, Stan zdorov'ia dytiachoho naseleння – maibutnie krainy (chastyna 1) [Child health status - the country's future (part 1)], 2018, no 1, pp. 11–21.
- [10] O. O. Dudina, Yu. Yu. Haborets, *Medychni aspekty narodzhuvanosti (stan ditorodnoi diialnosti). Ukraina. Zdorov'ia natsii [Medical aspects of fertility (state of childbearing activity)]*, 2017, no 4/1, pp. 39–46.
- [11] Shchorichnyk stanu zabrudnennia atmosfernoho povitria na terytorii Ukrainy za danymy derzhavnoi systemy sposterezhen hidrometsluzhby za 2018 rik. TsHO. – K., 2018. – [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <http://www.cgo.kiev.ua/index.php?dv=vidximzab>. – Nazva z ekrana.
- [12] N. O. Kukhtyk, Prohriiv katalitychnoho neitralizatora pislia zapusku kholodnogo dvyhuna i yoho vplyv na efektyvnist neitralizatsii zabrudniuiuchykh rehovyn [Solarization of a catalytic converter after the start of a cold engine and its influence on the efficiency of neutralizing pollutant], *Visnyk Natsionalnogo transportnogo universytetu. Seriya : Tekhnichni nauky : nauk.-tekh. Zbirnyk [Bulletin of the National Transport University. Series: Technical Sciences]*, 2017, 1 (37), pp. 195–202.
- [13] P. M. Kanilo, Avtotransport. Toplyvno-ekolohycheskye problemy u perspektivy: monohrafiia [Motor transport. Fuel and environmental problems and prospects: Monograph]. Kh.: KhNADU, 2013, 272. (Rus).
- [14] D. M. Trifonov Polipshennia palyvnoi ekonomichnosti i ekolohichnykh pokaznykiv avtomobilia vykorystanniam teplovykh akumuliatoriv fazovoho perekhodu dlia prohriivu dvyhuna [Improvement of fuel economy and environmental performance of the car using heat exchangers of phase transition for engine warm-up], dys. k.t.n.: spets. 05.22.20, Kyiv, 2018, p. 236.
- [15] Normatyvy porohovykh mas nebezpechnykh rehovyn dlia identyfikatsii ob'ektiv pidvyshchenoi nebezpeky. Zatverdzheno postanovoioi Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 11.07.2002 r. №956. DNAOP 0.00-3.07-02. [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://www.qdpro.com.ua/document/11441>. – Nazva z ekrana.
- [16] Perelik hranychno dopustymykh kontsentratsii (HDK) ta oriientovnykh bezpechnykh rivniv diiannia (OBRD) zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosfernomu povitri naselenykh mists [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : www.eco.ck.ua/docs/Perelik%20rehovyn,%20klas%20nebezpeky.doc. – Nazva z ekrana.
- [17] Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [Elektronnyi resurs] : [Sait]. – Rezhym dostupu : <http://www.ukrstat.gov.ua/> – Nazva z ekrana.
- [18] Metodichni rekomendatsii MR 2.2.12-142-2007. Otsinka ryzyku dlia zdorov'ia naseleння vid zabrudnennia atmosfernoho povitria. Zatv. Nakazom MOZ Ukrainy vid 13.04.07 № 184. – Kyiv, 2007, 40.
- [19] Instruksiya 2.1.6.11–9–29–2004 [Elektronnyy resurs] / Ministerstva zdavoohraneniya respubliki Belarus' «Otsenka riska dlya zdorov'ya naseleння ot vozdeystviya khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh atmosfernyy vozdukh» – Rezhim dostupa : <http://med.by/methods/pdf/2.1.6.11-9-29-2004.pdf>.

И.А. Рабош, аспирант ORCID 0000-0001-6863-3945
Е.В. Кофанова, д-р. пед. наук, канд. хім. наук, проф. ORCID 0000-0002-9851-6392

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
**ОЦЕНКА РИСКОВ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫХ С ЗАГРЯЗНЕНИЕМ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ АВТОТРАНСПОРТОМ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА КИЕВА)**

Проведен анализ влияния автотранспортного комплекса на здоровье людей, проживающих на придорожных участках Шевченковского и Святошинского районов г. Киева. Актуальность работы определяется увеличением техногенной нагрузки на окружающую среду в результате роста потоков автотранспортных средств на автомагистралях города. На основе анализа данных о среднегодовых концентрациях вредных веществ в атмосферном воздухе на исследуемых территориях определен потенциальный риск здоровью населения при хроническом воздействии загрязнения атмосферы. Также определены уровни загрязнения воздуха автотранспортом. Научной новизной является теоретическое обоснование и практическое подтверждение ингредиентного загрязнения от автотранспорта с получением величины риска, наносимого здоровью населения на исследуемых территориях. Анализ данных может помочь оценить количество людей, на которых влияет негативное воздействие загрязнения воздуха, с целью разработки рекомендаций по минимизации рисков.

Ключевые слова: автотранспортный комплекс, экологическая безопасность, вредные вещества, среднегодовые концентрации, потенциальный риск, уровень загрязнения.

Надійшла 24.12.2018
Received 24.12.2018

О.О. Борисов, аспірант, ORCID 0000-0002-1053-2989

О.Є. Кофанов, канд. тех. наук, асистент, ORCID 0000-0003-2181-9288

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

ЕКОЛОГІЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ З БОКУ АВТОТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ НА ПРИДОРОЖНІ ТЕРИТОРІЇ РЕКРЕАЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У роботі досліджено вплив автотранспортних потоків на міські придорожні території рекреаційного призначення (на прикладі зон відпочинку м. Києва). Актуальність дослідження зумовлена тим, що значна частина міського населення України мешкає в умовах підвищених, високих або навіть дуже високих рівнів забруднення навколишнього середовища. Проблема посилюється тим, що останніми роками в країні все частіше експлуатуються уживані автотранспортні засоби з двигунами екологічних класів Євро 1...Євро 3. Емпірично встановлено, що на процеси розсіювання і концентрування забруднювачів на певних територіях впливають напрям і швидкість вітру, метеорологічні умови, фізико-хімічні властивості речовини-забруднювачів, процеси їх трансформації у доквіллі, а також умови седиментації та/або вторинного механічного перенесення. Для прогнозування екологічного стану досліджуваних територій у середовищі MathCad на основі розв'язку рівняння турбулентної дифузії побудовано просторові математичні моделі полів концентрацій шкідливих домішок, зокрема оксидів Нітрогену, Карбону та дрібнодисперсного пилу РМ за небезпечних напрямків та швидкості вітру. За результатами моделювання встановлено, що досліджувані території, що є зонами активного відпочинку людей, можуть бути потенційно небезпечними для здоров'я через шкідливий вплив викидів автотранспортних потоків розташованих поряд автомагістралей. За допомогою обчислювального експерименту спрогнозовано розвиток екологічної ситуації на цих територіях за певної транспортної ситуації та метеорологічних умов.

Ключові слова: автотранспортний потік, екологічна безпека, шкідливі речовини, викиди автотранспортних засобів, рекреаційні території, зони відпочинку, забруднення доквілля.

Вступ. Бурхливі урбанізаційні процеси та явища, що їх супроводжують (зростання частки міського населення, розростання території міст, розвиток транспортних зв'язків і потоків тощо), є найбільш характерними для сучасного суспільства. Як наслідок, у великих містах і передмістях спостерігається значне порушення стану навколишнього природного середовища (НПС) через створення нової екосистеми – урбоекосистеми, яка розвивається під впливом не стільки природних, скільки антропогенних чинників. У містах знижується інтенсивність сонячної радіації, формуються так звані "острови тепла", створюються умови для виникнення туманів, смогів тощо, підвищується кількість опадів (у тому числі й кислотних), збільшуються площі техногенно забруднених територій. Все це, а також багато інших негативних чинників міського середовища впливають на здоров'я і психічний стан населення. Отже, оцінювання та підтримання належного екологічного стану міських територій, особливо територій оздоровчого призначення, має велике значення.

Постановка проблеми. Спеціалісти виокремлюють три основні різновиди екологічної небезпеки, що зумовлені активною антропогенною діяльністю [1], а саме:

- соціально-екологічна небезпека, обумовлена погіршенням екологічного стану середовища проживання людини та загрозою її здоров'ю;
- біосферно-екологічна – спричинена загрозою порушення природної рівноваги на Землі;
- ресурсно-екологічна небезпека, зумовлена скороченням природно-ресурсного потенціалу, деградацією природних ресурсів, їх вичерпністю тощо.

З точки зору забезпечення сталого збалансованого розвитку урбанізованих територій та підвищення екологічної безпеки міського населення існує багато шляхів поліпшення екологічності автотранспортних засобів (АТЗ), що рухаються дорогами країни. Проте більшість з відомих способів надають можливість скоротити обсяги викидів шкідливих речовин (ШР) з відпрацьованими газами (ВГ) АТЗ, зменшити їх токсичність тощо, проте не вирішують головної проблеми – проблеми запобігання забрудненню НПС. За даними Міністерства інфраструктури України, на даний час автотранспортна система України налічує більше 9,2 млн. транспортних засобів, у тому числі 6,9 млн. легкових автомобілів, ~ 250 тис. автобусів, ~ 1,3 млн. вантажних автомобілів і понад 840 тис. одиниць мототранспорту. А враховуючи постійне

зростання кількості АТЗ в Україні та світі загалом, вирішення проблеми моніторингу й захисту довкілля від впливу автотранспортних потоків (АТП) є актуальним і своєчасним завданням, яке потребує ґрунтовного дослідження.

Метою роботи є оцінка екологічного тиску з боку автотранспортних потоків на придорожні міські території рекреаційного призначення (на прикладі зон відпочинку м. Києва).

Аналіз останніх досліджень. Вивчення стану здоров'я міського населення та його залежності від екологічних чинників надає важливу інформацію для вирішення завдань охорони НПС. Особливо важливою у цьому контексті є кількісна оцінка потенційного екологічного ризику здоров'ю населення, зумовленого впливом АТП на міських територіях оздоровчого призначення. Ю. П. Гічевим [2] було розроблено класифікацію екологічно значущих захворювань людей та виокремлено три основні групи патологічних процесів, які залежать від стану навколишнього середовища, а саме:

- індикаторна екологічна патологія, яка відображає високий ступінь залежності стану здоров'я населення від забруднення НПС. Це, наприклад, професійні хвороби, онкологічні захворювання, перинатальна смертність, вроджена патологія, генетичні вади, різноманітні алергічні реакції тощо;

- екологічно залежна патологія, що відображає середній ступінь залежності стану здоров'я населення від забруднення НПС. Сюди відносять такі індикатори, як смертність немовлят, смертність дітей раннього віку, загальну дитячу смертність, вторинні імунodefіцити, хронічний бронхіт і пневмонію у дітей, хронічні паренхіматозні враження печінки і жовчовивідних шляхів, загострення основних захворювань дихальної та серцево-судинної систем при погіршенні метеорологічних умов у містах;

- екологічно обумовлена патологія відображає помірну залежність стану здоров'я людей від стану НПС. Це, зокрема, статистичні дані щодо спонтанних викиднів, патологій вагітності, захворювань на хронічний бронхіт і пневмонію у дорослих, анемію у дітей, основні захворювання серцево-судинної системи тощо.

