

ISSN 1813-5420

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№ 2 – 2015

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія

Науковий журнал

№ 2 (40) - 2015

Виходить 4 рази на рік
Заснований у березні 2000 року

Засновник
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Міжфакультетський журнал

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Теплоенергетичний факультет

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Київ
НТУУ «КПІ»
2015

Головний редактор – Ю.І. Якименко

Заступники

головного редактора – С.П. Денисюк, В.А. Єрошенко, В.О. Туз

Відповідальний секретар – О.М. Закладний

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ: Б.І. Басок, В.І. Дешко, В.Я. Жуйков,
(Україна) Л.О. Кесова, С.О. Кудря, Є.М. Письменний,
К.К. Ткачук, Н.М. Фіалко, В.М. Чермалих,
В.Ф. Шинкаренко, А.А. Щерба, О.С. Яндульський

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ

РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ: Е. Хандшин (*Дортмундський технічний університет, інститут енергетичних систем та економіки енергетики, Німеччина*), Ричард Стржелецкі (*Інститут електротехніки, Варшава, Польща*), Ю.І. Блінов (*Санкт-Петербурзький державний електротехнічний університет, Росія*), П.Я. Екель (*Католицький університет, м. Белу Орізонті, Бразилія*), Димитрос Мавракіс (*Національний університет м. Афіни, Греція*), Рішон Домінік (*Національна вища гірничо-шахтарська школа Парижу, Франція*), А.В. Кузнецов (*Університет штату Північна Кароліна, США*)

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 № 4135 від 30.03.2000р.

Журнал внесено до Переліку фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук відповідно до Постанови Президії ВАК України від 1 липня 2010р. № 1-05/5. Журнал включено до наукометричної бази даних РІНЦ, бази даних «Наукова періодика України», Google Scholar. Підписано до друку за рекомендацією Вченої ради Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (протокол № 5 від 08 червня 2015 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Комп'ютерна верстка, адміністрування сайту О.О. Закладний.
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: krav@iee.kpi.ua

Видавець НТУУ «КПІ» 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**

©НТУУ «КПІ», 2015

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF UKRAINE
"KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE"

POWER ENGINEERING

economics, technique, ecology

ENERHETYKA:

ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya

The Scientific Journal

№ 2 (40) - 2015

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Founder

National Technical University of Ukraine
«Kyiv Polytechnic Institute»

Inter-faculty journal

Institute for Energy Saving and Energy Management

Heat-and-Power Engineering Department

Electrical Technology and Automation Department

Kyiv

NTUU «KPI»

2015

Editor-in-chief- Yu.I. Yakimenko
Deputy editors-in-chief- S.P. Denysiuk, V.A. Eroshenko, V.O. Tuz
Deputy O.M. Zakladnyi
EDITORIAL BOARD: B.I. Basok, V.I. Deshko, V.Ya. Zhuykov,
(Ukraine) L.O. Kesova, S.O. Kudrya, E.M. Pysmennyi,
K.K. Tkachuk, N.M. Fialko, V.M. Chermalyh,
V.F. Shinkarenko, A.A. Shcherba, O.S. Yandulsky

FOREIGN MEMBERS OF
EDITORIAL BOARD:

E. Handschin (*Institute of Power Systems and Power Economics of Dortmund Technical University, Germany*),
Richard Strzelecki (*Electro technical Institute, Warsaw, Poland*), Y.I. Blinov (*St.Peterburg Electrotechnical University, Russia*), P.Y. Ekel (*The Pontifical University, Belo Horizonte, Brazil*), Dimitros Mavrakis (*University of Athens, Greece*), Richon Dominique (*National Higher Mining School of Paris, France*), A.V. Kuznetsov (*North Caroline State University, USA*)

Technical secretary N.O. Kravchuk
Website of the journal <http://energy.kpi.ua>

Journal was registered Certificate of State Registration Printed Media
series KB №4135 dated 30 March 2000

The Journal was registered by HAK of Ukraine as an occupational edition. Resolution of HAK of Ukraine dated 1 July 2010 № 1-05/5. The Journal is included in scientometric database RSCI, databases «Scientific Periodicals of Ukraine», Google Scholar. Passed for printing under recommendation of Academic Council of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" (protocol № 5 on June 8, 2015).

Proofreading V.G. Smoliar. Makeup, administration web site O.O. Zakladnyi.
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: krav@iee.kpi.ua
The publisher NTUU "KPI" 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**

©NTUU «KPI», 2015

ЗМІСТ

ТЕХНОЛОГІЇ

- М. К. Безродний, Д. С. Кутра, І. В. Сергієнко.** Ефективність рециркуляційної теплонасосної системи кондиціювання повітря в закритому плавальному басейні в спекотний період року..... 7
- В. А. Єрошенко, В. М. Сліденко.** Гетерогенні ліофобні системи – потужні дисипатори енергії коливань в гідромеханічних системах..... 16
- В. І. Дешко, І. Ю. Білоус.** Моніторинг температурного стану навчального корпусу..... 22
- В. Е. Костюк, Е. И. Кирилаш.** Численное исследование теплового состояния оборудования силового блока турбокомпрессорного агрегата при наличии тепловой изоляции горячих узлов.... 30
- В. П. Калинин, А. В. Мейта.** Определение интервала дискретизации при исследовании режимов электропотребления объектов дробильно-помольного комплекса..... 38
- О. В. Коцар, Ю. О. Расько, П. М. Галабіцький.** Підвищення достовірності прогнозування навантаження кінцевих споживачів в РДДБР..... 43
- С. В. Казанский, В. И. Моссаковский, Д. П. Печенкин.** Моделирование нестационарных тепловых режимов силовых масляных трансформаторов..... 53
- В. Г. Петренко, А. С. Соломаха, П. О. Барабаш.** Термодинамічний аналіз процесу впорскування зрідженого пропану до двигуна внутрішнього згорання..... 58
- В. О. Костюк.** Модифіковані схеми розрахунку нормованої ціни виробництва в задачах детерміновано-стохастичного моделювання нових електрогенерувальних об'єктів..... 64
- Г. Г. Стрелкова.** Виробництво електроенергії сонячними електростанціями: світові тенденції і стан в Україні..... 78
- А. М. Ковальчук, Шафик Фаик Абдул Разак.** Эффективность использования средств распределенной генерации (возобновляемых и традиционных) для условий республики Ирак..... 87
- Д. О. Босній.** Забезпечення паралельної роботи тягових підстанцій змінного струму в умовах транзитних перетікань потужності..... 95
- С. В. Гайдук, Д. Ю. Гайдук.** Основы формирования самоконтроля при подготовке специалистов для энергетического комплекса..... 103
- Ю. Б. Лиуш.** О влиянии конструктивных особенностей нагревательной печи на распределение температуры внутри камеры..... 110
- А.Е. Денисова, К.В. Агеев.** Струйно-вихревые рекуператоры как аппараты с активными гидрогазодинамическими режимами..... 113

ЕКОНОМІКА

- М. Т. Стрелков.** Регульована й диференційована тарифікація електроенергії..... 123
- Основні засади редакційної політики..... 131
- Вимоги до оформлення статей..... 132

CONTENTS

TECHNIQUE

- M. K. Bezrodny, D. S. Kutra, I. V. Serhienko.** Efficiency of recirculating heat pump air conditioning system in the indoor swimming pool during the hot season..... 7
- V. Eroshenko, V. Slidenko.** Heterogeneous lyophobic systems – the powerful dissipaters of energy oscillation in the hydro-mechanical systems..... 16
- V. Deshko, I. Bilous.** Monitoring of temperature of educational facility..... 22
- V. Ye. Kostyuk, Ye. I. Kirilash.** Numerical research of the turbocompressor unit power block equipment heat state in the presence of hot components heat insulation..... 30
- V. Kalinchyk, O. Meyta.** Determination of sampling interval during electricity consumption modes studies for crushing-grinding complex units..... 38
- O. Kotsar, Y. Rasko, P. Galabitskiy.** Increasing the reliability of load forecasting in BCM&BM..... 48
- S. Kazanskiy, V. Mossakovskiy, D. Pechonkin.** Simulation of non-stationary thermal modes of oil power transformers..... 53
- V. Petrenko, A. Solomakha, P. Barabash.** Thermodynamic analysis of the process related to liquefied propane injection to internal combustion engine..... 58
- V. O. Kostiuk.** The modified technique for leveled energy cost computing to provide deterministic and stochastic modeling of new generating facilities..... 64
- G. G. Strelkova.** Electricity generation by solar photovoltaic power plants: global trends and state in Ukraine..... 78
- A. Kovalchuk, Shafeek F. Abdul Razak.** Efficient use of the distributed generation (renewable and traditional) for the conditions of the republic of Iraq..... 87
- D. O. Bosiy.** Providing the parallel operation of the alternating current traction substations under conditions of transit power flows..... 95
- S. V. Gaiduk, D. U. Gaiduk.** Bases of forming of self-control at preparation of specialists for a power complex..... 103
- U. Liush.** About influence of structural features of heater stove on distribution of temperature into chamber..... 110
- A. E. Denysova, K. V. Agyeyev.** Jet-vortex recuperators as the apparatus with hydro-active modes..... 113

ECONOMY

- M. T. Strelkov.** Regulated and differentiated tariffication of electricity..... 123

ТЕХНОЛОГІЇ TECHNIQUE

УДК 621.577

М.К. Безродний, д-р техн. наук, професор
Д.С. Кутра, канд. техн. наук; І.В. Сергієнко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ ТЕПЛОНАСОСНОЇ СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ В ЗАКРИТОМУ ПЛАВАЛЬНОМУ БАСЕЙНІ В СПЕКОТНИЙ ПЕРІОД РОКУ

У статті проведено аналіз термодинамічної ефективності теплонасосної схеми кондиціювання повітря з рециркуляцією для критого басейну в спекотний період року, в залежності від параметрів роботи системи і зовнішнього повітря. Побудована математична модель роботи рециркуляційної теплонасосної системи кондиціювання повітря, реалізація якої була здійснена чисельним методом послідовних наближень.

Отримані залежності для визначення параметрів повітря у характерних точках системи та холодильного коефіцієнта теплонасосної системи кондиціювання.

Показано, що з підвищенням температури і відносної вологості зовнішнього повітря відбувається розширення температурних рамок циклу роботи теплового насоса, що призводить до погіршення умов його роботи та суттєвого зниження холодильного коефіцієнта теплового насоса і холодильного коефіцієнта теплонасосної схеми.

Визначено, що застосування розглянутої схеми кондиціювання повітря басейну з рециркуляцією відпрацьованого повітря забезпечує підвищення холодильного коефіцієнта схеми з підвищенням температури навколишнього середовища, але не дозволяє досягти високої термодинамічної ефективності та значного підвищення граничної температури зовнішнього повітря.

Ключові слова: тепловий насос, басейн, кондиціювання, рециркуляція.

Вступ

Використання теплових насосів у системах тепло- та холодопостачання як житлових, так і громадських будівель та об'єктів у наш час набуває все більшого поширення. До останніх можна віднести спортивні та рекреаційні комплекси, зокрема, - зали плавальних басейнів, підтримка заданого тепловологісного режиму в яких є важливою та водночас складною задачею. Завдяки успішному поєднанню у теплових насосах функцій охолоджувача, осушувача та нагрівача повітря створюються передумови їх ефективного використання в системах вентиляції та кондиціювання вищезгаданих об'єктів [1].

Видалення великої кількості вологи, що надходить у приміщення басейну внаслідок випаровування вологи із дзеркала його чаші, а також підтримка регламентованих санітарними нормами параметрів (температури та вологості) повітря, є основною задачею, яку повинна ефективно вирішувати теплонасосна система тепло- та вологообробки повітря.

Разом з тим, оскільки рекреаційні та спортивні комплекси працюють цілорічно, теплонасосна система повинна вирішувати задачу не лише видалення та утилізації значних об'ємів вологого повітря, а й задачі, пов'язані з сезонною зміною температури та вологості зовнішнього припливного повітря: нагрівання і зволоження припливного повітря взимку та охолодження і осушення його влітку (кондиціювання).

Практичний досвід успішного використання теплового насоса для утилізації енергії відпрацьованого повітря плавального басейну наведено в роботі [2] на прикладі системи вентиляції критого басейну у м. Шанхай. В роботах [3, 4] розглянуто можливість використання як додаткового джерела енергії для теплонасосної системи вентиляції басейну сонячного колектору, що дозволяє, за даними авторів, досягти значення реального коефіцієнта трансформації 4,5 та знизити споживання енергії на 79 % у порівнянні з традиційною системою.

У роботі [5] наведено приклад успішного застосування теплонасосної системи подібного типу, яка була вперше впроваджена в Україні з метою забезпечення комфортного мікроклімату в холодний і теплий періоди року для різних режимів роботи типового критого басейну. Наведені в [5] характеристики роботи системи свідчать про досить високу енергетичну ефективність роботи подібної системи в холодний період року.

Оцінка термодинамічної ефективності роботи теплонасосної системи в спекотний період року для потреб кондиціонування проведена в роботі [6], в якій розглянута система відкритого типу з однократним використанням повітря. Отримані в роботі результати свідчать про високу ефективність роботи теплонасосних систем кондиціонування повітря, практичне використання яких в описаній авторами схемі, однак, обмежено високими значеннями температури скидного повітря після конденсатора теплового насоса. Одним із шляхів вирішення даної проблеми може бути реалізація рециркуляції відпрацьованого у басейні повітря. Однак ефективність роботи такої системи кондиціонування на сьогоднішній день є питанням відкритим і потребує детальної термодинамічної оцінки.

Мета та завдання

Метою статті є аналіз термодинамічної ефективності роботи теплонасосної схеми кондиціонування повітря з його рециркуляцією для критого басейну в спекотний період року в залежності від параметрів роботи системи і зовнішнього повітря.

Опис роботи схеми

На рис. 1 наведено принципову схему теплонасосної системи кондиціонування повітря з рециркуляцією у закритому плавальному басейні. Робочий процес тепловологообробки повітря в системі кондиціонування в h-d діаграмі зображено на рис. 2.