Таким чином, оцінка стану НПС та прогнозування наслідків техногенного навантаження з боку АТП на здоров'я людей, а також розробка превентивних заходів щодо забруднення міських територій рекреаційного призначення є актуальним завданням, яке потребує вивчення умов життя й відпочинку мешканців міст на придорожніх територіях.

Стан НПС оцінюють за вмістом в його основних компонентах (атмосфері, гідросфері, педосфері, біосфері в цілому) певних забруднювачів, а також за інтенсивністю негативних фізичних чинників – шуму, вібрації, радіоактивного випромінювання, електромагнітних полів тощо. Основними джерелами таких забруднень є не тільки стаціонарні, а й пересувні джерела – АТЗ. Географічне положення міста, його рельєф, тип та щільність забудови, наявність/відсутність водних об'єктів, площа зелених насаджень та їх видовий склад тощо також великою мірою впливають і на кліматичні умови, і на циркуляцію повітряних мас та, як наслідок, – на умови розсіювання чи локального концентрування забруднювачів на певній території.

Для визначення рівня забруднення атмосферного повітря ($P_{ЗАП}$) населених пунктів використовують такі показники (mg/m^3 або mcg/m^3), як середня концентрація певної домішки q_{cp} , її середнє квадратичне відхилення σ та максимальна разова концентрація домішки q_{max} . Порівняння масових концентрацій домішки з відповідними значеннями її гранично допустимих концентрацій (ГДК) надає інформацію про $P_{ЗАП}$ певної території. При цьому середні концентрації порівнюють з середньодобовими значеннями ГДК_{с.д.} домішки, а максимальні з разових – з ГДК_{м.р.} цієї домішки [3].

Якість повітря певної території (району, міста в цілому) оцінюють за інтегральним (комплексним) індексом забруднення атмосфери (ІЗА або КІЗА), який розраховують, як правило, за середньорічними (середньомісячними) концентраціями домішки за формулою (1) і який враховує ступінь шкідливого впливу певного комплексу забруднювачів, характерних саме для цієї території, на живі організми:

$$ІЗА = \sum [C(X_i) / ГДК_{с.д.}(X_i)] a_i, \text{ ум. од.}, \quad (1)$$

де $C(X_i)$ – середня масова концентрація i -го забруднювача в атмосферному повітрі, mg/m^3 ; $ГДК_{с.д.}(X_i)$ – середньодобова гранично допустима концентрація i -ого токсиканта, mg/m^3 ; X – токсикант; a_i – коефіцієнт, що враховує ступінь шкідливості токсиканту порівняно зі шкідливістю речовини 3-го класу небезпеки (зокрема SO_2).

Для речовин 1-го класу небезпеки коефіцієнт a_i встановлений 1,7; 2-го класу – 1,3; 3-го класу – 1,0, і для речовин 4-го класу небезпеки він дорівнює 0,9 [3]. Таким чином, показник ІЗА, розрахований за 5-ма характерними для даної території забруднювачами, може слугувати чутливим індикатором для встановлення зв'язку між $P_{ЗАП}$ і рівнем захворюваності населення на певні хвороби, що зумовлені станом НПС.

Викладення основного матеріалу. У дослідженні, відповідно до статистичних даних Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського (ЦГО, м. Київ), для розрахунку ІЗА обрано домішки CO , NO_2 , PM (дрібнодисперсні частинки сажі, пилу тощо), SO_2 та формальдегіду (ФА). При значенні ІЗА < 5 рівень забруднення атмосферного повітря вважали низьким, 5÷7 – підвищеним, 7÷14 – високим і вище 14 –

дуже високим [4]; для характеристики P_{3AP} окремими поліюантантами застосовували парціальні ІЗА(X_i). На рис. 1 показано значення ІЗА за 2011–2018 рр. Як можна побачити, P_{3AP} у м. Києві за останні роки є стабільно високим.

Ще одним показником якості повітря є стандартний індекс забруднення (СІ) – найбільша встановлена разова концентрація певного забруднювача, поділена на величину його ГДК [5]. Як правило, цей показник оцінюють за кількістю постів спостережень, де зафіксовано перевищення ГДК певної домішки. Тоді при $CI < 5$ маємо підвищений P_{3AP} ; при $5 \leq CI < 10$ – високий і при $CI \geq 10$ – дуже високий P_{3AP} . Найбільшу повторюваність перевищення ГДКм.р. (%) за даними спостережень на одному посту спостережень за однією домішкою або на всіх постах території за всіма токсикантами за певний період часу називають найбільшою повторюваністю перевищень ГДК (НПП). Якщо $НПП < 20\%$ – P_{3AP} вважають підвищеним; при $20\% \leq НПП < 50\%$ – високим і при $НПП \geq 50\%$ – дуже високим [6].

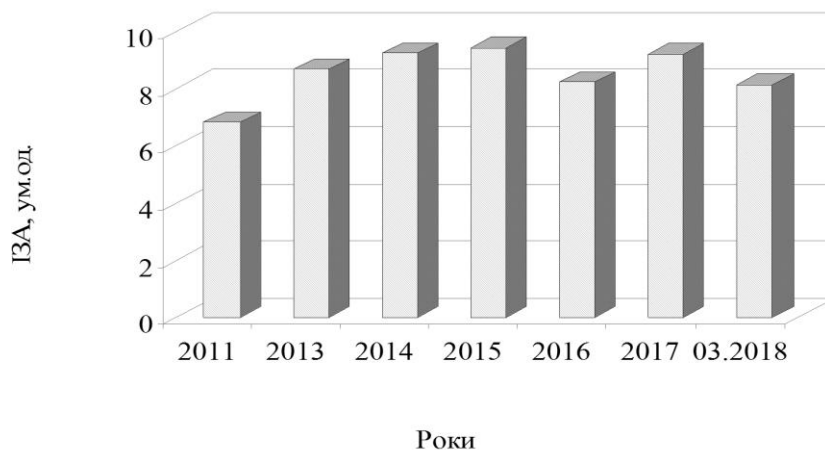


Рисунок 1 – ІЗА по м. Києву за багаторічними спостереженнями [узагальнено та побудовано авторами за даними ЦГО, м. Київ].

У природних водах міграція хімічних елементів (ХЕ) відбувається також досить інтенсивно. При цьому, як правило, спостерігається зміна якісного й кількісного складів природних вод (їх метаморфізація). Зокрема, у воді та донних відкладеннях, органах рослин і тварин накопичуються сполуки Хлору, Сульфору, Нітрогену, Карбону, Натрію, Кальцію, Магнію, важких металів (ВМ) тощо та чинять негативний вплив на здоров'я тварин і людей. Особливо небезпечним є забруднення територій оздоровчого призначення, де дорослі з дітьми проводять тривалий час, навіть не здогадуючись про потенційну небезпеку. Такі території, як правило, підлягають комплексному забрудненню – погіршується не тільки стан атмосферного повітря і водойм, а й ґрунтового покриву, рослинності, тваринного світу тощо.

Шкідливий вплив інгредієнтів ВГ АТЗ дуже різноманітний. Бенз(а)пірен, альдегіди, Сульфур(IV) оксид, оксиди Нітрогену й Карбону здатні спричинювати ускладненість дихання, астматичні ефекти, провокувати бронхіти й пневмонії (особливо у дітей), зростання кількості випадків захворюваності на рак тощо. З ВГ двигунів внутрішнього згоряння до атмосфери, ґрунтів і водойм потрапляють дрібнодисперсні частинки сажі, масел, продуктів зносу дорожнього покриття, двигунів та іншого обладнання.

Основна частина викидів оксидів Нітрогену NO_x припадає на Нітроген(II) оксид NO і Нітроген(IV) оксид NO_2 . В атмосфері NO під впливом окисників швидко (від 0,5 до 100 год. залежно від його концентрації у повітрі) перетворюється на NO_2 . Вміст інших оксидів Нітрогену (N_2O , N_2O_3 , N_2O_4 , N_2O_5) у ВГ невеликий. Оксиди NO_x беруть участь у фотохімічних перетвореннях під дією сонячного опромінення та спричинюють формування умов для виникнення фотохімічного смогу. Вони також шкодять бронхам, впливають на міокард і слизові оболонки носа, очей, шлунка, на стан центральної нервової системи людини, на фотосинтезний апарат рослин тощо. А наявність у ВГ незгорілих вуглеводнів значно посилює їх токсичність через синергетичну дію. При цьому одним із продуктів фотохімічних перетворень за участю NO_x та вуглеводнів є приземний озон, який, на відміну від тропосферного, шкідливо діє на НПС і здоров'я людей.

При взаємодії NO_x з водою чи водяною парою в повітрі утворюються дрібнодисперсні аерозолі нітритної HNO_2 і нітратної HNO_3 кислот. Аналогічні процеси відбуваються і при контакті Нітроген(IV) оксиду з вологими поверхнями дихальних шляхів людини і вищих тварин. Потрапляючи у кров, оксиди Нітрогену порушують транспортну функцію гемоглобіну, а під впливом ферментів мікрофлори шлунка й кишківника перетворюються на нітрити і нітрати.

Наслідки шкідливого впливу Карбон(II) оксиду CO на організм людини залежать від його концентрації у повітрі. Зокрема, при концентрації до 0,05 % через годину у людей з'являються ознаки отруєння, а при концентрації вище 1 % людина втрачає свідомість [7]. VM пригнічують ферментну активність, процеси дихання, фосфорилування й активного транспорту, спричиняючи функціональні та морфологічні зміни у мітохондріях, скорочення терміну "життя" еритроцитів, сповільнення синтезу гемоглобіну і порушення метаболізму. Крім того, вони мають кумулятивну дію через здатність до утворення досить міцних металоорганічних комплексів.

Альдегіди RC(O)H (зокрема, формальдегід HC(O)H і акролеїн C₂H₃C(O)H) є продуктами неповного окиснення вуглеводнів палива і утворюються, як правило, на ранніх стадіях його згоряння. Потрапляючи до організму людини інгаляційним шляхом, вони подразнюють слизові оболонки та впливають на роботу центральної нервової системи. ФА, крім того, спричинює пригнічення синтезу нуклеїнових кислот, сенсibiliзує шкіру людини та має мутагенні властивості, негативно впливає на репродуктивну функцію організму.

Сполуки Сульфуру (крім SO₂) є клітинними і ферментними отрутами, а тому в організмі людини і вищих тварин спричиняють порушення білкового та водного обміну, а за небезпечних концентрацій – важкі отруєння. При взаємодії з парами води SO₂ і SO₃ утворюють аерозолі, відповідно, сульфитної та сульфатної кислот і, як наслідок, відбувається порушення функціонування живих організмів, деградація екосистем. При цьому процес окиснення SO₂ до SO₃ відбувається в атмосферному повітрі досить швидко і великою мірою прискорюється у присутності оксидів Нітрогену.

Дрібнодисперсні частинки сажі, в основному, викидаються дизельними двигунами та є потужними забруднювачами атмосферного повітря, водойм, придорожніх ґрунтів та ґрунтових розчинів. Частинки розміром 0,4–5 мкм утворюються внаслідок піролізу вуглеводнів палива при значній нестачі кисню і мають дуже розвинуту, сорбційно активну поверхню. Шкідливі речовини, адсорбуючись на їх поверхні, через дихальні шляхи потрапляють до організмів людини і вищих тварин. PM також здатні розповсюджуватися на значні відстані від дороги, створюючи вторинні геохімічні аномалії.

Обсяги викидів ШП та їх хімічний склад (у тому числі й токсичність) великою мірою залежать від конструкції і марки АТЗ, його технічного стану, умов і термінів експлуатації, від виду і якості використовуваного палива, технології його виробництва, способів подачі паливно-повітряної суміші, її властивостей та режиму спалювання, погодних умов, режиму руху АТЗ, стану дорожнього покриття тощо. Навіть незначні порушення у роботі двигуна можуть у декілька разів збільшити обсяги викидів та спричинити зростання концентрації ШП у ВГ. Бензинові двигуни (зокрема карбюраторні) вважаються основними емітентами чадного газу CO, а емісія оксидів Нітрогену спричинена, в основному, роботою дизельних АТЗ. Погано відрегульований дизель навіть "димить" через надмірні викиди PM.

Існує декілька методів визначення обсягів викидів ШП з ВГ АТЗ, які в Україні регламентуються відповідними законодавчими актами і нормативними документами [8–11]. У країнах ЄС, як правило, використовують рекомендовані МАГАТЕ методи, засновані на емпіричній моделі Пасквілла-Гіффорда, а в основу галузевого стандарту України ГСТУ 218-02071168-096-2003 [10] та КД 52.9.4.01–09 покладено рівняння на основі теорії турбулентної дифузії [12].

У дослідженні при моделюванні складних багатопараметричних процесів, що відбуваються у повітряному просторі придорожніх територій рекреаційного призначення, за основу взято методика [9; 13], а також удосконалену й апробовану вітчизняними дослідниками методика [8; 11; 14], що базується на даних пробігових викидів ШП АТЗ на певній ділянці магістралі. Методика враховує залежність обсягу викидів ШП від виду палива і швидкості руху АТЗ, а також наявності та режиму роботи регульованих перехресть. Розрахунки за методикою проводять для таких забруднювальних домішок, як CO, NO_x, вуглеводні C_xH_y, PM, SO₂, ФА, бенз(а)пірен та сполуки Плюмбуму.

У роботах [15; 16] відзначається, що у приземному шарі повітря внаслідок топографічних особливостей місцевості виникають специфічні поля турбулентності, в результаті чого змінюються не тільки горизонтальні і вертикальні потоки повітря, а й розподіл температури та вологості. Ці фактори чинять визначальний вплив на атмосферну дифузію поллютантів, спричинюючи їх перемішування, трансформацію і локальне концентрування на певних ділянках території. Отже, поряд з напруженими магістралями через перемішування й взаємодію інгредієнтів ВГ між собою та зі складовими НПС формуються локальні поля забруднення з максимумами і мінімумами концентрацій певних поллютантів.

Географічне положення певної території міста (ділянки навколо автомагістралі), її орографія тощо обумовлюють специфічні кліматичні умови, які впливають на характер циркуляції повітряних мас. У нижньому шарі повітряного середовища швидкість вітру, як правило, є набагато меншою, ніж в його більш високих шарах, а, отже, у цьому шарі створюються несприятливі умови для надмірного (і навіть надзвичайного) накопичення забруднювачів, особливо тих, які мають більшу за повітря молярну масу (M_{пов.} = 29г/моль). Отже, у такому випадку у приземному шарі атмосферного повітря вітрові потоки відіграють визначальну роль у дисперсії забруднювачів, а наявність штилів зі швидкістю вітру $u \leq 6$ м/с

призводить до локального накопичення забруднювачів на певній території.

Приземний атмосферний шар характеризується певною стійкістю. У нестійкій атмосфері характерними є конвективні вертикальні потоки, які сприяють інтенсивному перемішуванню повітряних мас. Отже, параметри розсіювання ШР, а саме коефіцієнти їх дисперсії σ_x , σ_y та σ_z , безпосередньо пов'язані з показником стійкості атмосфери (його позначають А, В, С, D, Е, F, вважаючи, що від А до F стійкість атмосфери збільшується) [17]. Параметри розсіювання ШР у повітрі (їх дисперсії σ_y та σ_z) виражають за допомогою відповідних коефіцієнтів дифузії D_x і D_z :

$$\sigma_y^2 = 2D_y x; \quad \sigma_z^2 = 2D_z x. \quad (2)$$

σ_y та σ_z визначають також або за номограмами [17], або емпірично, за рівнянням (3):

$$\sigma_y = \alpha_y x / S_1(x); \quad \sigma_z = \alpha_z x / S_2(x), \quad (3)$$

де $S_1 = (1 + \beta_1 x)^{1/2}$; $S_2 = (1 + \beta_2 x)^{1/2}$; коефіцієнт $\beta_1 = 1 \cdot 10^{-4}$; інші параметри подано у таблиці.

Таблиця – Значення параметрів розсіювання шкідливих домішок у повітрі α_y ; α_z та β_2

Клас стійкості атмосфери	α_y	α_z	β_2
A	0,22	0,2	0
B	0,16	0,12	0
C	0,11	0,08	$1,5 \cdot 10^{-4}$
D	0,008	0,06	$2 \cdot 10^{-4}$
E	0,06	0,03	$3 \cdot 10^{-4}$
F	0,04	0,02	$3 \cdot 10^{-4}$

З метою моделювання полів розсіювання забруднювачів від АТП проводили просторово-часові натурні обстеження їх інтенсивності та складу на магістралях столиці, що прилягають до зон відпочинку людей. Дані щодо кількості АТЗ на певній ділянці магістралі та режиму їх руху реєстрували за допомогою відеозйомки. Спостереження проводили у різні пори року та у дні, коли не було сильних атмосферних опадів та за відсутності транспортних заторів. Відеозйомку проводили тричі по 20 хв. для кожного поста в обох напрямках руху АТП. Інтенсивність руху потоку $N_{\text{АТП}}$ визначали за кількістю АТЗ, що проходили через перетин дороги за 20 хв. Щільність АТП $\rho_{\text{АТП}}$ розраховували за кількістю АТЗ, що знаходились у визначений момент часу на досліджуваній ділянці дороги. За цим показником визначали також завантаженість магістралі. Склад АТП характеризували співвідношенням у ньому АТЗ певного типу – легкових автомобілів, мікроавтобусів, автобусів, вантажівок тощо; окремо встановлювали частку дизельного автотранспорту.

Для моделювання полів розсіювання й концентрування ШР у придорожньому просторі на територіях, що мають рекреаційне призначення, крім основних характеристик АТП, визначали також:

- географічне положення початку і кінця досліджуваної ділянки магістралі (встановлювали за допомогою програмного комплексу Google Maps та GPS);

- довжину ділянок L з фіксацією вулиць, що їх перетинають та/або обмежують;

- ширину проїжджої частини b та наявність поздовжнього нахилу;

- ширину тротуарів $b_{\text{тр}}$ (за наявності), наявність та ширину захисної "зеленої" полоси, її рослинність тощо;

- відстань до найближчої забудови, характер і щільність забудови;

- кількість смуг руху у кожному напрямку дороги;

- середню швидкість руху АТП $v_{\text{АТП}}$;

- синоптичні та метеорологічні умови;

- шорсткість підстилаючої поверхні, наявність поряд з дорогою водних об'єктів тощо.

Для побудови математичних моделей розсіювання й локального концентрування ШР у приземному шарі придорожнього простору на територіях рекреаційного призначення використовували метод М. С. Берлянда [18] в інтерпретації В. О. Холоднова з колегами [19]. Ідея методу полягає в тому, що у програмному комплексі MathCad реалізується модель факельного наближення, за допомогою якої розв'язується напівемпіричне рівняння турбулентної дифузії у декартових координатах для лінійного джерела як сукупності точкових джерел викидів на основі принципу суперпозиції полів концентрацій певної шкідливої домішки. Результат розрахунку приземних

концентрацій ШР подається у кратності перевищення її ГДК_{мр}, причому отримані поля дисперсії є функцією 3-х, а у випадку нестационарності процесу – 4-х параметрів (додається час). У такому разі математичну модель розсіювання ШР отримуємо у вигляді системи диференційних рівнянь у часткових похідних, розв'язок якої можливий тільки за певних граничних умов.

Рівень небезпеки забруднення повітря для здоров'я людей визначали за найбільшою концентрацією забруднювача, розрахованою за небезпечних метеорологічних умов – у найтепліший місяць року та при небезпечній швидкості вітру [20]. На рис. 2 показано приклад побудови полів дисперсії РМ, NO_x та СО за найбільш небезпечного напрямку вітру і швидкості вітру 5 м/с на території поряд з озерами № 14 та № 15 по вул. Миколи Ушакова – проспект Перемоги – Брест-Литовське шосе (м. Київ), яка є зоною активного відпочинку людей. Під час підрахунків вважали, що дисперсія частинок РМ з розміром ≤ 10 мкм підпорядковується закономірностям, характерним для дисперсії газів, а для більш крупних частинок ці закономірності суттєво змінюються [21].

Для отриманих моделей дисперсії ШР запропоновано таку градацію РЗ придорожного простору (не враховуючи синергетичні ефекти забруднення НПС кількома речовинами, а також геометричні особливості руху АТП ділянками магістралей міста):

- екологічно небезпечне середовище, якщо кратність перевищення ГДК домішки становить від 8,0 ГДК і вище,
- високий рівень забруднення, якщо це відношення 4,4...8,0,
- середній РЗ – кратність перевищення ГДК ШР 1...4,4 ГДК;
- екологічно безпечний рівень, якщо немає перевищення ГДК.

Висновки

1. Таким чином, за інтегральним показником ІЗА встановлено, що РЗ_{АП} м. Києва впродовж останніх років знаходиться на високому рівні. Київ майже кожного року входить до списку міст з серйозними екологічними проблемами, ризиками підвищення захворюваності населення тощо. Проблема посилюється і тим, що останніми роками в країні все частіше експлуатуються уживані АТЗ з двигунами екологічних класів Євро 1...Євро 3.

2. Процес дисперсії ШР визначається умовами їх емісії, особливостями горизонтального і вертикального переносу, в тому числі й турбулентного. Розсіювання ШР у повітрі відбувається, по-перше, через конвективне перенесення повітряних мас, зокрема, у напрямку середнього вітру; по-друге, через дифузійні процеси, пов'язані з градієнтом концентрації певного забруднювача і, по-третє, внаслідок турбулентної дифузії – перемішування повітряних мас у всіх напрямках. Таким чином, на процеси розсіювання й локального концентрування ШР у повітряному просторі та на певній території впливають напрям і швидкість вітру, метеорологічні умови, фізико-хімічні властивості певного забруднювача, можливості його трансформації у докільлі, умови седиментації та/або вторинного механічного перенесення.

3. Для встановлення закономірностей дисперсії ШР від АТП у міському придорожному просторі та прогнозування екологічного стану територій рекреаційного призначення у середовищі MathCad побудовано просторові математичні моделі полів концентрацій домішок – СО, NO_x та РМ. Враховуючи, що вітровий режим є одним з найвпливовіших чинників, який визначає розсіювання домішки у потоці повітря, отримано поля концентрацій (дисперсії) забруднювачів на придорожніх ділянках рекреаційного призначення за небезпечного напрямку середнього вітру та різних значень його швидкості (1–5 м/с).