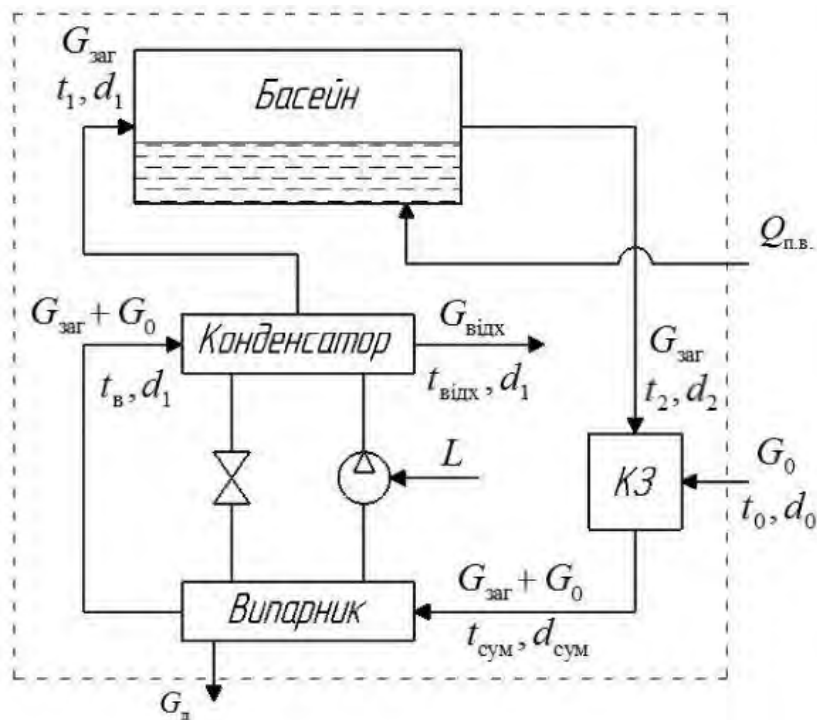


Рис. 1. Принципова схема теплонасосної системи кондиціонування повітря плавального басейну: КЗ – камера змішування.

У стаціонарному режимі роботи установки потік повітря витратою $G_{\text{заг}}$ та параметрами t_1, d_1 надходить у приміщення басейну. Після його проходження повітря з параметрами t_2, d_2 подається до камери змішування (КЗ), де змішується із потоком свіжого повітря G_0 з параметрами t_0, d_0 . Отримана суміш з параметрами $t_{\text{сум}}, d_{\text{сум}}$ та загальною витратою $(G_{\text{заг}} + G_0)$ надходить до випарника теплового насоса. У випарнику, завдяки теплообміну між повітрям і холодильним агентом, відбувається видалення частки вологи ($G_{\text{д}}$) із суміші внаслідок його охолодження і осушення до параметрів $t_{\text{в}}, d_1$. Після

випарника потік повітря ($G_{\text{заг}} + G_0$) надходить до конденсатора ТН для потреб його охолодження. Частина нагрітого таким чином у конденсаторі ТН повітря ($G_{\text{заг}}$) із заданими параметрами t_1, d_1 надходить у басейн. Інша частина повітря із конденсатора ($G_{\text{відх}}$) з параметрами $t_{\text{відх}}, d_{\text{відх}}$ видаляється в атмосферу. Цикл повторюється.

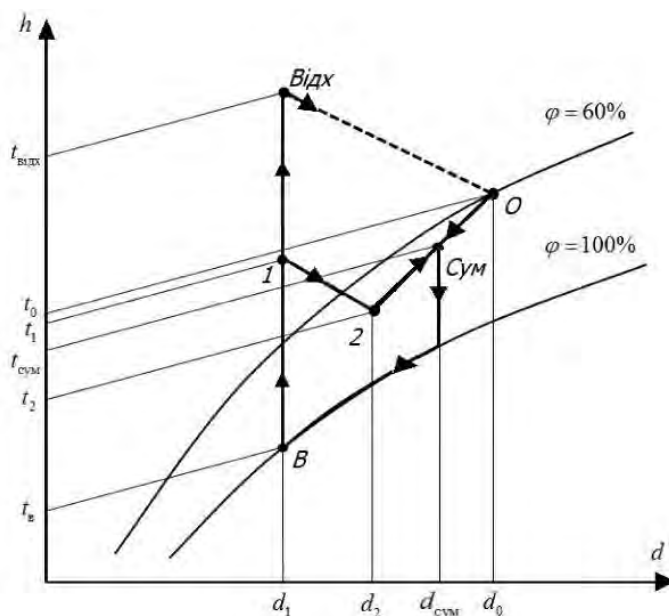


Рис. 2. Діаграма процесу тепловологообробки повітря в системі кондиціонування плавального басейну.

Аналітичний аналіз схеми

Підтримка заданих технологічних параметрів у характерних вузлових точках схеми забезпечується за допомогою теплового насоса, у конденсаторі якого відбувається розподіл повітря і за допомогою камери змішування.

Частку зовнішнього повітря, підведеного до КЗ (по відношенню до загального потоку повітря через приміщення басейну), в загальному випадку можна виразити відношенням

$$K_0 = G_0 / G_{\text{заг}} \quad (1)$$

Величина коефіцієнта K_0 є регульованим параметром системи і впливає, в першу чергу, на температуру потоку $G_{\text{відх}}$, що видаляється із системи після конденсатора ТН. Значення температури повітря $t_{\text{відх}}$ після конденсатора може бути визначене із загальновідомого рівняння для ентальпії потоку вологого повітря $h_{\text{відх}}$, яка, в свою чергу, визначається із рівняння теплового балансу схеми в цілому, що має наступний вигляд

$$L + Q_{\text{п.в.}} + Q_0 = Q_{\text{відх}} + Q_{\text{д}}, \quad (2)$$

де L – робота приводу компресора ТН, кВт; $Q_{\text{п.в.}}$ – кількість теплоти, що підводиться до води басейну для компенсації теплових втрат внаслідок випаровування вологи, кВт; Q_0 – кількість теплоти, що підводиться до системи з зовнішнім повітрям; $Q_{\text{відх}}$ – кількість теплоти, що видаляється в навколишнє середовище з повітрям після конденсатора, кВт. $Q_{\text{д}}$ – кількість теплоти, що видаляється в дренаж з конденсатом із випарника, кВт (в розрахунках можна знехтувати).

Робота приводу компресора ТН визначається як

$$L = Q_{\text{вип}}^{\text{ТН}} / (\varphi - 1), \quad (3)$$

де $Q_{\text{вип}}^{\text{ТН}}$ – теплове навантаження випарника ТН, кВт, яке визначається за співвідношенням

$$Q_{\text{вип}}^{\text{ТН}} = (G_{\text{заг}} + G_0)(h_{\text{сум}} - h_{\text{в}}). \quad (4)$$

Кількість теплоти, що підводиться до системи з зовнішнім повітрям

$$Q_0 = G_0 h_0. \quad (5)$$

Кількість теплоти, що видаляється в атмосферу з потоком відпрацьованого повітря із конденсатора

$$Q_{\text{відх}} = G_0 h_{\text{відх}}. \quad (6)$$

Кількість теплоти, що підводиться до води у басейні

$$Q_{\text{п.в.}} = \frac{Cr}{3600} F_6, \quad (7)$$

де r – питома теплота пароутворення, Дж/кг; F_6 – площа дзеркала басейну, м²; C – питома кількість вологи, що виділяється з поверхні дзеркала басейну, кг/(м² · год).

Питому кількість вологи, що виділяється з поверхні дзеркала басейну за годину, можна визначити за емпіричною формулою Бязіна-Крумме

$$C = 0,118 + 0,01995\bar{a} \frac{P_{\text{вод}} - P_{\text{пов}}}{133,3}, \quad (8)$$

де $P_{\text{вод}}$ – тиск водяних парів насиченого повітря при температурі повітря, що дорівнює заданій температурі води, Па; $P_{\text{пов}}$ – парціальний тиск водяних парів при заданій температурі і відносній вологості повітря в залі басейну, Па; \bar{a} – коефіцієнт зайнятості басейну людьми (приймаємо $\bar{a} = 0,4$ для невеликих громадських басейнів).

Загальна витрата повітря через приміщення басейну визначається за формулою

$$G_{\text{заг}} = C_1 F_6, \quad (9)$$

де C_1 – питома витрата повітря, яку необхідно подавати в приміщення басейну для підтримання в ньому комфортних умов перебування, кг/(м² · с). Величина C_1 може бути визначена з умови видалення вологи, що утворюється внаслідок випаровування води при заданій різниці вологовмісту повітря на виході та вході в приміщення басейну за співвідношенням

$$C_1 = \frac{\left[\frac{C}{3600} + \frac{\alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{вод}})}{r} \right]}{d_2 - d_1}, \quad (10)$$

де $\alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{вод}})/r$ – питома кількість вологи, що виділяється з дзеркала басейну за рахунок конвективної тепловіддачі від повітря до води, кг/(м² · с); α – коефіцієнт тепловіддачі від повітря до поверхні дзеркала ванни басейну (в розрахунковому аналізі приймаємо згідно з [7]), Вт/(м² · К); $t_{\text{пов}}$ – температура повітря в приміщенні басейну, °С; $t_{\text{вод}}$ – температура води в басейні, °С.

Таким чином, відповідне рівняння для визначення $h_{\text{відх}}$ з урахуванням вищенаведених рівнянь (1) – (10) матиме вигляд

$$h_{\text{відх}} = h_0 + \frac{(K_0 + 1)(h_{\text{сум}} - h_b) \frac{1}{\varphi - 1} + \frac{Cr}{3600 C_1}}{K_0}, \quad (11)$$

де φ – коефіцієнт трансформації теплоти ТН; h_0 – ентальпія свіжого припливного повітря, кДж/кг; h_b – ентальпія повітря перед конденсатором ТН, кДж/кг; $h_{\text{сум}}$ – ентальпія повітря перед випарником ТН (на виході із КЗ), кДж/кг.

Коефіцієнт трансформації теплоти ТН для ідеального циклу роботи ТН з урахуванням теплових необоротностей у випарнику та конденсаторі може бути визначений як

$$\varphi = \frac{1}{1 - \frac{273 + t_b - \Delta t_b}{273 + t_{\text{відх}} + \Delta t_k}}, \quad (12)$$

де t_b , $t_{\text{відх}}$ – температури повітря на виході із випарника та конденсатора ТН відповідно, °С; Δt_b , Δt_k – різниці температур повітря і холодильного агента ТН на виході із випарника і конденсатора відповідно, °С. У відповідності з [8] для ТН типу «повітря-повітря» можна прийняти $\Delta t_b = 10^\circ\text{C}$, $\Delta t_k = 10^\circ\text{C}$.

Температура повітря на виході із випарника ТН може бути визначена за допомогою h-d діаграми вологого повітря на лінії $\varphi = 100\%$, або із інтерполяційного рівняння

$$t_b = \frac{\ln(226, 2d_b)}{0,0596}, \quad (13)$$

в якому $d_b = d_1$.

Ентальпія потоку повітря на виході із КЗ $h_{\text{сум}}$ (у рівнянні (11)) може бути визначена на основі теплового балансу камери змішування

$$Q_0 + Q_2 = Q_{\text{сум}}, \quad (14)$$

де $Q_2 = G_{\text{заг}} h_2$ – кількість теплоти, що надходить у КЗ від басейну, кВт; $Q_{\text{сум}} = (G_{\text{заг}} + G_0) h_{\text{сум}}$ – кількість теплоти, що надходить у випарник ТН, кВт.

З урахуванням вищенаведеного

$$h_{\text{сум}} = \frac{K_0 h_0 + h_2}{1 + K_0}. \quad (15)$$

Отримані параметри потоків повітря у вузлових точках схеми дозволяють перейти до визначення термодинамічної ефективності роботи схеми кондиціонування при заданих параметрах повітря $t_1, \Delta d = d_2 - d_1$ та різних значеннях температури, відносної вологості зовнішнього повітря та частки свіжого припливного повітря, величина якої виражається коефіцієнтом K_0 .

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

$$\varepsilon_{\text{тн}} = \varphi - 1. \quad (16)$$

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

$$\varepsilon_{\text{сх}} = \frac{Q_{\text{хол}}}{L}, \quad (17)$$

де $Q_{\text{хол}} = G_{\text{заг}} (h_0 - h_1)$ – холодильна потужність, що продукується на вході в приміщення басейну.

З урахуванням рівнянь (1), (3), (4), вираз (17) можна записати наступним чином

$$\varepsilon_{\text{сх}} = \frac{(\varphi - 1)(h_0 - h_1)}{(1 + K_0)(h_{\text{сум}} - h_b)} = \frac{\varepsilon_{\text{тн}}(h_0 - h_1)}{(1 + K_0)(h_{\text{сум}} - h_b)}. \quad (18)$$

Розрахунковий аналіз схеми

Розрахунковий аналіз представленої схеми проводився шляхом реалізації побудованої математичної моделі методом послідовних наближень.

При цьому було розглянуто рекреаційний басейн з параметрами $t_{\text{пов}} = 30^\circ\text{C}$, $t_{\text{вод}} = 28^\circ\text{C}$. Параметри навколишнього припливного повітря змінювались у діапазоні температур $t_0 = 30...36^\circ\text{C}$ при значеннях відносної вологості повітря $\varphi = 50; 60; 70\%$ та різних частках свіжого припливного повітря у діапазоні $K_0 = 0,3...1,0$. Приріст вологовмісту при проходженні приміщення басейну дорівнював $\Delta d_{2-1} = 1; 2; 3 \text{ г}_{\text{вол}}/\text{кг}_{\text{сп}}$.

Для визначення температур повітря на вході та виході з басейну із теплового балансу приміщення басейну визначено температурний перепад між припливним та витяжним повітрям

$$\Delta t = \frac{\alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{вод}})(d_2 - d_1)}{\left[\frac{C}{3600} + \frac{\alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{вод}})}{r} \right] c_{\text{сп}}}. \quad (19)$$

де $c_{\text{сп}}$ - питома теплоємність сухого повітря, кДж/(кг \cdot °C).

Температури повітря на вході та виході з приміщення басейну

$$t_1 = t_{\text{пов}} + \Delta t/2, \quad t_2 = t_{\text{пов}} - \Delta t/2. \quad (20)$$

Реалізація побудованої математичної моделі дозволяє отримати залежності характерних параметрів роботи розглянутої теплонасосної системи від зміни температури та відносної вологості навколишнього припливного повітря та різних значеннях приросту вологовмісту повітря при проходженні приміщення басейну Δd_{2-1} .

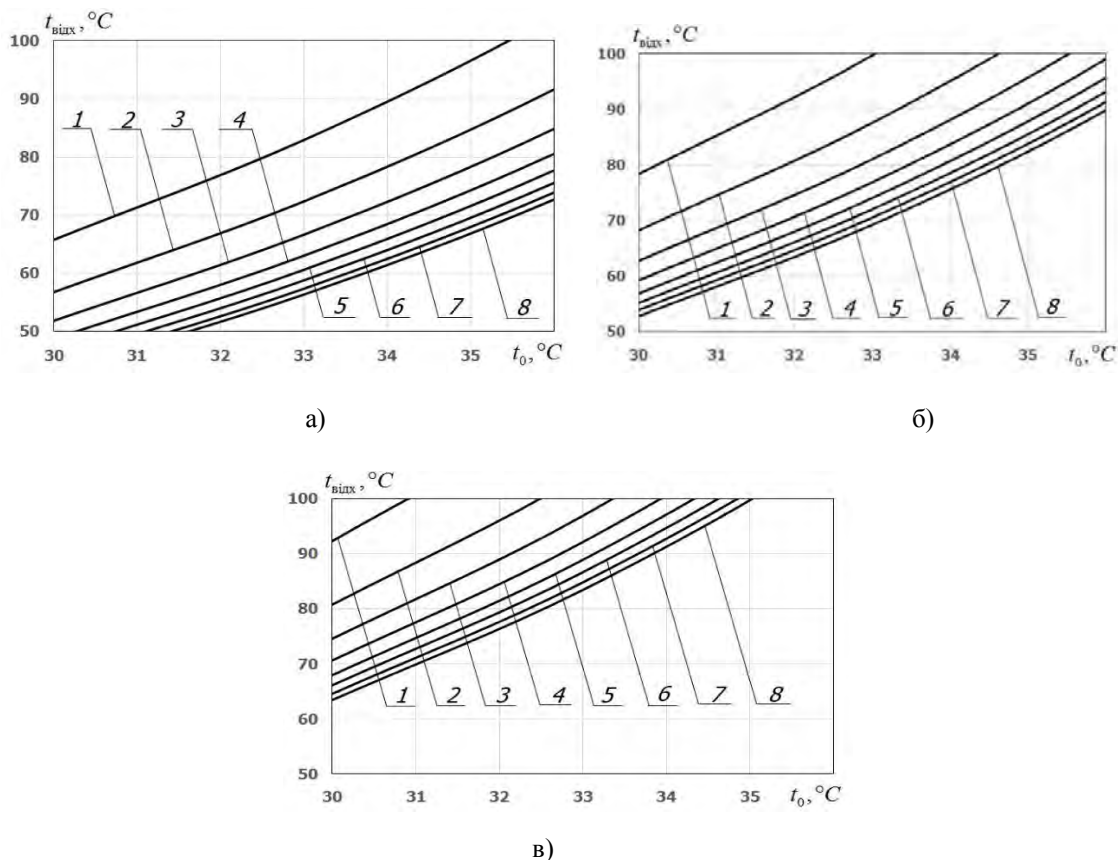


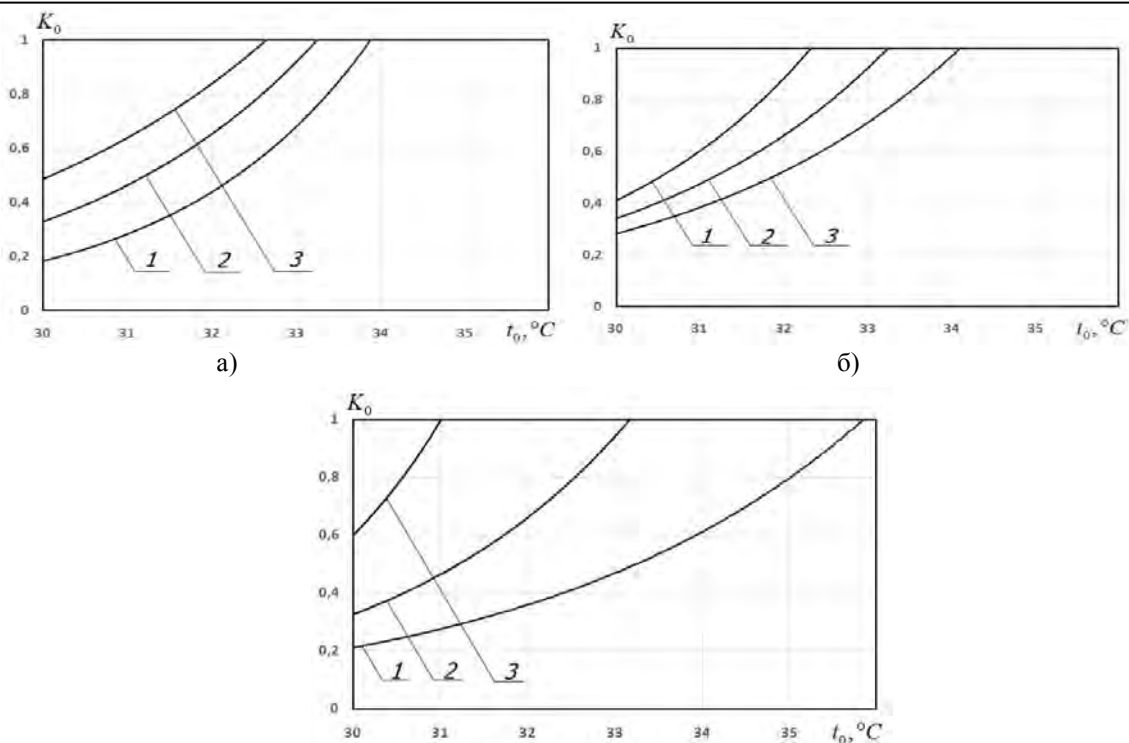
Рис. 3. Залежність температури повітря, що видаляється із конденсатора ТН, від температури зовнішнього повітря при $\Delta d_{2-1} = 2 \Gamma_{\text{вол}} / \text{кг}_{\text{сп}}$:
 а) $\varphi = 50\%$; б) $\varphi = 60\%$; в) $\varphi = 70\%$; (1 – $K_0 = 0,3$; 2 – $K_0 = 0,4$; 3 – $K_0 = 0,5$; 4 – $K_0 = 0,6$; 5 – $K_0 = 0,7$; 6 – $K_0 = 0,8$; 7 – $K_0 = 0,9$; 8 – $K_0 = 1,0$).

Як видно з рис. 3в), підвищення температури і відносної вологості свіжого припливного повітря призводить до суттєвого росту температури потоку на виході із конденсатора ТН. При цьому підвищення K_0 дозволяє суттєво знизити температуру $t_{\text{вих}}$, що пов'язано зі збільшенням потоку повітря, що проходить через конденсатор ТН. Це в свою чергу дозволяє знизити температурні технічні вимоги до самого теплового насоса.

У зв'язку з цим, з практичної точки зору важливою є картина зміни робочого діапазону коефіцієнта K_0 , в залежності від параметрів свіжого припливного повітря та граничних значень $t_{\text{вих}}$, які може забезпечити конкретний тепловий насос (рис. 4).

Як видно з рисунка, зі збільшенням температури свіжого повітря значення K_0 , при експлуатації розглянутої теплонасосної системи, необхідно збільшувати. При цьому, зниження приросту вологовмісту повітря Δd_{2-1} при проходженні басейну (рис. 4а), як і забезпечення відносно високих температур $t_{\text{вих}}$ після конденсатора ТН (рис. 4б) дозволяє суттєво розширити робочий діапазон експлуатації теплонасосної системи кондиціонування по t_0 . Однак, відносна вологість припливного повітря грає домінуючу роль в можливості експлуатації системи у теплий період року (рис. 4в). Відносно низькі значення вологості свіжого повітря ($\varphi \approx 50\%$) дозволяють використовувати розглянуту теплонасосну систему для потреб кондиціонування повітря практично у всьому прийнятному діапазоні зміни $t_0 = 30 \dots 36^\circ\text{C}$.

Для оцінки ефективності роботи наведеної теплонасосної системи кондиціонування повітря закритого плавального басейну доцільно розглянути графіки залежності холодильного коефіцієнта ТН та схеми в цілому (рис. 5).

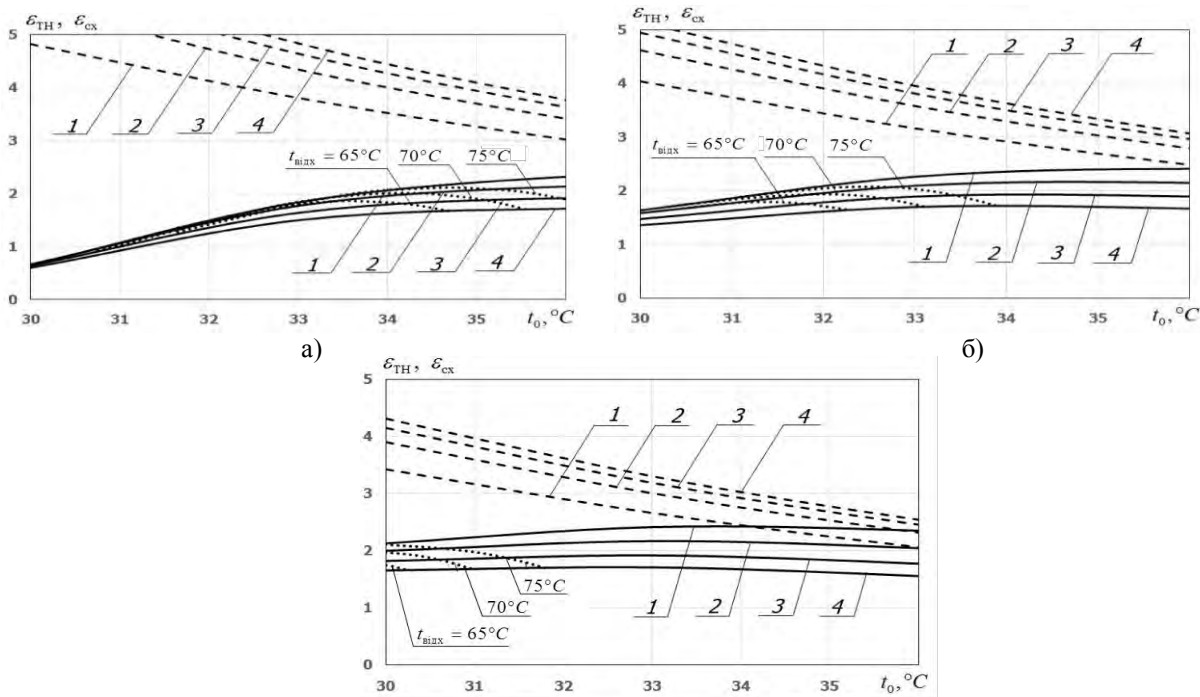


в)

Рис. 4. Залежність частки зовнішнього повітря, підведеного до КЗ, від температури навколишнього повітря при: а) $\varphi = 60\%$, $t_{\text{вдх}} = 70^\circ\text{C}$ (1 – $\Delta d_{2-1} = 1 \text{ г}_{\text{вол}}/\text{кг}_{\text{сп}}$, 2 – $\Delta d_{2-1} = 2 \text{ г}_{\text{вол}}/\text{кг}_{\text{сп}}$, 3 – $\Delta d_{2-1} = 3 \text{ г}_{\text{вол}}/\text{кг}_{\text{сп}}$);

б) $\varphi = 60\%$, $\Delta d_{2-1} = 2 \text{ г}_{\text{вол}}/\text{кг}_{\text{сп}}$ (1 – $t_{\text{вдх}} = 65^\circ\text{C}$, 2 – $t_{\text{вдх}} = 70^\circ\text{C}$, 3 – $t_{\text{вдх}} = 75^\circ\text{C}$);

в) $\Delta d_{2-1} = 2 \text{ г}_{\text{вол}}/\text{кг}_{\text{сп}}$, $t_{\text{вдх}} = 70^\circ\text{C}$ (1 – $\varphi = 50\%$, 2 – $\varphi = 60\%$, 3 – $\varphi = 70\%$)



в)

Рис. 5. Залежність холодильного коефіцієнта ТН (штрихові лінії) та холодильного коефіцієнта теплонасосної схеми (суцільні лінії) від температури навколишнього повітря при $\Delta d_{2-1} = 2 \text{ г}_{\text{вол}}/\text{кг}_{\text{сп}}$:

а) $\varphi = 50\%$; б) $\varphi = 60\%$; в) $\varphi = 70\%$. (1 – $K_0 = 0,4$; 2 – $K_0 = 0,6$; 3 – $K_0 = 0,8$; 4 – $K_0 = 1,0$).

Аналізуючи рис. 5 (з урахуванням залежностей на рис. 3), можна зробити висновок, що з підвищенням температури навколишнього повітря відбувається розширення температурних рамок циклу роботи ТН, що призводить до погіршення умов його роботи та суттєвого зниження холодильного коефіцієнта ТН. Однак реалізація повної рециркуляції відпрацьованого у приміщенні басейну повітря дозволяє частково «зберігати» холод у системі циркуляції, що не тільки не знижує (рис. 5в), а й за малих значень відносної вологості (рис. 5а) підвищує загальну ефективність роботи системи (ϵ_{cx}). Разом з тим спостерігається протилежний вплив на величини ϵ_{th} та ϵ_{cx} збільшення частки свіжого припливного повітря у системі: підвищення K_0 дозволяє інтенсивніше охолоджувати конденсатор ТН (знижуючи $t_{відх}$), що призводить до підвищення коефіцієнту трансформації ТН, а отже і ϵ_{th} . З іншого боку, збільшення частки припливного повітря G_0 на одиницю $G_{зар}$ призводить до «виносу» виробленого у ТН та акумульованого за рахунок багатократної рециркуляції холоду із системи, а це в свою чергу – до зниження ϵ_{cx} .