4. За характеристиками АТП на магістралі, розташованій поблизу досліджуваної території рекреаційного призначення (на прикладі зон відпочинку м. Києва), встановлено території потенційно підвищеного екотоксикологічного ризику. Побудовано й візуалізовано математичні моделі розсіювання та локального концентрування забруднювачів – інгредієнтів викидів ШР АТЗ. За допомогою обчислювального експерименту встановлено найнебезпечніший для певної ділянки напрямок вітру та його швидкість, спрогнозовано розвиток екологічної ситуації на території за різних метеорологічних умов.

5. Методом моделювання встановлено, що на певних ділянках міської території, що є зоною відпочинку, унаслідок формування техногенних аномалій певних забруднювачів тривале знаходження людей є небезпечним для їх здоров'я, особливо в часи, коли відбувається інтенсивний рух АТЗ.

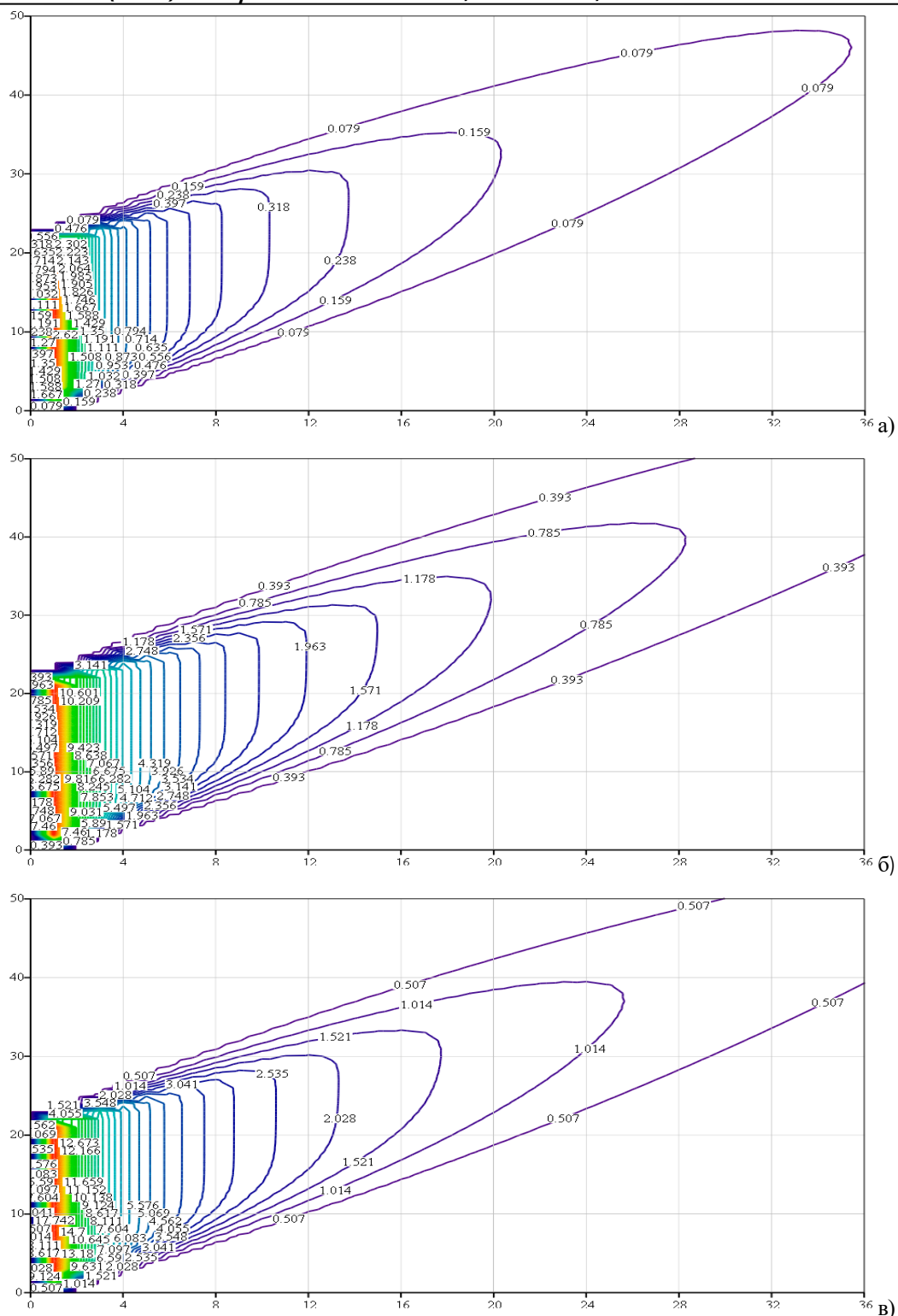


Рисунок 2 – Поля дисперсії ШР на досліджуваній території рекреаційного призначення (поряд з озером № 15, м. Київ) при найбільш небезпечному західному вітрі зі швидкістю 5 м/с: а) РМ; б) NO_x ; в) CO .

Список використаної літератури

1. Основные направления обеспечения национальной безопасности Республики Беларусь. Современное состояние и перспективы : монография / под науч. ред. Мясниковича М. В., Пузикова В. В. – Минск : Экономика и право – 2003. – 451 с.
2. Гичев Ю.П. Здоровье человека как индикатор экологического риска промышленных регионов // Вестн. Рос. АМН. – 1995. – № 8. – С. 52–54.

3. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. Про стан забруднення навколишнього природного середовища у м. Києві і Київській області у березні 2018 р. Атмосферне повітря [Електронний ресурс] : [Сайт]. – Режим доступу : http://cgo-sreznevskiy.kiev.ua/index.php?fn=k_zabrud&f=kyiv. – Дата доступу : 14.04.2018 р.
4. Елементи сучасної урбоекології : навч. посіб. [Електронний ресурс] / [О. Запорожець, Я. Мовчан, В. Гавриленко, Р. Гаврилук та ін.]. – К. : НАУ, 2015. – 265 с. – Режим доступу : <http://er.nau.edu.ua:8080/handle/NAU/27087>. – Назва з екрана.
5. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського [Електронний ресурс] : [Сайт]. – Режим доступу : <http://cgo-sreznevskiy.kiev.ua/>.
6. Берлянд М. Е. О методах определения фонового загрязнения атмосферы в городах / [М. Е. Берлянд, Э. Ю. Безуглая, Е. Л. Генихович и др.] // Труды ГГО им. А. И. Воейкова. – Л. : Гидрометеоздат, 1984. – Вып. 479. – С. 17–30.
7. Транспортна екологія. Методично-інформаційні матеріали до самостійного вивчення дисципліни та виконання індивідуальних завдань [для студ. напряму підготов. 6.070101 Транспортні технології (за видами транспорту)] / [А. В. Павличенко, С. М. Лисицька, О. О. Борисовська, О. В. Деменко]. – Дніпропетровськ : Нац. гірничий ун-т, 2012. – 39 с.
8. Матейчик В. П. Оцінка рівня забруднення атмосферного повітря транспортними потоками / Матейчик В. П., Никонович С. О., Сапожник Ю. В. // Вісник Нац. транспортного ун-ту. – 2013. – № 27. – С. 78–83.
9. Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів. Наказ Державного комітету статистики України № 452 від 13.11.2008 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://uazakon.com/documents/date_3a/pg_gmcswc/index.htm. – Назва з екрана.
10. ГСТУ 218-02071168-096-2003. Охорона навколишнього середовища. Автомобільні дороги загального користування. Оцінка та прогнозування екологічного стану доріг та виробничих баз. Видання офіційне. – Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор). – Київ, 2003. – 48 с.
11. Матейчик В. П. Розробка методики визначення витрат палива та масових викидів забруднюючих речовин транспортним потоком / Матейчик В. П., Никонович С. О. // Вісник Нац. транспортного ун-ту. – К : НТУ. – 2011. – № 24 (2). – С. 93–99.
12. КД 52.9.4.01-09 Охорона природи. Атмосфера. Методичні вказівки щодо прогнозування метеорологічних умов формування рівнів забруднення повітря в містах України. – Видання офіційне; Державна гідрометеорологічна служба. – К., 2010. – 78 с.
13. Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов [Електронний ресурс]. – СПб., 2010 – 15 с. // Фирма "Интеграл"; от 20.10.16. – Режим доступу: <http://forum.integral.ru/viewtopic.php?f=64&t=16815>. – Назва з екрана.
14. М 218-02070915-694:2011 Оцінювання інгредієнтного і параметричного забруднення придорожного середовища системою "транспортний потік–дорога" [Електронний ресурс] / [К. : НТУ, 2011; дата прийняття 01.01.2011 р.]. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=27916. – Назва з екрана.
15. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / [М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев]. – К. : Наукова думка, 1997. – 367 с.
16. Оленьков В. Д. Учет ветрового режима городской застройки при градостроительном планировании с использованием технологий компьютерного моделирования / В. Д. Оленьков // Вестник ЮУрГУ. Сер. "Строительство и архитектура". – 2017. – т. 17. – № 4. – С. 21–27. DOI: 10.14529/build170403.
17. Абрамовський Є. Р. Атмосфера великих міст / Є. Р. Абрамовський, В. І. Карплук, М. М. Переметчик. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2011. – 350 с.
18. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеоздат, 1975. – 448 с.
19. Системный анализ и принятие решений. Компьютерное моделирование и оптимизация объектов химической технологии в Mathcad и Excel : учеб. пособ. / В. А. Холоднов, В. П. Решетиловский, М. Ю. Лебедева, Е. С. Боровинская. – СПб :СПбГТИ (ТУ), 2007. – 425 с.
20. Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря : [метод. рекомендації] // МОЗ України; [затверджено за наказом МОЗ України від 13.04.2007 р. №184]. – Офіційне видання, 2007. – 28 с.– (Нормативний документ МОЗ України).
21. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей / Е. П. Медников. – М. : Наука. – 1980. – 176 с.

O. Borysov, Ph.D. student, ORCID 0000-0002-1053-2989

O. Kofanov, Cand. Sc. (Eng.), TF, ORCID 0000-0003-2181-9288

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

ECOLOGICAL LOAD ON THE ROADSIDE RECREATIONAL AREAS CAUSED BY TRAFFIC FLOWS

The paper investigates the influence of traffic flows on the urban roadside recreational areas (on the example of the Kyiv recreation areas). The relevance of the study is substantiated by the fact that a significant part of the urban population of Ukraine lives in the conditions of the high or even extremely high levels of environmental pollution. The problem is also amplified by the fact that in recent years the used motor vehicles with engines of environmental classes Euro 1...Euro 3 are increasingly being used in the country. It has been empirically determined that the direction and velocity of the wind, various meteorological conditions, physical and chemical properties of the pollutants, as well as the processes of their transformation in the environment and the conditions of sedimentation and/or secondary mechanical transfer influence the processes of dispersion and concentration of pollutants in certain areas. In order to predict the ecological state of the studied recreational areas, the spatial mathematical models of the concentration fields of harmful impurities (in particular Nitrogen and Carbon oxides, PM) for the hazardous directions and wind speeds were developed in the MathCad environment, based on the solution of the turbulent diffusion equation. According to the modelling results, it has been established that the studied recreational areas are potentially dangerous to the health of people due to the harmful effects of emissions from traffic flows located along the highways. With the help of the computational experiment, the ecological state on these territories was predicted in given meteorological conditions and transport situation.