Важливим висновком із наведених на рис. 5 графіків є наявність робочих областей теплонасосної системи кондиціонування, які обмежені в першу чергу значенням відносної вологості свіжого припливного повітря та максимальними температурами відхідного повітря із конденсатора (обумовленими технічними характеристиками ТН). Так, при $\varphi \leq 50\%$ та $t_{відх} = 70^\circ\text{C}$ (рис. 5а) експлуатація теплонасосної системи можлива у всьому діапазоні прийнятих значень t_0 . Разом з тим, така система практично не може бути застосована при високих $\varphi \geq 70\%$ (рис. 5в). Проміжне значення у цьому випадку займає робота системи при $\varphi \approx 60\%$, яка практично може бути застосована до значень $t_0 \leq 33...34^\circ\text{C}$.

В цілому слід зазначити, що в порівнянні зі схемою без рециркуляції, але з охолодженням конденсатора ТН атмосферним повітрям [6], не зважаючи на утилізацію холоду відпрацьованого повітря за рахунок рециркуляції, дана схема характеризується більш низькими значеннями холодильного коефіцієнта схеми, що пов'язано з більш високим тепловим навантаженням випарника теплового насосу. Можливості схеми також обмежені за робочим діапазоном зміни температури зовнішнього повітря, що можна пояснити труднощами відведення надлишкової теплоти схеми в навколишнє середовище при скиданні повітря з низьким вологовмістом, який за даною схемою дорівнює вологовмісту повітря на вході в приміщення басейну. Тому доцільно розглянути рециркуляційну схему з розміщенням камери змішування після теплового насосу і скиданням відпрацьованого повітря в навколишнє середовище при максимальному вологовмісті в системі, яке дорівнює вологовмісту свіжого атмосферного повітря.

Висновки

1. Застосування розглянутої схеми кондиціонування повітря басейну з рециркуляцією відпрацьованого повітря забезпечує деяке підвищення холодильного коефіцієнта схеми з підвищенням температури навколишнього середовища, але не дозволяє досягти високої термодинамічної ефективності і значного підвищення граничної температури зовнішнього повітря.

2. Для подальшого підвищення термодинамічної ефективності схеми кондиціонування повітря доцільно розглянути рециркуляційну схему з розміщенням камери змішування після теплового насосу і скиданням відпрацьованого повітря в навколишнє середовище при максимальному вологовмісті в системі.

Список літератури

1. Бондарь Е.С., Калугин П.В. Тепловой насос – энергетически эффективная составляющая систем кондиционирования воздуха // Тепловые насосы. – 2011. – № 2. – С. 25–30.
2. Peng Sun, Jing Yi Wu, Ru Zhu Wang, Yu Xiong Xu. Analysis of indoor environmental conditions and heat pump energy supply systems in indoor swimming pools // Energy and Buildings. – 2011. – Vol. 43. – С. 1071 – 1080.
3. Chow, T. T., Bai Y., Fong K.F., Lin Z. Analysis of a solar assisted heat pump system for indoor swimming pool water and space heating // Applied Energy. – 2012. – Vol. 100. – С. 309 – 317.
4. Olcay Kincay, Zafer Utlu, Ugur Akbulut. Technical and Economic Performance Analysis of Utilization of Solar Energy in Indoor Swimming Pools, An Application // Journal of Solar Energy Engineering. – 2011. – Vol. 134. – С. 300 – 309.
5. Мацевитый Ю.М., Чиркин Н.Б., Богданович Л.С., Клепанда А.С. Внедрение теплонасосных технологий // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2008. – № 3. – С. 4 – 10.
6. Безродний М.К., Кутра Д.С., Сергієнко І.В. Термодинамічна ефективність теплонасосної системи кондиціонування повітря в закритому плавальному басейні в спекотний період року // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2015. — №1. — С. 7 — 12.
7. Краснов, Ю. С. Системы вентиляции и кондиционирования. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.

8. Морозюк Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. – Одесса: Студия «Негоциант», 2006. – 712 с.

M.K. Bezrodny, D.S. Kutra, I.V. Serhienko

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

EFFICIENCY OF RECIRCULATING HEAT PUMP AIR CONDITIONING SYSTEM IN THE INDOOR SWIMMING POOL DURING THE HOT SEASON

The thermodynamic efficiency of recirculating heat pump air conditioning system in the indoor pool during the hot season are analyzed in the article, depending on the parameters of the system and the outside air. A mathematical model of the recirculation heat pump air conditioning system are developed, the implementation of which was a quantitative method of successive approximations.

The dependences for the parameters of air in characteristic points system and coefficient of heat pump air conditioning system are received.

There are shown that with increasing temperature and relative humidity of the outside air expanding the temperature scope of the heat pump cycle that distort his work and a significant reduction in coefficient of heat pump of performance and heat pump coefficient of performance of the scheme.

Use of heat pump air conditioning system in the indoor swimming pool with recirculation of exhaust air increase the cooling coefficient of scheme with increasing of ambient temperature, but do not allow to achieve of high thermodynamic efficiency and a significant increase of boundary ambient temperature.

Keywords: heat pump, swimming pool, conditioning, air recirculation.

1. Bondar E.S. Heat pump - energy efficiency part in air-conditioning systems / E.S. Bondar, P.V. Kalugin // *Teplovye nasosy*. – 2011. – № 2. – P. 25 – 30. (Rus.)

2. Peng Sun. Analysis of indoor environmental conditions and heat pump energy supply systems in indoor swimming pools / Peng Sun, Jing Yi Wu, Ru Zhu Wang, Yu Xiong Xu // *Energy and Buildings*. – 2011. – Vol. 43. – P. 1071 – 1080.

3. Chow T.T. Analysis of a solar assisted heat pump system for indoor swimming pool water and space heating / T.T. Chow, Y. Bai, K.F. Fong, Z. Lin // *Applied Energy*. – 2012. – Vol. 100. – P. 309 – 317.

4. Olcay Kincay. Technical and Economic Performance Analysis of Utilization of Solar Energy in Indoor Swimming Pools, An Application / Olcay Kincay, Zafer Utlu, Ugur Akbulut // *Journal of Solar Energy Engineering*. – 2011. – Vol. 134. – P. 300 – 309.

5. Macevityj Y.M. Implementation of heat pump technology / Y.M. Macevityj, N.B. Chirkin, L.S. Bohdanovich, A.S. Klepanda // *Ekotehnologii i resursosberezhenie*. – 2008. – № 3. – P. 4 – 10. (Rus.)

6. Bezrodny M.K. Thermodynamic efficiency of heat pump air conditioning system in the indoor swimming pool during the hot season / M.K. Bezrodny, D.S. Kutra, I.V. Serhienko // *Naukovi visti NTUU «KPI»*. – 2015. – № 1. – P. 7 – 12. (Ukr.)

7. Morozjuk T.V. Theory of chillers and heat pumps / T.V. Morozjuk. – Odessa: Negociant. – 2006. – 712p.

8. Krasnov Y.S. Ventilation and air conditioning systems / Y.S. Krasnov. – Moskva: Tehnosfera. – 2006. – 288 p.

УДК 621.577

М.К. Безродный, д-р техн. наук, профессор
Д.С. Кутра, канд. техн. наук; И.В. Сергиенко

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЫ
КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА В ЗАКРЫТОМ ПЛАВАТЕЛЬНОМ БАССЕЙНЕ В
ЖАРКИЙ ПЕРИОД ГОДА**

В статье проведен анализ термодинамической эффективности теплонасосной схемы кондиционирования воздуха с рециркуляцией для крытого бассейна в жаркий период года в зависимости от параметров работы системы и наружного воздуха. Построена математическая модель работы рециркуляционной теплонасосной системы кондиционирования воздуха, реализация которой была проведена численным методом последовательных приближений.

Получены зависимости для определения параметров воздуха в характерных точках системы и холодильного коэффициента теплонасосной системы кондиционирования.

Показано, что с повышением температуры и относительной влажности наружного воздуха происходит расширение температурных рамок цикла работы теплового насоса, что приводит к

ухудшенню умов його роботи і суттєвому зниженню холодильного коефіцієнта теплового насоса і холодильного коефіцієнта теплонасосної схеми.

Определено, что применение рассматриваемой схемы кондиционирования воздуха бассейна с рециркуляцией отработанного воздуха обеспечивает повышение холодильного коэффициента схемы с повышением температуры окружающей среды, но не позволяет достичь высокой термодинамической эффективности и повышения предельной температуры наружного воздуха.

Ключевые слова: тепловой насос, бассейн, кондиционирование, рециркуляция.

Надійшла 15.04.2015

Received 15.04.2015

УДК 620.97

В. А. Єрошенко, д-р техн. наук, професор

В. М. Сліденко, канд. техн. наук, доцент

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ГЕТЕРОГЕННІ ЛІОФОБНІ СИСТЕМИ – ПОТУЖНІ ДИСИПАТОРИ ЕНЕРГІЇ КОЛИВАНЬ В ГІДРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ

Представлено результати досліджень впливу функціонування гетерогенних ліофобних систем (ГЛС) на процес дисипації енергії в гідромеханічних коливальних системах.

На спеціально створеному мультиплікаторному стенді встановлено, що рівень дисипації енергії коливань в реальному гідроприводі може бути близьким до 90%.

Декремент затухання коливання 1,6...2,1. Підтверджена висока ефективність розсіювання механічної енергії за допомогою гетерогенних ліофобних систем в діапазоні частот 0...15 Гц.

Запропоновані раціональні області практичного застосування ГЛС для потужного розсіювання механічної енергії в різних областях техніки

Ключові слова: дисипація енергії, гетерогенні ліофобні системи, репульсивні клатрати, декремент затухання, енергія коливань.

Вступ.

Проблема надійного функціонування технічної системи, наприклад гірничої машини з гідромолотом, у значній мірі залежить від ефективності затухання коливань, породжених робочим органом [1]. Одним із ефективних способів гасіння енергії коливань може бути застосування в гідроприводі нетрадиційних робочих тіл.

В Інституті енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ "КПІ", в лабораторії фундаментальних та прикладних досліджень в області термомолекулярної енергетики проводяться дослідження з розробки і створення нового робочого тіла – гетерогенної ліофобної системи (ГЛС) або репульсивних клатратів (РК) з використанням поверхневих явищ у високодисперсних системах [2-4], а Центром енергозберігаючих імпульсно-хвильових конструкцій, технологій та навчальних систем проводяться дослідно-конструкторські розробки по практичному застосуванню ГЛС.

Гетерогенна ліофобна система – це ансамбль «капілярно-пористе тверде тіло - рідина, що не змочує це тіло» із значною питомою міжфазною поверхнею (200 – 1800 м²/г). Примусова, дією зовнішніх чинників, інтрузія рідини в пори твердого ліофобного тіла під тиском $p_{им}$ супроводжується примусовим розвитком міжфазної поверхні і накопиченням системою великої поверхневої енергії Гіббса. При цьому, зменшення об'єму ГЛС обумовлюється об'ємом пор твердої матриці. Самочинна екструзія рідини з порового простору матриці під тиском $p_{екс}$ повертає систему в початковий стан. Тиск самочинної екструзії $p_{екс}$ майже на порядок менше, ніж тиск примусової інтрузії $p_{им}$. Величезний гістерезис $H = p_{им} - p_{екс}$ в процесах тиск-розширення ГЛС пояснює природу надзвичайно високої дисипації механічної енергії у порівнянні зі спроможністю в'язких рідин (традиційні робочі тіла і засоби розсіювання енергії [5]). Питома об'ємна енергія дисипації за допомогою ГЛС в 10...100 разів перевищує той же показник для в'язких рідин [4, 6].

Цей екстраординарний ефект досягається завдяки специфічній міжмолекулярній взаємодії на розвинених міжфазних поверхнях (рідина–тверде тіло) в ліофобних системах (репульсивних клатратах).

Важливим для оцінки ефективності функціонування ГЛС в складі динамічної системи є встановлення основних параметрів функціонування ГЛС, які впливають на процес дисипації енергії

Метою роботи є експериментальне визначення характеристик ГЛС при навантаженні й розвантаженні тиском у робочій камері мультиплікації на спеціально виготовленому стенді та оцінка потужності дисипації енергії коливань в гідромеханічних системах.

Постановка задачі. Для досягнення мети необхідно встановити принципову можливість розсіювання енергії за допомогою ГЛС, отримати характеристику "тиск-розширення" ГЛС в умовах статичних та динамічних навантажень, встановити рівні декременту затухання коливань та його вплив на реальну гідромеханічну систему, визначити частотний діапазон ефективної роботи ГЛС (або РК).

Матеріал і результати досліджень.

В лабораторних умовах на спеціальному стенді проведено експериментальні дослідження процесу навантаження і розвантаження ГЛС тиском в умовах реального мультиплікаторного гідроприводу. Мультиплікатор тиску (рис.1), розрахункова схема якого показана на рис.2, встановлений на стенді і включає: корпус 1, в якому розташовані ступінчастий шток 2 і камера мультиплікації 3.