Keywords: traffic flow, ecological safety, harmful substances, emissions from vehicles, recreational territories, environmental pollution.

References

- [1] Osnovnye napravleniya obespecheniya natsional'noy bezopasnosti Respubliki Belarus'. Sovremennoe sostoyaniye i perspektivy : monografiya / pod nauch. red. Myasnikovicha M. V., Puzikova V. V. – Minsk : Ekonomika i pravo – 2003. – 451 s.
- [2] Gichev Yu.P. Zdorov'e cheloveka kak indikator ekologicheskogo riska industrial'nykh regionov // Vestn. Ros. AMN. – 1995. – № 8. – S. 52–54.
- [3] Centraljna gheofizychna observatorija imeni Borysa Sreznevskogho. Pro stan zabrudnennja navkolysnjogho pryrodnogho seredovyshha u m. Kyjevi i Kyjivskij oblasti u berezni 2018 r. Atmosferne povitlja [Elektronnyj resurs] : [Sajt]. – Rezhym dostupu : http://cgo-sreznevskiy.kiev.ua/index.php?fn=k_zabrud&f=kyiv. – Data dostupu : 14.04.2018 r.
- [4] Elementy suchasnoji urboekologhiji : navch. posib. [Elektronnyj resurs] / [O. Zaporozhecj, Ja. Movchan, V. Ghavrylenko, R. Ghavryljuk ta in.]. – K. : NAU, 2015. – 265 s. – Rezhym dostupa : <http://er.nau.edu.ua:8080/handle/NAU/27087>. – Nazva z ekrana.
- [5] Centraljna gheofizychna observatorija imeni Borysa Sreznevskogho [Elektronnyj resurs] : [Sajt]. – Rezhym dostupu : <http://cgo-sreznevskiy.kiev.ua>.
- [6] Berlyand M. E. O metodakh opredeleniya fonovogo zagryazneniya atmosfery v gorodakh / [M. E. Berlyand, E. Yu. Bezuglaya, E. L. Genikhovich i dr.] // Trudy GGO im. A. I. Voeykova. – L. : Gidrometeoizdat, 1984. – Vyp. 479. – S. 17–30.
- [7] Transportna ekolohija. Metodychno-informacijni materialy do samostijnogho vyvchennja dyscypliny ta vykonannja indyvidualnykh zavdanj [dlja stud. naprijamu pidgotov. 6.070101 Transportni tekhnologhiji (za vydamy transportu)] / [A. V. Pavlychenko, S. M. Lysycjka, O. O. Borysovsjka, O. V. Demenko]. – Dnipropetrovsjk : Nac. ghirnychij un-t, 2012. – 39 s.
- [8] Matejchik V. P. Ocinka rivnja zabrudnennja atmosfernogho povitlja transportnymy potokamy / Matejchik V. P., Nykonovych S. O., Sapozhnyk Ju. V. // Visnyk Nac. transportnogho un-tu. – 2013. – # 27. – S. 78–83.
- [9] Metodyka rozrakhunku vykydiv zabrudnjujuchykh rehovyn ta parnykovykh ghaziv u povitlja vid transportnykh zasobiv. Nakaz Derzhavnogho komitetu statystyky Ukrajiny # 452 vid 13.11.2008 [Elektronnyj resurs]. – Rezhym dostupu : http://uazakon.com/documents/date_3a/pg_gmcywc/index.htm. – Nazva z ekrana.
- [10] GhSTU 218-02071168-096-2003. Okhorona navkolysnjogho seredovyshha. Avtomobiljni doroghy zaghajnogho korystuvannja. Ocinka ta prohnozuvannja ekologhichnogho stanu dorigh ta vyrobnychykh baz. Vydannja oficijne. – Derzhavna sluzhba avtomobilnykh dorigh Ukrajiny (Ukravtodor). – Kyjiv, 2003. – 48 s.
- [11] Matejchik V. P. Rozrobka metodyky vyznachennja vytrat palyva ta masovykh vykydiv zabrudnjujuchykh rehovyn transportnym potokom / Matejchik V. P., Nykonovych S. O. // Visnyk Nac. transportnogho un-tu. – K. : NTU. – 2011. – # 24 (2). – S. 93–99.
- [12] KD 52.9.4.01-09 Okhorona pryrody. Atmosfera. Metodychni vkazivky shhodo prohnozuvannja meteorologhichnykh umov formuvannja rivniv zabrudnennja povitlja v mistakh Ukrajiny. – Vydannja oficijne; Derzhavna ghidrometeorologhichna sluzhba. – K., 2010. – 78 s.

- [13] Metodika opredeleniya vybrosov avtotransporta dlya provedeniya svodnykh raschetov zagryazneniya atmosfery gorodov [Elektronnyy resurs]. – SPb., 2010 – 15 s. // Firma "Integral"; ot 20.10.16. – Rezhim dostupu: <http://forum.integral.ru/viewtopic.php?f=64&t=16815>. – Nazva z ekrana.
- [14] М 218-02070915-694:2011 Ocinjuvannja inghredijentnogho i parametrychnogho zabrudnennja prydorozhnjogho seredovyshha systemoju "transportnyj potik–dorogha" [Elektronnyj resurs] / [К. : NTU, 2011; data pryjnattja 01.01.2011 r.]. – Rezhym dostupu: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=27916. – Nazva z ekrana.
- [15] Chislennoe modelirovanie raspostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede / [M. Z. Zgurovskiy, V. V. Skopetskiy, V. K. Khrushch, N. N. Belyaev]. – K. : Naukova dumka, 1997. – 367 s.
- [16] Olen'kov V. D Uchet vetrovogo rezhima gorodskoy zastroyki pri gradostroitel'nom planirovanii s ispol'zovaniem tekhnologiy komp'yuternogo modelirovaniya / V. D. Olen'kov // Vestnik YuUrGU. Ser. "Stroitel'stvo i arkhitektura". – 2017. – t. 17. – № 4. – S. 21–27. DOI: 10.14529/build170403.
- [17] Abramovskiy Je. R. Atmosfera velykykh mist / Je. R. Abramovskiy, V. I. Karpljuk, M. M. Peremetchyk. – Dnipropetrovsk : Nauka i osvita, 2011. – 350 s.
- [18] Berlyand M. E. Sovremennyye problemy atmosfery diffuzii i zagryazneniya atmosfery / M. E. Berlyand. – L. : Gidrometeoizdat, 1975. – 448 s.
- [19] Sistemnyy analiz i prinyatie resheniy. Komp'yuternoe modelirovanie i optimizatsiya ob'ektov khimicheskoy tekhnologii v Mathcad i Excel : ucheb. posob. / V. A. Kholodnov, V. P. Reshetilovskiy, M. Yu. Lebedeva, E. S. Borovinskaya. – SPb :SPbGTI (TU), 2007. – 425 s.
- [20] Ocinka ryzyku dlja zdorov'ja naselennja vid zabrudnennja atmosfernogho povitrya : [metod. rekomendacii] // MOZ Ukrainy; [zatverdzheno za nakazom MOZ Ukrainy vid 13.04.2007 r. #184]. – Oficijne vydannja, 2007. – 28 s.– (Normativnyj dokument MOZ Ukrainy).
- [21] Mednikov E. P. Turbulentnyy perenos i osazhdenie aerozoley / E. P. Mednikov. – M. : Nauka. – 1980. – 176 s.

А.А. Борисов, аспірант ORCID 0000-0002-1053-2989

А.Е. Кофанов, канд. тех. наук, асистент ORCID 0000-0003-2181-9288

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА СО СТОРОНЫ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ПРИДОРΟЖНЫЕ ТЕРРИТОРИИ РЕКРЕАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В работе исследовано влияние автотранспортных потоков на городские придорожные рекреационные территории (на примере зон отдыха г. Киева). Актуальность исследования обусловлена тем, что значительная часть городского населения Украины живет в условиях повышенных, высоких или даже очень высоких уровней загрязнения окружающей среды. Проблема усугубляется и тем, что в последние годы в стране все чаще эксплуатируются подержанные автотранспортные средства с двигателями экологических классов Евро 1 ... Евро 3. Эмпирически установлено, что на процессы рассеивания и концентрирования загрязнителей на конкретных территориях влияют направление и скорость ветра, метеорологические условия, физико-химические свойства веществ-загрязнителей, процессы их трансформации в окружающей среде, а также условия седиментации и/или вторичного механического переноса. Для прогнозирования экологического состояния исследуемых рекреационных территорий в среде MathCad на основе решения уравнения турбулентной диффузии построены пространственные математические модели полей концентраций вредных примесей, в том числе оксидов азота, углерода и мелкодисперсной пыли РМ с учетом опасных направлений и скоростей ветра. По результатам моделирования установлено, что исследуемые придорожные территории, являющиеся зонами отдыха людей, представляют потенциальную опасность для их здоровья из-за вредного воздействия компонентов выбросов автотранспортных потоков расположенных рядом автомагистралей. С помощью вычислительного эксперимента спрогнозировано развитие экологической ситуации на данных территориях при определенной транспортной ситуации и метеорологических условиях.

Ключевые слова: автотранспортный поток, экологическая безопасность, вредные вещества, выбросы автотранспортных средств, рекреационные территории, загрязнение окружающей среды.

Надійшла 18.02.2019

Received 18.02.2019

ОЦІНКА РАДІАЦІЙНИХ НАСЛІДКІВ ПРИ ВАЖКИХ АВАРІЯХ НА АТОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЯХ

Основною задачею радіаційного моніторингу АЕС є забезпечення радіаційної безпеки населення і, перш за все, в аварійних умовах. Розгляд запроектованих аварій (ЗПА) на атомних електростанціях є найважливішим елементом принципу глибокоешелюваного захисту, який застосовується при забезпеченні радіаційної безпеки. В роботі виконано аналіз вимог законодавчих і нормативних документів України щодо призначення зони спостереження (ЗС) атомних електричних станцій і розглянуто пропозиції стосовно гармонізації ЗС з зонами аварійного планування, які мають бути встановлені згідно з рекомендаціями МАГАТЕ. Виконано консервативну оцінку доз внутрішнього та зовнішнього опромінення для гіпотетичної ЗПА на АЕС за допомогою програмних продуктів HotSpot і ARGOS. Проведено оцінку можливості підвищити рівень захисту населення в умовах перебігу аварії.

Ключові слова: АЕС, запроектована аварія, захист населення, зона спостереження, прогнозування, радіаційна аварія.

Вступ

1977-й рік – рік народження української атомної енергетики. У промислову експлуатацію введено перший енергоблок Чорнобильської АЕС з реактором РВПК-1000. Зростаюча потреба в електроенергії, прагнення замінити теплові та гідроелектростанції на потужніші — атомні, сприяли їх швидкому будівництву [1]. На даний момент в світі експлуатується 450 енергоблоків, які мають встановлену електричну потужність 396,85 МВт [2], що складає близько 19 % встановленої електричної потужності в світі [3]. При цьому, ще 55 енергоблоків знаходяться на стадії будівництва.