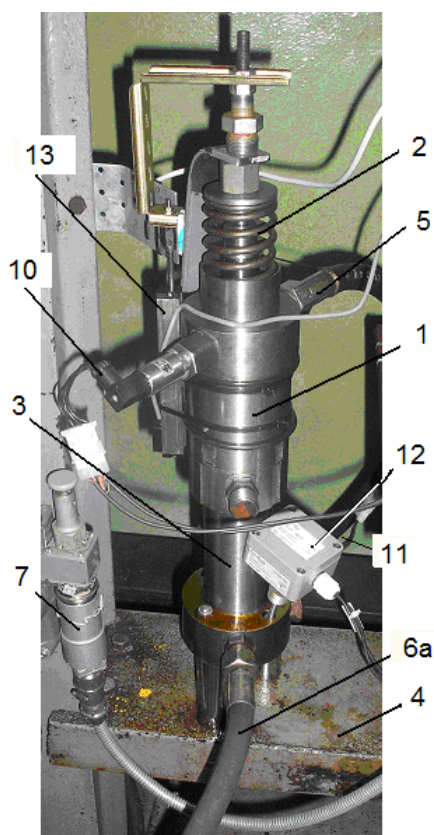


Рис. 1. Стенд для дослідження характеристик мультиплікатора

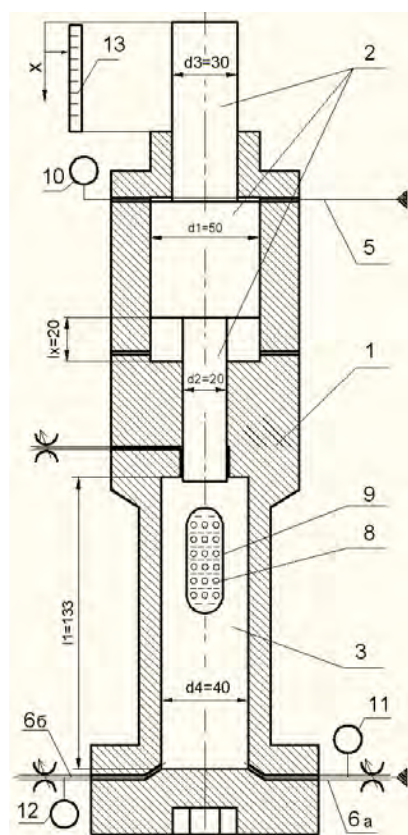


Рис. 2. Розрахункова схема мультиплікатора тиску

До мультиплікатора, встановленого на станині стенду 4 підведені гідравлічні лінії 5, 6а і 6б з можливістю подачі рідини від маслостанції через двохпозиційний чотирьохлінійний електрогідорозподільвач (ГА85М/5) 7, який дистанційно керується ЕОМ за програмою проведення експерименту. В камеру мультиплікації 3 встановлюється ГЛС 8 в гнучкій оболонці-контейнері 9. Для реєстрації параметрів процесу застосовані датчики: тиску 10, 11 (ADZ – SML – 20.0 , діапазон вимірювання тиску 0...50 МПа), температури 12 (Prignstz Mikrosystemtechnik GmbH СТТ 20.50-3) , переміщення 13 (MEGATRON MDCL100, діапазон переміщення 0...100 мм). Підпружинений ступінчастий шток 2 мультиплікатора 1 кінематично зв'язаний з датчиком переміщення 13. Як ГЛС використовували систему "гідрофобізований силікагель ("Symetry C8/ Waters) з сильно розвинутою внутрішньою поверхнею + вода, як робоча рідина" в спеціальному контейнері 9 (50x23x8) мм, який пройшов дегазацію з видаленням з суміші повітря. Як технологічну рідину в камері мультиплікації 3 використовували мінеральне масло АМГ-40.

На рис. 3 відображений момент установки ГЛС (поз. 2) в камеру мультиплікації.

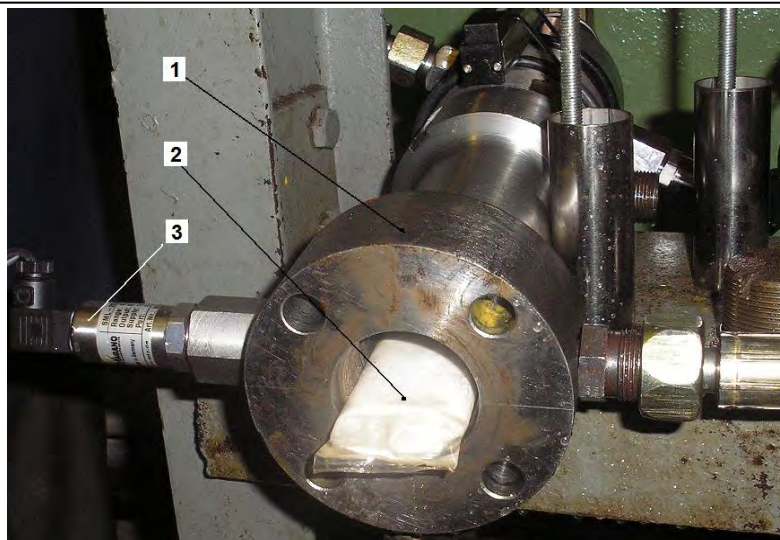


Рис. 3. Установка в камеру мультипликатора 1 ГЛС 2, 3- датчик тиску

Технологічна рідина з тиском p_1 через канал 4 подається гідроприводом на більшу ступінь штока 2 і переміщує його вниз в напрямку x (рис. 2). При цьому канали б_а і б_б перекриті, відповідно перекрита камера мультиплікації 3, і в ній скорочується об'єм, відповідно, в ній збільшується тиск p_2 . Виходячи з наведених значень геометричних параметрів (рис.2), теоретичний коефіцієнт мультиплікації k_M визначається співвідношенням $k_M = p_2/p_1 = (d_1^2 - d_3^2)/d_2^2 = (50^2 - 30^2)/20^2 = 4$ [1].

На рис. 4а наведено графіки зміни тиску в лінії нагнітання 5 і камері мультиплікації 3 в залежності від переміщення штоку 2, відповідно $p_1(x)$ та $p_2(x)$, зареєстровані за допомогою програмного забезпечення (ПЗ) "Powergraph". ПЗ "Powergraph" призначене для реєстрації, візуалізації, обробки й зберігання аналогових сигналів, записаних за допомогою АЦП, і дозволяє використовувати персональний комп'ютер, як стандартний вимірювальний прилад (вольтметр, самописець, осцилограф, спектроаналізатор та ін.). Співвідношення площ S_2 і S_1 , обмежених відповідно контурами 2, для камери мультиплікації, та 1, для лінії подачі технологічної рідини під більшу ступінь підпружиненого штока, характеризують розсіювання енергії та реальну мультиплікацію енергії $k_w = S_2/S_1$.

На рис. 4б наведена діаграма для аналізу співвідношення енергій в процесі навантаження (інтрузії рідини) і залишкової енергії після розвантаження (екструзії рідини із порового простору).

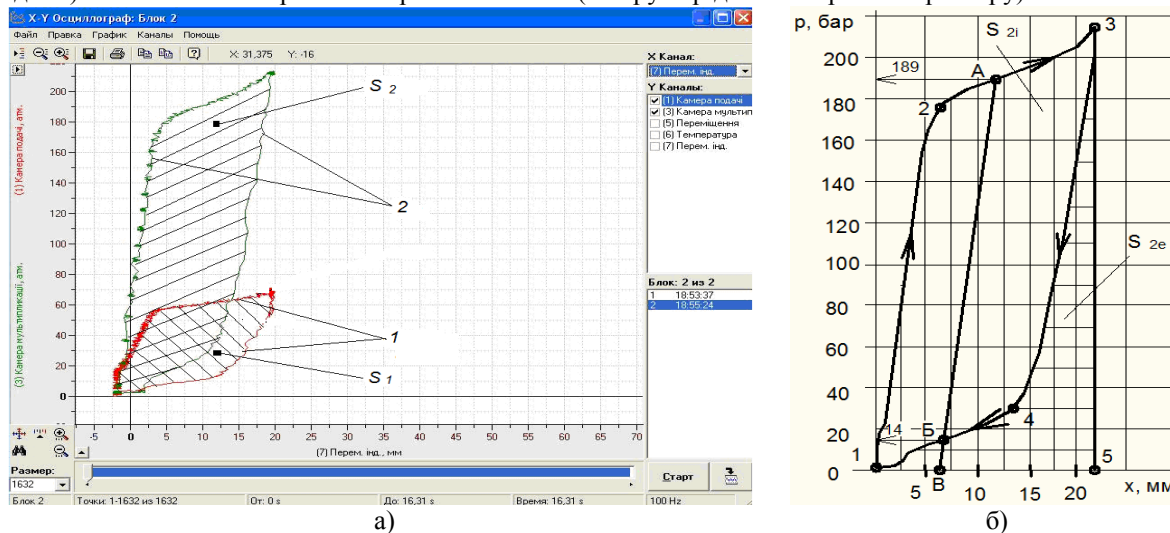


Рис 4. Результати експериментальних досліджень, а) 1, 2 – криві навантаження-розвантаження відповідно в лінії нагнітання гідроприводу і камері мультиплікації, S_1 , S_2 – площі, які характеризують розсіювання енергії відповідно в лінії нагнітання та камері мультиплікації з ГЛС; б) S_1 , S_2 – площі, які характеризують відповідно початкову енергію інтрузії $W_i = S_{2i} \cdot \pi d_2^2 / 4$ (контур 1-2-3-5-1), та залишкову енергію в кінці екструзії $W_e = S_{2e} \cdot \pi d_2^2 / 4$ (контур 3-4-1-5-3).

Виходячи з аналізу графіків (рис. 4 б), отримано значення ступені максимальної дисипації енергії по лініях А-В та Б-В: $\delta W = \frac{189-14}{189} \cdot 100\% = 92,6\%$. Визначені абсолютні середні значення енергій в камері мультиплікації: $W_i = 114,51$ Дж, $W_e = 37,38$ Дж. Втрата енергії $\Delta W_m = W_i - W_e = 77,13$ Дж.

Проведенням експериментальних досліджень функціонування екскаватора ЕО-4321А з гідромолотом ГПМ-300 (рис. 5), виробництва ПАТ "Атек" (Україна), встановлений синусоїдальний характер затухання коливань напружень в стрілі робочого обладнання (рис. 6) після одиночного удару гідромолота [1]. При цьому енергія хвильової складової в першому півперіоді складає [7]

$$W = \frac{A \cdot c}{E} \cdot \int \sigma^2(t) dt, \quad (1)$$

де A - площа поперечного перерізу (геометричний параметр), c - швидкість хвилі (швидкість звука), E - модуль Юнга, $\sigma(t) = \sigma_{\max} \sin(\omega_1 t)$, σ_{\max} - максимальне значення амплітуди, ω_1 - частота затухаючих коливань. Тоді, з урахуванням $\sigma(t)$, інтегруванням (1) отримаємо

$$W = \frac{A \cdot c}{E} \cdot \int \sigma_{\max}^2 \sin^2(\omega_1 t) dt = \frac{A \cdot c \cdot \sigma_{\max}^2}{E} \cdot \left[\frac{\omega_1 \cdot t}{2} - \frac{1}{4} \sin(2\omega_1 t) + C_1 \right]. \quad (2)$$

За початкових умов: $t=0$, $W=0$ відповідно $C_1=0$. Тоді енергія хвилі напруження в першому півперіоді запишеться

$$W = \frac{A \cdot c \cdot \sigma_{\max}^2}{E} \cdot \left[\frac{\omega_1 \cdot t}{2} - \frac{1}{4} \sin(2\omega_1 t) \right]. \quad (3)$$



Рис.5. Екскаватор ЕО-4321 (1) з гідромолотом ГПМ-300 (2), місце установки розетки тензодатчиків (3)

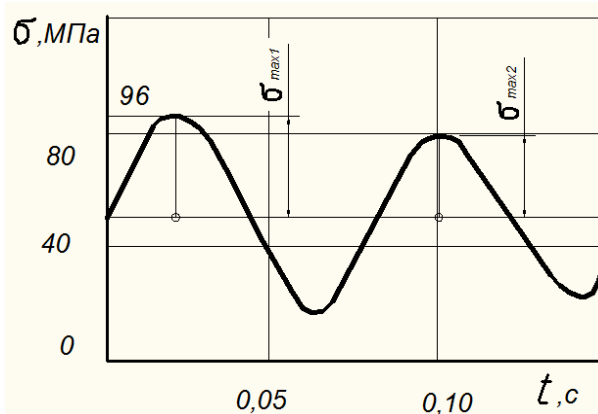


Рис.6. Затухання коливань напружень в стрілі робочого обладнання: $\sigma_{\max 1}$, $\sigma_{\max 2}$ відповідно максимальні амплітуди перших сусідніх півперіодів коливань

Оцінюючи відношення енергій в двох сусідніх максимальних амплітуд синусоїдальної складової коливань (рис.6), відповідно W_1 і W_2 , та враховуючи незмінність параметрів частоти коливань $\omega_1 = const$, отримаємо

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{\sigma_{\max 1}^2}{\sigma_{\max 2}^2}.$$

Враховуючи, що $\frac{\sigma_{\max 1}}{\sigma_{\max 2}} = \Delta$ - декремент затухань, отримаємо залежність $\Delta = \sqrt{\frac{W_1}{W_2}}$.

Для випадку коливань (рис.6) декремент згасання складає 1,2.

При використанні в гідроприводі нового робочого тіла ГЛС [8] прогнозовані значення енергії хвилі в першому півперіоді відповідає значенню енергії інтрузії $W_i = 114,51$ Дж, а в другому – залишковій енергії екструзії $W_e = 37,38$ Дж. Тоді декремент згасання для коливань $\Delta = \sqrt{\frac{W_1}{W_2}} = \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} = 1,74$.

На рис. 7 наведено графіки коливань напружень в стрілі робочого обладнання екскаватора від одиночного імпульсу реакції віддачі гідромолота, відповідно для гідроприводу без ГЛС (крива 1) і з ГЛС (прогнозована крива 2, за методом гармонічної лінеаризації Крилова-Боголюбова).

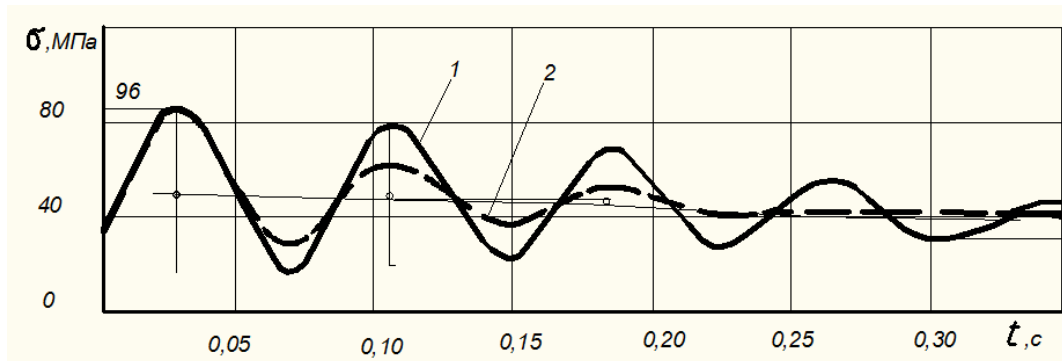


Рис. 7. Криві коливань напружень в стрілі робочого обладнання екскаватора: 1- без застосування ГЛС, 2 - з застосуванням ГЛС в гідроприводі робочого обладнання

Експериментальними дослідженнями за допомогою стенда (рис. 1) встановлений діапазон ефективності ГЛС за частотою 1...15 Гц, за декрементом згасання 1,6...2,1, а для системи амортизації - ефективність за частотою до 22 Гц [4, 6].

Застосування ГЛС зі спроможністю потужної дисипації енергії дозволяє використовувати нові робочі тіла для різноманітних технічних систем: віброзахисні рукоятки відбійних молотків, гідроприводи гірничих машин та механізмів з динамічними виконавчими органами, амортизаційні системи транспортних машин, системи віброзахисту та шумоподавлення двигунів літальних апаратів та інші.

Висновки

Експериментально, за допомогою спеціального стенда з системою комп'ютерного керування і реєстрації, встановлена ефективність застосування в реальному гідроприводі робочих тіл на основі гетерогенних ліофобних систем в умовах навантаження - розвантаження з ступінню розсіюванням енергії понад 90% в одному циклі. Встановлена відповідність квадрата декремента згасання коливань відношенню енергій інтрузії та екструзії ГЛС. Експериментально встановлений діапазон значень декремента згасання в межах 1,6...2,1 з використанням ГЛС в гідроприводі, що значно перевищує значення декремента 1,2, яке характерне для сучасних гідравлічних систем. Робочий частотний діапазон ефективності ГЛС складає 0...22 Гц, що відповідає необхідному частотному діапазону віброзахисних технічних систем.

Отже, експериментально підтверджена ефективність застосування ГЛС для динамічних систем, що забезпечує ефективне використання РК в більшості конструкцій технічних систем промислових підприємств та ВПК України.

Список літератури

1. Сліденко В.М., Шевчук С.П. Стабілізація функціонування гірничої машини з імпульсним виконавчим органом: монографія.-К.: НТУУ "КПІ", 2010.-192с.
2. Eroshenko V.A. Heterogeneous structure for accumulation or dissipation of energy, process to use it and associated devices, International Patent WO 96/18040, 1996
3. Eroshenko V.A. A new paradigm of mechanical energy dissipation. Part 1: theoretical aspects and practical solutions // J. Proc. of mechanical Engineers, Vol. 221. Part D: J. of Automobile Engineering. – 2007. – Vol. 221, № 3. – P. 285–300.
4. Eroshenko V.A., Piatiletov I.I., Coiffard L., Stoudenets V.P. A new paradigm of mechanical energy dissipation. Part 2: experimental investigation and effectiveness of a novel car damper// J. Proc. of Mechanical Engineers. Part D: J. of Automobile Engineering. 2007. Vol. 221. № 3. P. 301–312.c
5. Раймпель Й. Шасси автомобиля: Амортизаторы, шины и колеса/ Пер. с нем. В.П. Агапова; Под ред. О.Д. Златовратского.- М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.

6. Ерошенко В.А., Лазарев Ю.Ф. Реология и динамика репульсивных клатратов/ Прикладная механика и техническая физика. Т. 53, №1. Новосибирск: изд. Сиб.отд. РАН, 2012. – С. 114-131.

7. Шелковников И.Г. Использование энергии удара в процессах бурения. - Л.: Недра, 1997 -159 с.

V. Eroshenko, V. Slidenko

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

HETEROGENEOUS LYOPHOBIC SYSTEMS – THE POWERFUL DISSIPATORS OF ENERGY OSCILLATION IN THE HYDRO-MECHANICAL SYSTEMS

The article presents results of research of influence of the process of the heterogeneous lyophobic systems (HLS) on the process of energy dissipation in hydro-mechanical oscillatory systems.

It was found using the specially created booth multiplier that the energy dissipation level may be close to 90 % in the real hydraulic drive.

The attenuation decrement of the oscillations is in the range 1.6...2.1. The high efficiency of mechanical energy dissipation using the heterogeneous lyophobic systems was confirmed in the frequency range 0 ... 15 Hz.

The rational fields of practical application of HLS for strong mechanical energy dissipation in the various fields of technology were offered.

Key words: energy dissipation, heterogeneous lyophobic systems, repulsive clathrates, attenuation decrement, energy oscillation.

1. Slidenko V.M., Shevchuk S.P. Stabilizacija funkcionuvannia girnichoї maschini z impulsnim vikonavchim organom. – K.: NTUU “KPI”, 2010. – 192 s.

2. Eroshenko V.A. Heterogeneous structure for accumulation or dissipation of energy, process to use it and associated devices, International Patent WO 96/18040, 1996

3. Eroshenko V.A. A new paradigm of mechanical energy dissipation. Part 1: theoretical aspects and practical solutions // J. Proc. of mechanical Engineers, Vol. 221. Part D: J. of Automobile Engineering. – 2007. – Vol. 221, № 3. – P. 285–300.

4. Eroshenko V.A., Piatiletov I.I., Coiffard L., Stoudenets V.P. A new paradigm of mechanical energy dissipation. Part 2: experimental investigation and effectiveness of a novel car damper// J. Proc. of Mechanical Engineers. Part D: J. of Automobile Engineering. 2007. Vol. 221. № 3. P. 301–312.c

5. Raimpel J. Schassi avtomobilia: Amortizatori, schini i kolesa/ Per. s nem. V.P. Agapova; pod red. O.D. Zlatovratskogo. –M.: Maschinostroenie, 1986. – 320 s.

6. Eroshenko V.A., Lazarev J.F. Reologia i dinamika repulsivnich klatratov/ Prikladnaja mehanika i technicheskaja fizika. Т. 53, №1. Novosibirsk: izd. Sib. otd. RAN, 2012. С.114-131.

7. Shelkovnikov I.G. Ispolzovanie energii udara v procesach burenija. – L.: Nedra, 1997 – 159 s.

УДК 620.97

В. А. Ерошенко, д-р техн. наук, профессор

В. М. Слиденко, канд. техн. наук, доцент

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» ГЕТЕРОГЕННЫЕ ЛИОФОБНЫЕ СИСТЕМЫ – МОЩНЫЕ ДИССИПАТОРЫ ЭНЕРГИИ КОЛЕБАНИЙ В ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Представлены результаты исследований влияния функционирования гетерогенных лиофобных систем (ГЛС) на процесс диссипации энергии в гидромеханических колебательных системах.

На специально созданном мультипликаторном стенде установлено, что уровень диссипации энергии колебаний в реальном гидроприводе может быть близким к 90%.

Декремент затухания колебания 1,6...2,1. Подтверждена высокая эффективность рассеяния механической энергии с помощью гетерогенных лиофобных систем в диапазоне частот 0...15 Гц.

Предложены рациональные области практического применения ГЛС для мощного рассеяния механической энергии в разных областях техники.

Предложены рациональные области практического применения ГЛС для мощного рассеивания энергий в разных областях техники

Ключевые слова: диссипация энергии, гетерогенные лиофобные системы, репульсивные клатраты, декремент затухания, энергия колебаний.

Надійшла 15.05.2015

Received 15.05.2015

МОНІТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАНУ НАВЧАЛЬНОГО КОРПУСУ

В статті проведено аналіз просторово-часових розподілів температур приміщень будівлі навчального корпусу з центральним регулюванням опалення під впливом зовнішніх та внутрішніх чинників. Обґрунтовано необхідність групування приміщень за призначенням. Визначено характеристики просторового розподілу середніх температур приміщень за рахунок накопичення та аналізу інформації за достатньо тривалий період експлуатації будівлі. За вимірними даними добової зміни температур контрольних приміщень для кожної групи визначено вплив опалення, сонячної радіації, внутрішніх теплонадходжень.

Ключові слова: температура, температурна карта, термохрон, теплове споживання, комфортні умови.

Вступ

Громадські та житлові будинки є одними з найбільших споживачів енергоресурсів України. Практично 90% будівель нині не відповідають сучасним вимогам енергоефективності. На сьогоднішній день головними проблемами таких будівель є підвищені витрати теплової енергії на опалення та невідповідність внутрішнього мікроклімату приміщень загальноприйнятим нормам комфорту [1]. Від теплового режиму приміщень залежить відчуття теплового комфорту людей, нормальне протікання навчального процесу, стан і працездатність конструкцій будівлі, її обладнання [2,3].

Серед існуючих способів ефективного використання теплової енергії в опаленні будівель спосіб оптимального регулювання температури приміщень є найбільш малозатратним. Потенціал зниження енергозатрат добре відомий для стаціонарного режиму, коли зниження температури на 1 °С дозволяє знизити тепловтрати на 2-5 % [4,5]. Процеси, які формують тепловий режим приміщень, необхідно розглядати в нерозривному зв'язку між собою, оскільки їх взаємний вплив один на одного виявляється досить суттєвим. Використання переривчастого або змінного опалення чи охолодження потребує інформації про динамічні характеристики оболонки та внутрішніх та зовнішніх теплонадходжень як будівлі в цілому, так і окремих приміщень, зон.

Необхідність дослідження теплових режимів будівель забезпечує потреби проектування, експлуатації, реконструкції або модернізації. Основою поглибленого аналізу теплового стану та нестаціонарних енергетичних балансів будівель є математичне моделювання. Традиційні підходи полягають у використанні знань фізичних характеристик будівлі. Альтернативні - у використанні фактичних значень її теплових режимів. Вони дозволяють аналізувати та передбачати різні аспекти поведінки будівлі як енергетичної системи [6, 7]. Основна увага приділяється побудові теоретичних моделей енергетичного споживання будівель, вплив різних факторів на зміну та характеристики розподілу внутрішньої температури в приміщеннях вивчається мало. Хоча моделі на основі фактичних даних являють інтерес для оцінки ефективності впровадження місцевого регулювання, зміни конструктивних особливостей будівлі.

Мета та завдання

Метою роботи є аналіз просторово-часових розподілів температур приміщень будівлі з центральним регулюванням опалення під впливом зовнішніх та внутрішніх чинників. Основною ідеєю роботи при використанні подібного об'єкта є спроба виокремити вплив деяких чинників за рахунок накопичення та аналізу інформації за достатньо тривалий період експлуатації будівлі.

Завдання:

- 1) отримати та проаналізувати розподіл температур у приміщеннях для характерних умов експлуатації під час різних опалювальних сезонів;
- 2) дослідити добову зміну температур для контрольних приміщень.
- 3) Дослідити та визначити основні чинники, що впливають на просторово-часовий розподіл температур приміщень будівлі.

Опис будівлі. Об'єктом дослідження обрано приміщення навчального корпусу університету.

Це - семиповерхова будівля з технічним поверхом, збудована в 1974р., загальна площа - 16030м². В будівлі знаходяться адміністративні приміщення - 8%, навчальні аудиторії - 38,5%, комп'ютерні класи –

5%, науково-дослідні лабораторії - 19%, буфет, підсобні приміщення - 15%, НДІ та навчальні центри - 14,5%. Площа застосування – 4055м² (близько 45% площі зовнішніх стін). Будівля має форму витягнутого прямокутника, зорієнтованого фасадами на північ та південь.

Теплопостачання здійснюється від районних мереж. В більшій частині опалювального періоду теплові мережі не дотримують температурний графік подачі теплоносія, що призводить до зниження температур в приміщеннях будівлі відносно комфортних умов. Комерційний облік теплової енергії здійснюється через лічильник, встановлений на вводі в будівлю. Система опалення - незалежна однотрубна радіаторна (радіатори М-140), з верхнім розведенням по 53 стояках, підключена до теплових мереж через пластинчатий теплообмінник. За умов виключно центрального регулювання та недостатнього рівня опалення в приміщеннях будівлі, крім зниження рівня має місце відчутний нерівномірний розподіл температур, що дозволяє розглядати будівлю в якості об'єкта впливу сукупності різних експлуатаційних факторів на просторово-часові зміни температур приміщень.

Методика досліджень. Дослідження проводилися в наступних напрямках.

1) Збиралися дані по температурах приміщень в робочі години певної доби, які використовувалися для складання температурних карт.

2) В контрольних приміщеннях фіксувалися дані щодо зміни температур в часі.

3) При аналізі просторово-часових розподілів температур приміщень будівлі були використані метеодані щодо температур зовнішнього повітря, напряму та швидкості вітру [8,9], а також дані інтенсивності сонячної радіації, надані відділом теплофізичних основ енергозберігаючих теплотехнологій ІТТФ НАН України.

Температурна карта будівлі – це таблиця значень температур приміщень, отриманих у визначений інтервал часу (наприклад, на протязі робочих годин одного дня). Температурні карти будувалися для кожного поверху по окремих приміщеннях. Інформація збиралась за допомогою безконтактних інфрачервоних пірометрів. Вимірювалися температури внутрішніх та зовнішніх стін, стелі, підлоги, вікна. Середня температура приміщення визначалась як середня температура стін, що не є суміжними з неопалюваними приміщеннями, враховуючи рекомендації [3]. Отримані таким чином температури приміщень добре узгоджуються з вимірами температури повітря приладом VelocityCal, але процедура вимірювань температури повітря займає набагато більше часу. Дані вимірювання проводились періодично протягом 2003 - 2014 рр.

Температурні карти дають середнє значення температури в приміщенні у робочі години, тому для визначення добових коливань температури в певних приміщеннях навчального корпусу були встановлені автономні електронні накопичувачі-реєстратори температури ТЕРМОХРОН DS1921 або DS1922 (контактні температурні реєстри корпусного виконання MicroCAN з автономним живленням від літійової батареї)[10]. Датчики DS 1921 мають дискретність 0,5°C, DS1922 відрізняється поліпшеною дискретністю вимірів температури до 0,0625°C. Температурні датчики були запрограмовані на фіксування значень температур з інтервалом одну годину. Інформація з датчиків зчитувалась за допомогою спеціального програмного забезпечення, зберігалась та оброблялася на комп'ютері. Термохронні датчики в кількості 10 одиниць перевірялися на однаковість показів термостатичним методом.