Проте, разом з цим розвитком, використання ядерної енергетики створило серйозне питання щодо проблеми попередження можливих аварійних ситуацій на АЕС. Аварійні ситуації на АЕС, при яких відбувається пошкодження палива в активній зоні, згідно діючих нормативних документів, прийнято називати важкими аваріями [4]. Такі аварії можуть призводити до смертельних випадків, тяжких наслідків для здоров'я населення, психологічного впливу, а також можуть мати економічні і соціологічні наслідки для суспільства. До тяжких наслідків для здоров'я відносять тяжкі детерміновані і стохастичні ефекти, тобто радіоактивно-індуковані онкологічні захворювання. Ці наслідки можуть бути попереджені або пом'якшені шляхом невідкладного виконання дій по захисту населення і прийнятті інших мір реагування.

Викиди в атмосферу радіоактивних матеріалів, які виходять з пошкодженої реакторної установки, утворюють хмару радіоактивних матеріалів і шлейф, який залишається після проходження хмари. В особливо важких аварійних ситуаціях дія цієї хмари на протязі декількох годин може стати причиною великої шкоди для здоров'я, або навіть смерті людей, які знаходяться на відстані близько 2 – 5 км від АЕС [5], якщо захисні дії не будуть прийняті невідкладно. Ураження може відбуватися інгаляційним шляхом від радіоактивних речовин, які знаходяться в хмарі викиду, а також зовнішнім опроміненням від неї, або опроміненням від осаджених на землю радіонуклідів. Для того, аби міри по захисту від вказаних чинників були якомога ефективнішими, виконання захисних дій може бути потрібним ще до появи хмари викиду на певній ділянці, і тому, вони мають бути початі відразу ж після того, як умови на станції будуть визначені важкими (тобто відбуваються події, які призводять до фактичного аварійного викиду чи суттєвому ризику його виникнення, які потребують негайного виконання невідкладних захисних дій і інших мір реагування за межами майданчику АЕС) [5], не очікуючи результатів радіаційного моніторингу.

В межах 15 – 30 км, інгаляційне потрапляння радіонуклідів може призводити до зростання випадків онкологічних радіаційних захворювань, зокрема до раку щитовидної залози, спричиненого дією радіонуклідів йоду, який в значній мірі реалізується в ході аварії, і вносить один з найбільших вкладів в сумарну ефективну дозу при важких аваріях [6]. Аналогічним чином, для того, аби міри по захисту від можливих ракових захворювань були найбільш ефективними, захисні дії мають бути застосовані до появи хмари радіоактивного викиду і, відповідно до цього, не можуть бути реалізовані на основі екологічного моніторингу.

Мета та завдання

Зробити оцінку можливості використання зон аварійного планування, які рекомендовані МАГАТЕ, для Українських АЕС шляхом моделювання викиду в оточуюче середовище радіоактивних речовин з енергоблоку при ЗПА та проведення оцінки доз внутрішнього та зовнішнього опромінення населення залежно від відстані до майданчику АЕС.

Аналіз вимог щодо призначення зони спостереження АЕС

Забезпечення безпечної роботи АЕС України відбувається за рахунок послідовної реалізації п'яти рівнів стратегії глибокоєшелонованого захисту. Для захисту населення і персоналу АЕС під час виникнення ЗПА, застосовується четвертий рівень (управління ЗПА) та п'ятий рівень цієї стратегії (аварійна готовність та реагування). Реалізацію заходів, передбачених цими рівнями, забезпечує система аварійного реагування ДП «НАЕК «Енергоатом» на аварії та надзвичайні ситуації на АЕС. Система аварійного реагування (САР) – взаємопов'язаний комплекс технічних засобів і ресурсів, організаційних, технічних та радіаційно-гігієнічних заходів, здійснюваних ДП «НАЕК «Енергоатом» для запобігання або зниження радіаційного впливу на персонал, населення та навколишнє середовище в разі ядерної або радіаційної аварії на АЕС, а також з метою забезпечення цивільного захисту. Основними заходами САР щодо захисту населення передбачається, що захист населення необхідно проводити на територіях, які відносяться до ЗС.

Зона спостереження – територія, на якій можливий вплив радіоактивних скидів і викидів АЕС і на якій здійснюється радіаційний моніторинг вимірювання потужності поглинутої дози, визначення вмісту радіонуклідів у об'єктах навколишнього природного середовища, продуктах харчування тощо [4].

Для кожної АЕС, відповідно до вимог [4], повинні бути визначені розміри санітарно-захисної зони (СЗЗ) і ЗС. Встановлення цих зон повинно обмежити радіаційний вплив на населення при нормальній експлуатації АЕС, при порушеннях нормальної експлуатації, при проектних і запроектних аваріях. Причому, СЗЗ – територія навколо АЕС, в рамках якої заборонено проживання населення, встановлено обмеження на виробничу діяльність, яка не стосується до АЕС, а також здійснюється радіаційний контроль.

Тобто в умовах аварійної ситуації передбачається, що захист населення необхідно проводити в межах від СЗЗ до ЗС. Як відомо, розміри діючих СЗЗ АЕС України становлять 2,7 км для ХАЕС і 2,5 км – для інших АЕС. А розміри ЗС – 30 км.

Після аварії на АЕС «Фукусіма-1» було розроблено «Вимоги щодо визначення розмірів і меж зони спостереження атомної електричної станції» [7]. Цим документом встановлюється що розміри ЗС визначаються так, щоб при ЗПА, частота яких дорівнює або перевищує значення показників 10^{-5} рік⁻¹, дози опромінення населення на межі ЗС та за її межами не перевищували критеріїв введення невідкладних контрзаходів (нижніх меж виправданості) - евакуації і йодної профілактики, а саме:

- ефективна доза - 50 мЗв;
- доза на щитоподібну залозу:
 - у дітей - 50 мЗв;
 - у дорослих - 200 мЗв;
- доза на шкіру - 500 мЗв.

Проте аварія на АЕС «Фукусіма-1» ще раз довела світовій спільноті що аварії на АЕС, навіть з найменшою вірогідністю виникнення, все ж трапляються. І тоді встановлені цим документом рівні контрзаходів, які не мають виконуватися на межі ЗС, в разі важкої аварії, можуть бути перевищені і за межею цієї зони. Також варто відмітити що нині в Україні прийнято те, що таблетки калій йодиду (КІ), які мають першочергово використовуватись в разі важкої аварії (для проведення блокування щитовидної залози), наявні лише на території радіусом в 10 км від АЕС. Тож питання йодної профілактики на територіях розташованих далі залишається під питанням [8].

Згідно рекомендацій МАГАТЕ [5], в країнах які експлуатують АЕС, повинні бути встановлені так звані emergency planning zones – зони аварійного планування.

Аналогом СЗЗ за розміром, але не за функціональною наповненістю, є зона запобіжних заходів (precautionary action zone) - територія, в межах якої на підготовчому етапі проводиться всебічна підготовка щодо оповіщення населення і початку прийняття населенням термінових захисних дій та інших заходів реагування, протягом години після оголошення загальної аварійної ситуації начальником зміни АЕС. Мета полягає в тому, щоб ініціювати захисні дії та інші заходи реагування до початку викиду, при якому потрібне здійснення захисних дій за межами майданчика об'єкта для запобігання важких детермінованих ефектів. Як бачимо з визначення терміну, на цій території дозволено проживання населення, що є суттєвою різницею від СЗЗ. МАГАТЕ рекомендує встановлювати розміри цієї зони радіусом від 3 до 5 км, в залежності від умов (наприклад, метеорологічних), притаманних майданчику АЕС.

Аналогом ЗС є зона планування термінових захисних заходів (urgent protective action planning zone) – територія, в межах якої на підготовчому етапі проводиться всебічна підготовка щодо оповіщення населення і початку прийняття населенням термінових захисних дій та інших заходів реагування, протягом години після оголошення загальної аварійної ситуації начальником зміни АЕС. Мета полягає в тому, щоб ініціювати

захисні дії та інші заходи реагування до початку викиду, при якому потрібне здійснення захисних дій за межами майданчика об'єкта, або незабаром після нього але таким чином, щоб не затримувати виконання термінових захисних дій та інших заходів реагування в зоні запобіжних заходів. МАГАТЕ рекомендує встановлювати розміри цієї зони радіусом від 15 до 30 км, в залежності від умов притаманних майданчику АЕС.

В зв'язку з вище описаним, вважається необхідним проведення розрахунку доз опромінення населення при ЗПА з важким пошкодженням палива.

Розрахунок доз опромінення населення

Для проведення розрахунку доз опромінення населення було використано два розрахункових коди: ARGOS і HotSpot.

HotSpot Коди HotSpot Health Physics були створені для забезпечення персоналу аварійного реагування та спеціалістів по плануванню дій в умовах надзвичайних ситуацій швидкого, портативного набору програмних засобів для оцінки інцидентів, пов'язаних з втратою контролю над радіоактивними матеріалами, зокрема і для обрахунку доз опромінення при аваріях на АЕС. Програмне забезпечення також використовується і для аналізу безпеки об'єктів, що працюють з ядерним матеріалом. Ознайомитись з моделями атмосферної дисперсії які використовуються в HotSpot можна за допомогою матеріалів представлених на сайті розробників даного коду [9].

ARGOS Система підтримки прийняття рішень ARGOS розроблена для забезпечення покращення антикризового управління при інцидентах, пов'язаних з аваріями на АЕС, об'єктах хімічної промисловості, аварій при перевезенні небезпечних об'єктів, застосування біологічної зброї та ін. Використання ARGOS полегшує прийняття рішень і покращує розуміння ситуації і обмін інформацією. В програмі можна проводити розрахунки як за користувацькими моделями метеорологічних умов, так і використовуючи реальні прогнози погоди і реальних умов у місці проходження інциденту. Атмосферна дисперсія радіонуклідів в ARGOS представлена в вигляді трьох різних моделей: мезомасштабна модель для невеликих відстаней RIMPUFF; модель дисперсії в межах населених пунктів URD; моделі атмосферної дисперсії на великі відстані (DERMA (Данія), MLDP0 (Канада), SNAP (Норвегія) і MATCH (Швеція)). Детальнішу інформацію можна отримати на сайті розробника [10].

Використавши обрані розрахункові коди було проведено розрахунок гіпотетичної аварії на ХАЕС. Розглядався один з можливих сценаріїв запроектованої аварії на блоці ВВЕР-1000 [11] з гільйотинним розривом головного циркуляційного контуру з відмовою активних САОЗ з накладанням незалежної відмови системи локалізації (незакриття арматури вентиляційної системи). Цілісність захисної оболонки при цьому зберігалася. Величину викиду радіонуклідів в атмосферу з АЕС наведено у таблиці 1. Умови протікання аварії було навмисне погіршено, але варто відмітити, що викид при розрахованій аварії є меншим, ніж при аваріях що розглядаються у [5] (зокрема, величина викиду радіонукліду ^{131}I менша на два порядки).