Похибка визначення температури в приміщеннях за допомогою вищенаведених методів не перевищувала $\pm 0,5$ °C, зміни температури за допомогою DS1922 - 0,1°C.

Основні результати досліджень.

Опис температурних карт та аналіз

Число виміряних температурних точок за весь час вимірювань складає біля 1300 значень. На рис.1 представлено частку охоплення приміщень вимірами. Отримані дані охоплюють понад біля 40% приміщень.

Середня температура повітря в робочі годин в навчальному корпусі становить 15-17°C. На різницю температур приміщень будівлі впливають відмінність у режимах експлуатації, рівні сонячних теплонадходжень, режимах роботи, додаткові теплонадходження, кратність повітрообміну тощо. Тому, враховуючи режими роботи та експлуатації, всі приміщення були поділені на чотири основні групи: адміністративні приміщення, навчальні аудиторії, науково-дослідницькі лабораторії та комп'ютерні класи. В окрему групу були об'єднані допоміжні та технічні приміщення. Діапазон значень внутрішньої температури за групами приміщень має наступний вигляд: адміністративні приміщення - 17-22°C; навчальні класи - 15-18°C; лабораторно-дослідницькі аудиторії -13-16 °C ; комп'ютерні класи - 14-16°C.

Як раніше згадувалось, система опалення навчального корпусу - з верхньою вертикальною розводкою, тому в умовах недостатнього опалення на розподіл температур відчутно впливає номер поверху. З пониженням поверху температура в приміщенні знижується на 0,5°C. Приміщення, розташовані з південної сторони будівлі, порівняно з розташованими на північній стороні отримують значно більший рівень інсоляційних надходжень. Таким чином, температура приміщень розташованих з південної сторони більша на 2-3 °C.

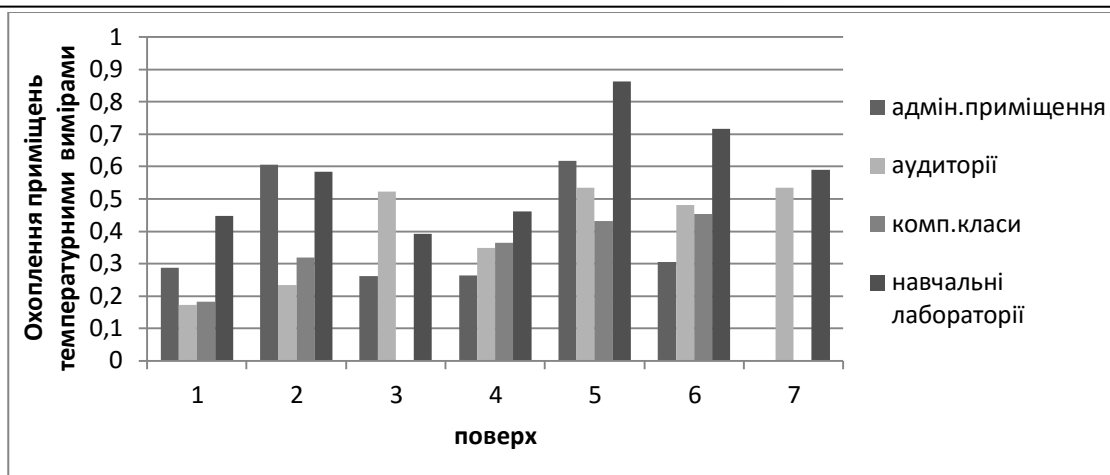


Рис. 1 Охоплення груп приміщень температурними вимірами

За відсутності системи регулювання температурних режимів на зміну температурних умов суттєво впливають погодні фактори. Зазвичай найбільш вагомим фактором, який впливає на тепловий стан будівлі, є зміна зовнішньої температури. Залежність зміни середньої внутрішньої температури будівлі від зовнішньої, отримана з використанням даних температурних карт, представлена рис.2.

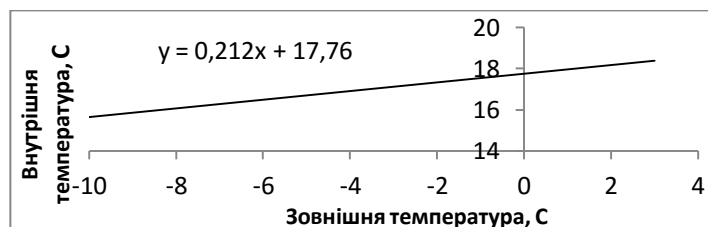


Рис. 2 Зміни внутрішньої температури від зовнішньої в робочі години

Для усунення впливу прямої сонячної радіації розглянуто приміщення, розташовані з північної сторони будівлі. На рис. 3. наведено аналіз близько 700 значень даних температур приміщень з північної сторони при виключенні впливу радіації. Для нормалізації даних розподілу температур на рис. 3 вводимо співвідношення $\frac{t_{i,n}}{t_{\text{сер},n}}$, де $t_{i,n}$ – температура i -го приміщення північної сторони n -й день вимірювання; $t_{\text{сер},n}$ – середня температура всіх приміщень, розташованих з північної сторони в n -й день вимірювань.

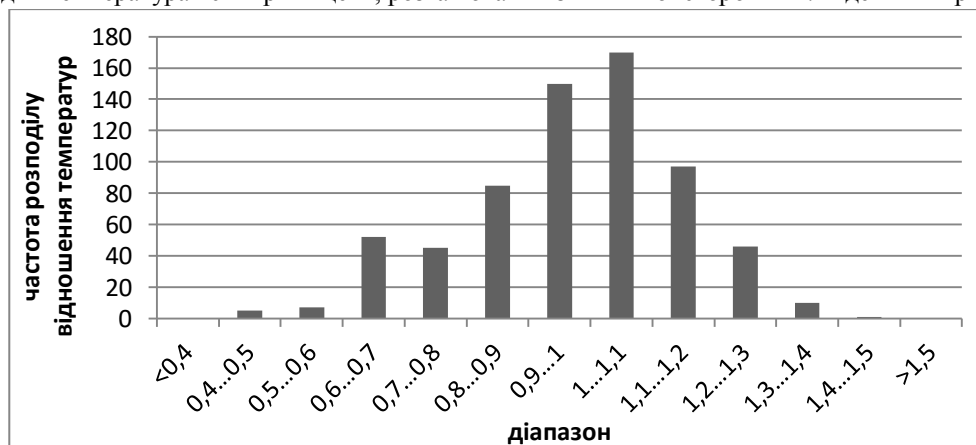


Рис. 3 Розподіл відношення температур приміщень, розташованих з північної сторони будівлі

Відхилення температур приміщень від середніх значень становить до 30%.

Розподіл відхилень температур приміщень від середнього значення аналізувався для всіх приміщень північної сторони (див. рис. 3) та окремо по вищеперахованих групах приміщень. Форма розподілу найбільш близька до нормальної в приміщеннях адміністративного призначення (рис.4), при цьому розкид внутрішніх температур менший та завдяки більшому рівню температур приміщень цієї групи зміщений в сторону зростання.

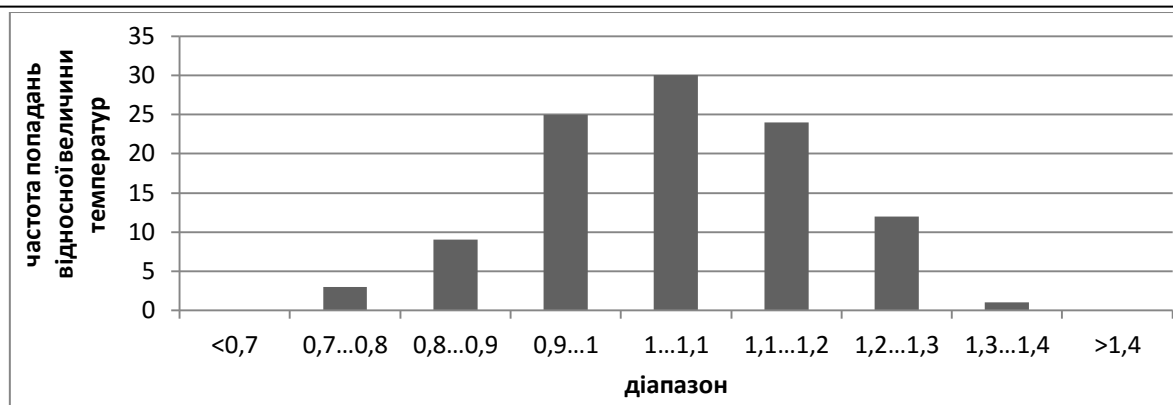


Рис. 4 Розподіл відношення температур для адміністративних приміщень північної сторони будівлі

Відхилення розподілу від нормального закону (див. рис. 3) вносять в основній мірі комп'ютерні та лабораторні класи, а також навчальні аудиторії. В комп'ютерних та лабораторно-навчальних класах розподіл відношення температур відхиляється від середнього в сторону зменшення.

Таким чином, аналіз даних температурних карт, побудованих на базі проведених у робочі години вимірів, дозволив показати вплив зовнішньої температури на середню внутрішню температуру будівлі, залежність температур приміщень від поверху розміщення, обґрунтувати розподіл приміщень на групи та визначити характер відмінності температур приміщень від середніх значень.

Опис добових змін внутрішньої температури та аналіз

З попереднього групування було виділено основні групи приміщень. В кожній групі були виділені контрольні приміщення, розташовані на північній та південній сторонах будівлі, та проводилось цілодобове погодинне фіксування внутрішньої температури. Температурні датчики встановлювались відповідно до рекомендацій [7]. Вимірювання змін температур контрольних приміщень, проведені в жовтні-листопаді 2014 року, дозволили проаналізувати вплив на зміну температури в часі таких чинників, як режим використання приміщень різних груп у робочі та вихідні дні, опалення, сонячні надходження, а також напрям та сила вітру.

Для визначення впливу опалення, на рис. 5,6 наведено приклад розподілу температур в приміщеннях протягом дня, для приблизно однакових погодних умов за відсутності опалення та з опаленням (до початку опалювального сезону та після початку опалення). Окремо розглядалися робочі та вихідні дні. Для усереднення збиралась інформація з двох приміщень одного призначення за 2-4 дні з приблизно однаковими погодними умовами (сонячні дні з середньоденною зовнішньою температурою +6...+8°C).

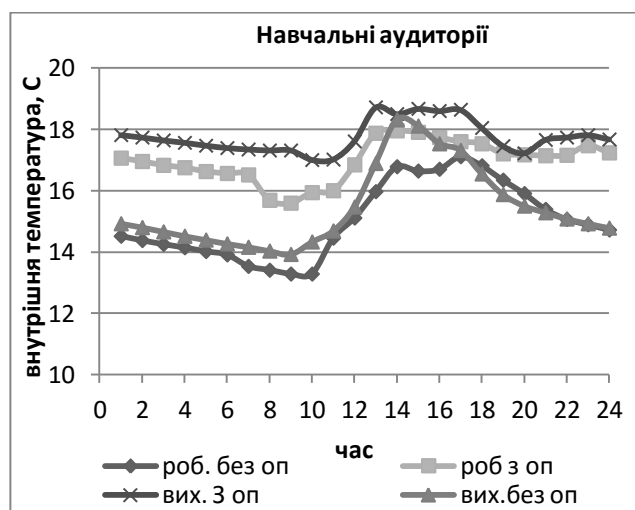


Рис.5 Динаміка зміни температури в навчальних аудиторіях без та з опаленням у вихідні та робочі дні з південної сторони будівлі

За ввімкненої системи опалення температура в приміщеннях змінюється на 3...4°C. У приміщеннях, розташованих з південної сторони будівлі, внутрішня температура підвищується на 4°C в робочі години, що пояснюється додатковими інсоляційними теплонадходженнями. В цілому спостерігається тенденція,

гомо в приміщеннях, розташованих з північної сторони, у вихідні дні температура протягом доби майже не змінюється, а в робочі години має місце збільшення на 1,5...2°C за рахунок додаткових теплонадходжень. В адміністративних приміщеннях в робочі години температура на 1°C більша в порівнянні з навчальними аудиторіями за рахунок метаболічних теплонадходжень та додаткових нагрівачів; у вихідні дні - за відсутності опалення - в цих групах приміщень температура приблизно однакова. Вища температура контрольного адміністративного приміщення за наявності опалення пояснюється кращим опаленням (більша питома площа опалювальних приладів).

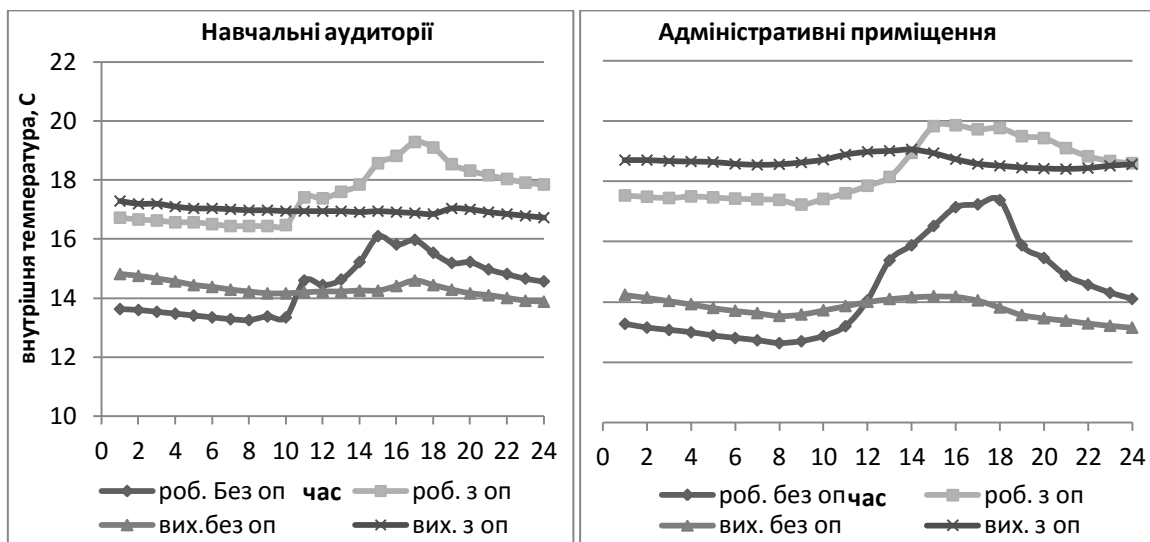


Рис.6 Динаміка зміни внутрішньої температури в групах приміщень без та з опаленням у вихідні та робочі дні з північної сторони будівлі

Для аналізу впливу сонячних теплонадходжень на рис.7 наведено зміни відхилення внутрішньої температури адміністративних приміщень відносно нормативної температури для робочого дня для різних орієнтацій та різних умов хмарності при наявності опалення. В таблиці 1 наведено погодні умови даних днів.