Таблиця 1 – Активність викиду радіонуклідів в атмосферу з АЕС в обраному сценарії ЗПА

Радіонуклід	Активність викиду, Бк	Радіонуклід	Активність викиду, Бк
^{131}I	$4,396 \cdot 10^{15}$	^{90}Sr	$2,045 \cdot 10^{12}$
^{132}I	$3,805 \cdot 10^{15}$	^{95}Zr	$1,3 \cdot 10^{12}$
^{133}I	$1,0262 \cdot 10^{16}$	^{95}Nb	$4,44 \cdot 10^{12}$
^{135}I	$2,3435 \cdot 10^{15}$	^{103}Ru	$4,065 \cdot 10^{13}$
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	$9,6 \cdot 10^{15}$	^{106}Ru	$4,02 \cdot 10^{12}$
^{85}Kr	$5,85 \cdot 10^{14}$	^{134}Cs	$3,605 \cdot 10^{13}$
^{87}Kr	$1,47 \cdot 10^{16}$	^{137}Cs	$2,24 \cdot 10^{13}$
^{132}Te	$5,65 \cdot 10^{13}$	^{138}Cs	$5,8 \cdot 10^{14}$
^{133}Xe	$1,09 \cdot 10^{17}$	^{140}Ba	$4,37 \cdot 10^{13}$
^{135}Xe	$2,335 \cdot 10^{13}$	^{144}Ce	$3,06 \cdot 10^{13}$

Крім активності викинутих радіонуклідів, визначальну роль у формуванні полів радіоактивного забруднення повітря і підстилаючої поверхні грають метеорологічні умови, які були на майданчику в момент проходження аварії на АЕС. В ході аналізу умов клімату і мікроклімату характерного для майданчику ХАЕС, були визначені такі характерні погодні умови (період – липень, нічний час):

- інтенсивність приземної інверсії – 2,825 °C/100 м;
- напрямок вітру: західний;
- швидкість вітру: 1 м/с;
- висота шару перемішування: 600 м;
- категорія стійкості атмосфери: D;
- опади: відсутні;
- температура повітря на висоті 10 м: 9,6 °C.

Детальний опис того як проводиться розрахунок доз опромінення і атмосферного переносу і випадінь на поверхню ґрунту, згідно законодавства України, наведено у додатку 1 вимог [7].

Для даних метеоумов було оцінено величину ефективної дози опромінення на все тіло і величину дози опромінення щитовидної залози за допомогою програм HotSpot v3.0.2 і ARGOS v9.3 (розрахунок проведений з застосуванням мезомасштабної моделі атмосферної дисперсії радіонуклідів RIMPUFF). Відстань, на якій проводиться розрахунок – до 50 км від майданчика аварійної АЕС. На рисунку 1 – 2 показано величину ефективної дози опромінення на все тіло в залежності від відстані від АЕС. На рисунку 1 – дані з HotSpot приведені у вигляді графіку, а на рисунку 2 – дані з ARGOS представлені в тому вигляді, в якому їх надає програмний продукт. На рисунку 3 – 4 показано величину дози опромінення щитовидної залози в залежності від відстані від АЕС. На даних рисунках В1/В2/В3 – відстань 3/15/30 км від АЕС; Еф – ефективна доза опромінення на все тіло, мЗв; Ев – нижня межа виправданості введення невідкладного контрзаходу – евакуація, мЗв; Ещз/Дщз – доза опромінення на щитовидну залозу, мЗв; Дщз/Дщз - нижня межа виправданості проведення невідкладного контрзаходу – йодна профілактика у дітей/дорослих, мЗв.

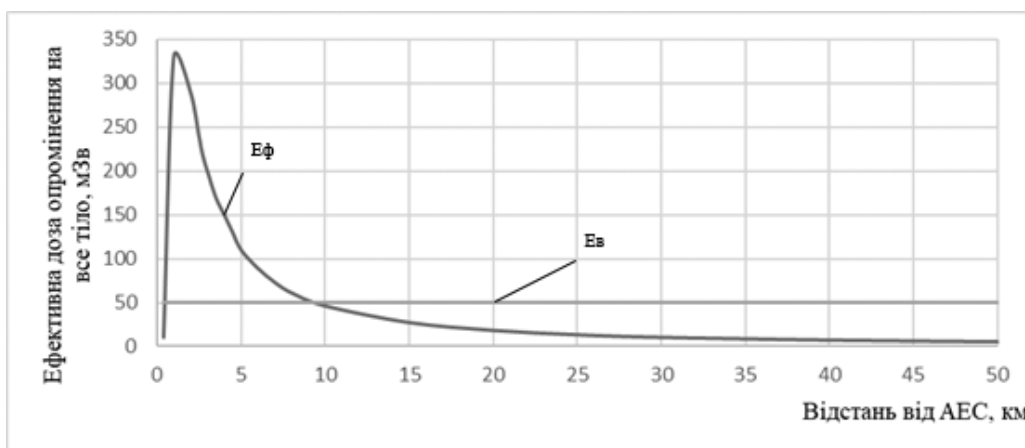


Рисунок 1 – Ефективна доза опромінення на все тіло для обраного сценарію ЗПА в залежності від відстані від майданчика АЕС (HotSpot)



Рисунок 2 – Ефективна доза опромінення на все тіло для обраного сценарію ЗПА в залежності від відстані від майданчика АЕС (ARGOS)

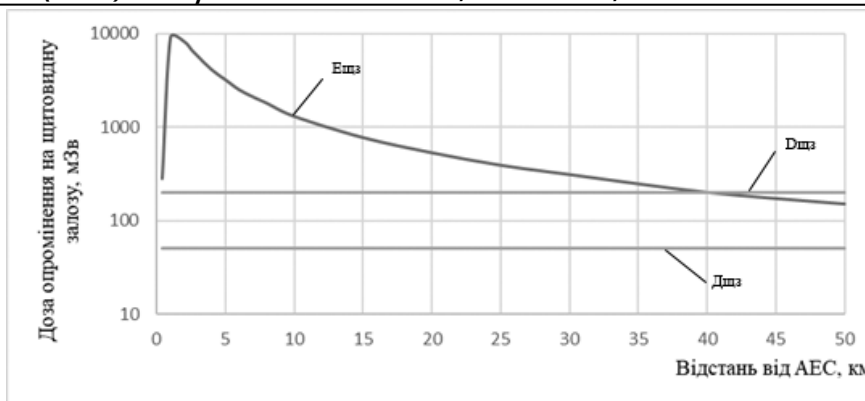


Рисунок 3 – Доза опромінення щитовидної залози для обраного сценарію ЗПА в залежності від відстані від майданчика АЕС (HotSpot)

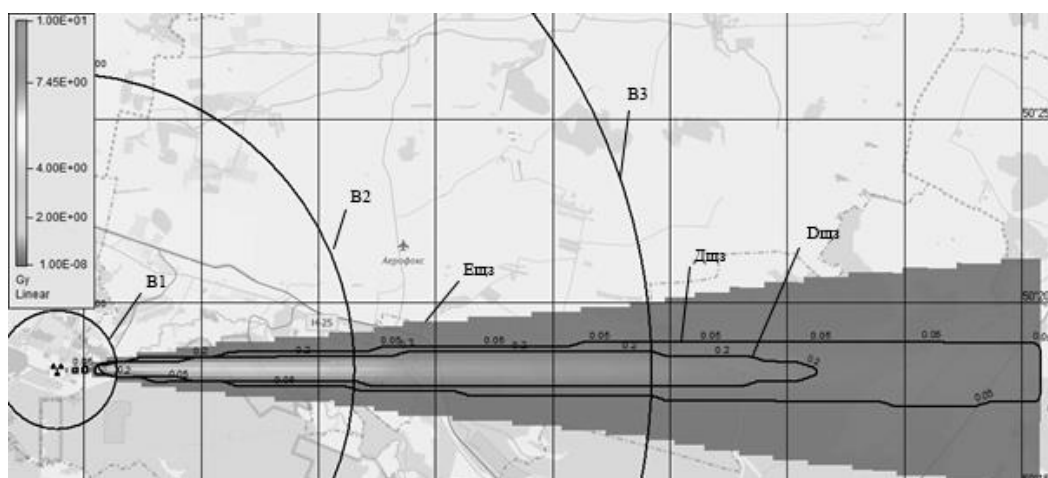


Рисунок 4 – Доза опромінення щитовидної залози для обраного сценарію ЗПА в залежності від відстані від майданчика АЕС (ARGOS)

Як показують розрахунки, ефективна доза опромінення на все тіло для обраного сценарію ЗПА і для обраних метеоумов вказують на те, що евакуація населення буде необхідна на відстані 10 км (при розрахунку HotSpot) і 16 км (при розрахунку за допомогою ARGOS). Виходячи з того, що модель атмосферної дисперсії RIMPUFF прийнята для виконання розрахунків на відстані кількох сотень кілометрів, можна вважати що зона, радіусом в 15 км (включаючи м. Славута) може бути прийнята як зона планування термінових захисних заходів згідно рекомендацій МАГАТЕ. Також можна зауважити, що ця зона є меншою, ніж ЗС, що дозволяє проводити дії в ній оперативніше, зокрема проводити ту ж евакуацію, бо територія, на якій вона має проводитися, буде значно менша. А згідно [5], її необхідно проводити по всім напрямкам від аварійної АЕС, бо вітер може змінювати свій напрямок, а викид може бути не миттєвим, а тривалим.

Порівнюючи результати доз опромінення щитовидної залози помітно, що розрахунки HotSpot і ARGOS показують приблизно однаковий результат. На відстані до 40 км необхідне проведення йодної профілактики для дорослого населення, а для дітей буде необхідне на відстані більше ніж розрахункові 50 км. Цю відстань нинішня ЗС не покриває, а як вже згадувалося раніше, таблетки КІ не розповсюджуються за межею відстані в 10 км від АЕС. В випадку проходження аварії подібного масштабу, або ж більшої, організувати йодну профілактику населення буде важко, якщо взагалі можливо. А з кожною годиною очікування початку йодної профілактики, її ефективність буде падати. Наведений приклад показує необхідність раннього введення йодної профілактики в випадку виникнення подібної ЗПА.

Тому, вважається доцільним запропонувати використовувати зону планування термінових захисних заходів радіусом в 15 км (і зосередити на ній увагу як на території, на якій необхідно першочергово проводити евакуацію), а таблетки КІ розповсюдити по території більшій ніж 40 км, можливо і по території всієї країни. І забезпечити можливість початку йодну профілактики населенням до приходу хмари викиду з АЕС.

Висновок

В ході аналізу вимог до ЗС АЕС, було встановлено, що покладені на неї функції можуть не бути в повній мірі виконаними в випадку проходження ЗПА з великим викидом радіонуклідів в навколишню

середовище. Було запропоновано використати зони аварійного планування, які згідно рекомендацій МАГАТЕ мають бути встановлені на АЕС.

Для розрахунку доз опромінення було використано програмні продукти HotSpot та ARGOS з мезомасштабною моделлю атмосферної дисперсії радіонуклідів RIMPUFF. Варто відміти що код HotSpot є більш простим в користуванні, а також є безкоштовним. Проте модель радіоактивного викиду в ньому задається одиничним набором радіонуклідів, які в один момент виходять з точки початку розрахунку. До того ж, метеоумови задаються сталими на весь період розрахунку, що не завжди відповідає реальним умовам. Модель RIMPUFF дозволяє задавати викид декількома інтервалами і з змінними погодними умовами (можливо використовувати як поточний прогноз погоди, так і попередньо задумані метеоумови). Результат, який представляє ARGOS є наочним і точнішим, проте і потребує значних обчислювальних потужностей, і ліцензованого програмного забезпечення.

Для обраної ЗПА було сформовано рекомендації щодо перегляду ЗС в напрямку її заміни на зону планування термінових захисних заходів (радіусом в 15 км замість 30 км) і створення додаткової зони, в якій необхідно зберігати, або попередньо розповсюдити препарати, за допомогою яких можливо буде провести йодну профілактику.

Список використаної літератури

1. Атомная энергетика по странам (загальнодоступна багатомовна інтернет-енциклопедія). [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://ru.wikipedia.org/wiki/Атомная_энергетика_по_странам.
2. The Database on Nuclear Power Reactors. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://pris.iaea.org/pris>.
3. Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050, 2018 Edition, Vienna: IAEA, 2018. – 150 p.
4. НП 306.2.141–2008. Загальні положення безпеки атомних станцій : Затвердж. наказом Держатомрегулювання 19.11.2007 № 162; зареєстр. в М-ві юстиції України 25.01.2008 за № 56/14747. — К. : Держ. ком. ядерного регулювання України, 2008. — 59с.
5. Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor. – Viena: International Atomic Energy Agency, 2013. – 159 p. – (IAEA Emergency Preparedness and Response (EPR) series, EPR-NPP-PPA (2013)).
6. Превентивная подготовка информационного обеспечения – основное концептуальное положение аварийного радиационного мониторинга территории влияния АЭС / Б.С. Пристер, Е.К. Гаргер, Н.Н. Талерко, В.Д. Виноградская // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2013. – Вып. 21. – С. 91 – 98.
7. НП 306.2.173–2011. Вимоги щодо визначення розмірів і меж зони спостереження атомної електричної станції : Затвердж. наказом Держатомрегулювання України та МОЗ України від 07.11.2011 № 153/766; зареєстр. в М-ві юстиції України 24.11.2011 за № 1343/20081 // Офіційний вісник України. —2011. — № 94. — Стор. 276. — Стаття 3444. — Код акту 59384/2011.
8. Актуальні проблеми йодної профілактики в Україні на випадок радіаційної аварії на АЕС. Аналітична записка. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.niss.gov.ua/articles/1379/>.
9. HotSpot. Health Physics Codes for the PC. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://narc.llnl.gov/hotspot>.
10. PDC-ARGOS. CBRN Crisis Management. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://pdc-argos.com>.
11. ТЭО. Том 13.3. Оценка воздействий на окружающую среду (ОВОС). Общая характеристика энергоблоков. 43-814.203.004.ЭО.13.03. КИЕП, 2011 г. – Ст. 128. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://www.archive.energoatom.kiev.ua/ru/file_viewer.html?id=1d2219827363abd14927be02f7860bbe.

УДК 621.039:504.064

В.А. Кондратюк, канд. техн. наук, ст. преп., ORCID 0000-0001-5035-311X

З.В. Иванов, магистрант, ORCID 0000-0002-5558-3392

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Основной задачей радиационного мониторинга АЭС является обеспечения радиационной безопасности населения, прежде всего в аварийных условиях. Рассмотрение запроектных аварий (ЗПА) на атомных электростанциях является важнейшим элементом принципа глубоководной защиты, применяемой при обеспечении радиационной безопасности. В работе выполнен анализ требований

законодательных и нормативных документов Украины относительно назначения зоны наблюдения (ЗН) атомных электрических станций и рассмотрены предложения по гармонизации ЗН с зонами аварийного планирования, которые должны быть установлены в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ. Выполнена консервативная оценка доз внутреннего и внешнего облучения для гипотетической ЗПА на АЭС с помощью программных продуктов HotSpot и ARGOS. Проведена оценка возможности использования зон аварийного планирования для Украинских АЭС, и установлено, что это позволит повысить уровень защиты населения в условиях протекания аварии.

Ключевые слова: АЭС, запроектная авария, защита населения, зона наблюдения, прогнозирование, радиационная авария.

V. Kondratyuk, Cand. Sc. (Eng.), Assis. Prof., **ORCID** 0000-0001-5035-311X

Z. Ivanov, Msc., **ORCID** 0000-0002-5558-3392

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

ASSESSMENT OF RADIATION CONSEQUENCES OF SEVERE ACCIDENT AT NUCLEAR POWER PLANT

The main task of the NPP radiation monitoring is to ensure the radiation safety of the population, especially in emergency conditions. Consideration of beyond design basis accidents at nuclear power plants is the most important element of the principle of defense in depth applied in ensuring radiation safety. The article analyzes the requirements of legislative and regulatory documents of Ukraine regarding purposes of observation areas of nuclear power plants and considers proposals for harmonization of observation areas with emergency planning zones, which should be used in accordance with the recommendations of the IAEA. The calculation of possible internal and external exposure for a hypothetical beyond design basis accidents at nuclear power plants was performed using HotSpot and ARGOS software products. An assessment of the possibility of using emergency planning zones for Ukrainian NPPs has been carried out, and it has been established that this will increase the level of protection of the population in emergency conditions.

Keywords: NPP, beyond design basis accident, protection of the population, observation area, forecasting, radiation accident.

References

1. "Nuclear power by country", available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power_by_country.
2. "The Database on Nuclear Power Reactors" available at: <https://pris.iaea.org/pris>.
3. International Atomic Energy Agency. Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050, 2018 Edition. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2018. 150 p.
4. NP 306.2.141- 2008, General Safety Provisions for Nuclear Power Plants [Obschie polozheniia bezopasnosti atomnykh stantsii], State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, Kyiv (2008), 58 p. (Rus)
5. International Atomic Energy Agency. Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor. (IAEA Emergency Preparedness and Response (EPR) series, EPR-NPP-PPA (2013)). Vienna: International Atomic Energy Agency; 2013. 159 p.
6. B. S. Prister, E. K. Garger, M. M. Talerko, V. D. Vinogradsk. [Preventive preparation of information maintenance - the main conceptual of emergency radiation monitoring of territories of NPP]. Problems of nuclear power plants' safety and of Chornobyl. 2013;(21):91-98.
7. NP 306.2.173-2011, Requirements for Determining the Sizes and Boundaries of Observation Areas of Nuclear Power Plants [Vymohy do vysnachennya rozmiriv and mezh zony sposterezhennya atomnoi elektrychnoi stantsii], Ofitsiyni Visnyk Ukrainy (2011), No. 94, 276 p. (Ukr)
8. "Actual problems of iodine prophylaxis in Ukraine in case of radiation accident at NPP. Analytical note", available at: <http://www.niss.gov.ua/articles/1379/>.
9. "HotSpot. Health Physics Codes for the PC", available at: <https://narac.llnl.gov/hotspot>.
10. "PDC-ARGOS. CBRN Crisis Management.", available at: <https://pdc-argos.com>.
11. "43-814.203.004.ЭО.13.03. Feasibility Study. Chapter 13.3. Environmental Impact Assessment (EIA). General characteristics of power units. КИЕВ. 2011. – 128 p." available at: http://www.archive.energoatom.kiev.ua/ru/file_viewer.html?id=1d2219827363abd14927be02f7860bbe.

Надійшла 17.01.2019

Received 17.01.2019

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 додатково надсилається стаття, збережена у форматі *.pdf !!!

Загальне оформлення:

1) **Мова.** Статті приймаються до друку трьома мовами: українською, російською, англійською.

2) **Параметри сторінки:**

- Поля: зліва, справа, зверху, знизу – 2,5 см.
- Вирівнювання основного тексту – за шириною.
- Перші рядки всіх абзаців – з відступом 1,0 см!!!
- Шрифт – Times New Roman, кегль 10, міжрядковий інтервал 1.
- Назва статті друкується великими (Caps Lock) напівжирними літерами (Ж) – кегль 14.
- Заголовки елементів основного тексту (Вступ, Мета та завдання тощо) виділяються напівжирним шрифтом (Ж).

3) **Структура статті:**

- **номер УДК** (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом кегль 10)
- **прізвища авторів** (приклад: **І.І. Петренко** (укр.), **И.И. Петренко** (рос.) **I. Petrenko** (англ)) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання); **індекс ORCID – обов'язково;**
- **(Порядок оформлення наукових ступенів та вчених звань описано нижче в цьому ж документі в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і наукових ступенів»).**
- **повна назва організації** (навчального закладу, установи) – **вирівнювання за правим краєм;**
- **реферат обсягом від 1000 до 1100 знаків** повинен відображати короткий зміст статті, не повторювати назву, не містити загальних фраз та бути структурованим (мета дослідження, методика реалізації, результати дослідження, висновки). В англійській версії статті наводяться реферат обсягом 1700-2000 знаків,
- **ключові слова:** (6–8 слів), словосполучення «Ключові слова» – напівжирним + курсив.

Відповідно до постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003р. до друку приймаються наукові статті, що мають такі елементи:

Основний текст статті

Вступ (постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується зазначена стаття);

Мета та завдання (формулювання цілей статті, постановка завдання);

Матеріал і результати досліджень (виклад основного матеріалу дослідження, з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, з можливим поділом на частини з відповідними назвами);

Рисунки (діаграми, фото тощо) подаються у **чорно-білому зображенні** разом із текстом, після посилань на них. **Вимога до графічних матеріалів:** будь-яка ілюстрація повинна бути єдиним нерозривним графічним об'єктом. Рекомендується застосування растрових форматів з роздільною здатністю **не менше 300 dpi**. Рисунок має бути розташований у **центрі, без обтікання текстом**. Підписи до рисунків повинні містити нумерацію в порядку розміщення в тексті та пояснювальний підпис. Неприпустимо включати підписи до самого рисунка. **Рисунок не повинен займати всю площу аркуша!!!**

Крапки після назви структурних частин статті не ставити.

Графіки повинні містити підписи **усіх осей на самому рисунку**. Будь-який інший вигляд підпису розглядатись та 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 використаних літератури наводиться в порядку посилань у тексті, відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках.

Список використаних літературних джерел подається **двічі:** мовою оригіналу відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр, рос) і англійською, відповідно до вимог IEEE style

У разі відсутності або низького рівня перекладу англомовної версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

Для надання відомостей про авторів англійською, або російською мовами, слід використовувати загальноприйнятту лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

Англомовна анотація за обсягом рекомендується більшою за українську (російську) 1700-к2000 знаків, оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

У разі відсутності або низького рівня перекладу англомовної анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:

(Анкети подаються **3 мовами (укр., англ. та рос.)**. Вказується повна назва організації або установки, вказати місце де працює автор. Якщо всі автори статті працюють або навчаються в одній установі, можна не вказувати місце роботи кожного автора окремо.)

Прізвище, ім'я, по-батькові автора (повністю, без скорочень)	
Вчений ступінь, вчене звання, посада	
Місце роботи кожного автора в називному відмінку (повна назва без скорочень)	
Поштова адреса місця роботи, з поштовим індексом	
Контактний телефон	
Електронна адреса	
ORCID	

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку статей.

Редакція журналу здійснює перевірку на плагіат за допомогою спеціального програмного забезпечення!!!

Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" та не пройшли перевірку на плагіат, будуть повернуті на доопрацювання.

Увага!!! На електронну адресу журналу надсилається:

- стаття версія в форматі *.doc або *.docx;
- стаття версія в форматі *.pdf (**ОБОВ'ЯЗКОВО**);
- анкета відомостей про авторів;
- акт експертизи про можливість оприлюднення матеріалів у засобах масової інформації.

Контакти:

- тел.: +38(044) 204-82-37;
- сайт: <http://energy.kpi.ua>;
- e-mail: kravkpi@ukr.net