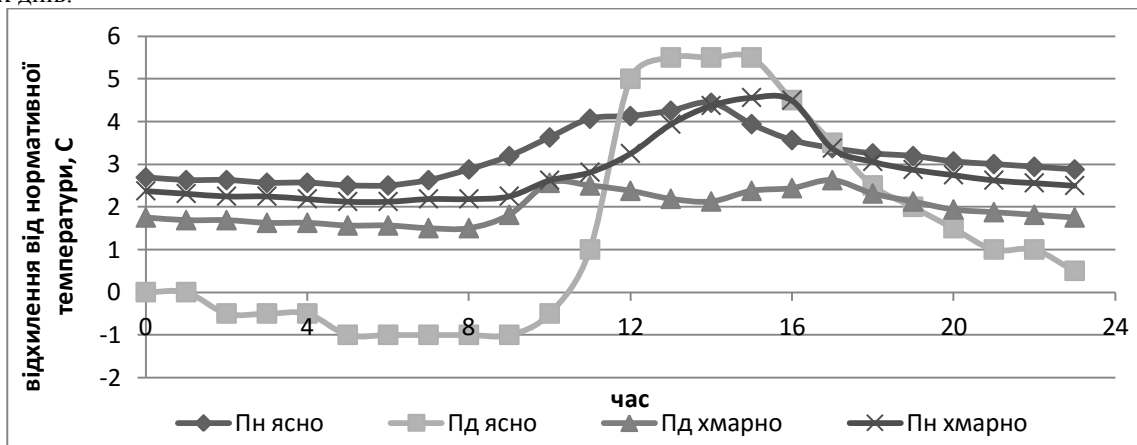


Рис. 7 Відхилення внутрішньої температури в адміністративних приміщеннях від нормативної для робочого дня за різних умов хмарності

Спостерігається температурний пік з південної сторони приміщень в ясний день. Треба також відзначити, що в робочі години даний пік більш протяжний в порівнянні до вихідних днів. Це пояснюється тим, що в робочі дні крім сонячних теплонадходжень присутні додаткові теплонадходження. В нічні години адміністративні приміщення, розташовані з південної сторони будівлі, охолоджуються на 2...3°C більше, ніж за аналогічних умов приміщення північної сторони будівлі, що пояснюється Пд та ПдСх напрямком вітру. В похмурий день характер зміни температури виявився приблизно однаковим, якщо не брати до уваги впливу різного рівня теплонадходжень у робочі години.

В навчальних аудиторіях, як і в адміністративних приміщеннях, у години сонячної активності - схожа поведінка. Мають схожу протяжність піку в робочі години; у вихідні дні пікова температура

триває лише кілька годин. У нічні години розташовані з південної сторони будівлі навчальні аудиторії також охолоджуються суттєвіше.

Таблиця 1

Погодні фактори та їх величина

		Погодні фактори та їх величина																									
Ясний день (30.10.2014 р.)	Вітер	Нап.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
		М/с	1	1	2	2	3	3	4	3	3	3	3	4	4	4	4	6	6	5	5	3	4	3	3	3	
	Сон. рад., Вт/м ²		Пн	0	0	0	0	0	0	0	0	12	16	27	37	42	34	26	17	0,5	0	0	0	0	0	0	
	Пд	0	0	0	0	0	0	0	0	0	141	431	592	674	680	616	504	391	80	0	0	0	0	0	0		
Тзов, С			-1	-3	-2	-1	-1	-1	-1	-2	0	4	8	10	11	12	11	10	4	2	0	0	0	-2	-2	-2	
Похмурий день (13.11.2014р.)	Вітер	Нап.	3х	3х	Пд	3х	3х	Пн3х	Пн3х	Пн3х	3х	Пн3х	Пн3х	Пн3х	Пн3х	Пн3х	3х	3х	Пн3х	Пн3х	Пн3х	Пн3х	Пн3х	Пд	3х	Пн3х	
		М/с	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3	2	1	2	3
	Сон. рад., Вт/м ²		Пн	0	0	0	0	0	0	0	0	2,6	5,7	9,4	11	8,7	4,9	4,8	0,1	0	0	0	0	0	0	0	
	Пд	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,3	5,4	9,7	11	8,8	5,8	4,7	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	
Тзов, С			5	5	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	3	3	3	3	3	2	3	2	-1	-2	-2

Добові зміни зовнішньої температури та аналіз

Зазвичай, для аналізу впливу зовнішніх погодних умов на тепловий стан будівлі використовують метеорологічні дані. Разом з тим, локально виміряні характеристики зовнішніх умов та їх вплив на температурний стан можуть суттєво відрізнятися [11]. Тому поряд з добовими змінами температур контрольних приміщень вимірювались також температури зовнішнього повітря з південної та північної сторони будівлі з використанням термохронних датчиків, захищених від впливу прямих сонячних променів та дощу. На рис.8 наведено приклад зміни зовнішньої температури та сонячної радіації за різних умов хмарності.

За отриманими результатами видно, що температура, виміряна з північної та південної сторони будівлі, за рахунок теплового впливу оболонки вища, ніж зовнішня температура метеоданих, при однаковому характер добової зміни температури в часі. Пік сонячних теплонадходжень та зовнішньої температури мають зміщення в часі, що пов'язане з прогрівом повітря від зовнішньої поверхні стін.

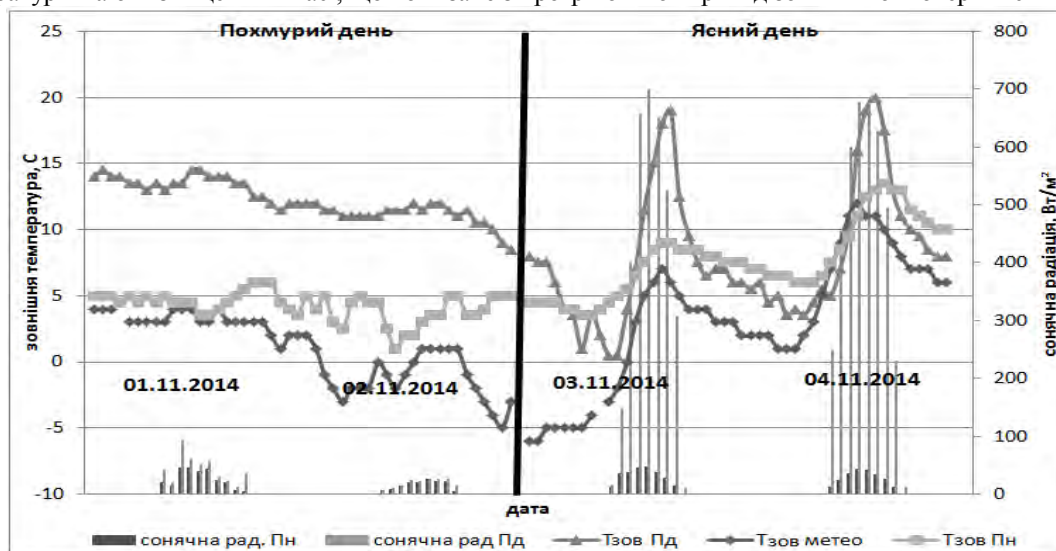


Рис. 8 Динаміка зміни виміряних та метеоданих зовнішньої температури та сонячної радіації

Висновки

1. У результаті проведених досліджень отримано та проаналізовано інформацію щодо розподілу середніх температур приміщень, за певні періоди протягом 2003-2014 рр. Визначено кількісні значення зміни діапазону та рівня відмінностей температур приміщень під впливом рівня опалення, режиму експлуатації, погодних умов для будівлі в цілому та для окремих груп приміщень, за призначенням. Середня температура повітря в робочі годин у навчальному корпусі коливалась в межах 15-17°C, а по групах приміщень: адміністративні - 17-22°C; навчальні - 15-18°C; лабораторно-дослідницькі -13-16°C ; комп'ютерні класи - 14-16°C. З пониженням поверху середня температура розташованих на них приміщень знижується на 0,5°C.

2. За рахунок аналізу добової зміни температур контрольних приміщень для кожної групи визначено сукупний вплив опалення, сонячної радіації, внутрішніх теплонадходжень на середній рівень та коливання в часі температур приміщень. Відхилення середньої температури в робочі години від середніх добових значень спостерігалось в межах 0,5...2,5°C та по максимуму -до 6°C. В навчальних аудиторіях та в адміністративних приміщеннях в години сонячної активності має місце схожа поведінка добових коливань внутрішньої температури, але протяжність зміни температури в робочі години значно більша (4-5 годин) у порівнянні з вихідними днями, тому температурний пік більш гострий.

Отримані результати дозволили визначити основні фактори впливу на зміну внутрішньої температури приміщення: сонячна радіація - 2...4°C; опалення - 2...3°C; режим роботи (теплонадходження від людей) - 1,5...2°C; додаткові обігрівачі - 2...3°C.

3. Локально виміряна зовнішня температура повітря з південної та північної сторони будівлі вища від зовнішньої температури отриманої з метеоданих, що може впливати на фактичні енергетичні баланси будівлі за виміряними даними.

Отриманні фактичні данні розподілу значень середніх температур приміщень будівлі можуть слугувати для розробки та тестування математичних моделей теплового стану будівель.

Список літератури

1. Басок Б.И. Особенности теплоснабжения административных зданий в отопительный период / Б.И. Басок, Б.В. Давиденко, С.М. Гончарук, О.Н.Лысенко, А.А. Лунина, А.И. Тесля, А.Н. Недбайло, М.В. Ткаченко// *Керамика: наука и жизни* - 2011. - №4(14). - С. 59-68.
2. Дешко В.И. Моделирование теплового состояния помещений при измерении режимов параметров отопления / В.И. Дешко, М.М. Шовкалюк, А.В. Ленькин // *Промышленная теплотехника*. Т.31 - 2009. - №6. - С. 75-80.
3. Дешко В.И. Числове моделювання як метод дослідження теплових режимів приміщення / В.И. Дешко, М.М. Шовкалюк, Ю.В. Лохманець, Ю.Р. Куран // *Нова тема*. - №4. - 2008. - С. 26-30.
4. Круковский П.Г. Возможности и проблемы применения способа экономии энергии путем регулирования температуры помещений / П.Г. Круковский, М.А. Метель, О.Ю. Тадля// *Промышленная теплотехника*. - 2009. - №7. - С. 24.
5. Грушкова А.В.К вопросам о проблеме обеспечения качества микроклимата в жилых зданиях /А.В. Грушкова, Б.М. Красовський, Т.Н. Белоглазова // *Известия вузов. Строительство*. - 2002. - №10. - С. 85-86.
6. Fangting Song, Yi Jiang, Anne Le Mouel, Jean-Jacques Roux Development of a datamodel for consumption analysis and prediction of large-scale commercial building. *Building Simulation 2007*, p. 1601-1609.
7. D. Popescu, F. Ungureanu, E. Serban *Simulation of Consumption in District Heating Systems*. ENVIRONMENTAL PROBLEMS and DEVELOPMENT. p. 50-55.
8. Сайт метеорологічних даних: <http://meteo.ua>
9. Сайт метеорологічних даних: <http://tp5.ua>
10. <http://www.elin.ru/Thermochron/>
11. Кордюков М.И. Особенности процессов теплообмена рекуперативного мембранного теплообменника "воздух-воздух" в летний период / М.И. Кордюков, В.И. Дешко, И.О. Суходуб // *Холодильная техника и технология*. - 2014. - №1 (147). - С. 24-31.

V. Deshko, I. Bilous

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

MONITORING OF TEMPERATURE OF EDUCATIONAL FACILITY

The article analyzes the spatial and temporal distributions of the temperature of the building academic building with central heating control by external and internal factors. The necessity of grouping the premises for the purpose. Characteristics of spatial distribution of average temperatures premises by collecting and analyzing information for quite a long period of the building. The measured data of daily changes in temperature control areas for each group the influence heating, solar radiation, internal heat proceeds.

Keywords: temperature, temporal map, termohron, heat consumption, comfortable.

1. Basok B.I. Features heating office buildings in the heating period / B.I.Basok, BV Davidenko, S.M. Goncharuk, O.N.Lysenko, A.A. Lunin, A.I. Tesla, A.N. Nedbaylo, M.V. Tkachenko // *Ceramics: Science and life* - 2011. - №4 (14). - S. 59-68.
2. Deshko V.I. Modelling of the thermal state of the premises in the measurement of parameters of heating modes / V.I. Deshko, M.M. Shovkalyuk, A.V. Lenkin // *Industrial Heat Engineering*. T.31 - 2009.- №6. - S. 75-80.
3. Deshko V.I. Numerical modeling as a method of investigation of thermal regimes room / V.I. Deshko, M.M. Shovkaliuk, Y.V. Lohmanets, Y.R. Kuran // *new topic*. - №4. - 2008. - P. 26-30.
4. Krukovskiy P.G. Opportunities and challenges of the method to save energy by adjusting the temperature of the premises / P.G. Krukovskiy, M.A. Snowstorm, O.J. Tadla // *Industrial Heat Engineering*. - 2009. - №7. - S. 24.
5. Grushkova A.V. For questions about the issue of quality assurance of the microclimate in residential buildings / A.V.Grushkova, B.M.Krasovsky, T.N. Beloglazova // *Proceedings of the universities. Building*. - 2002. - №10. - S. 85-86.
6. FangtingSong, YiJiang, AnneLeMouel, Jean-Jacques Roux. Developmentof a datamodel for consumption analys is and prediction of larse-scale commercial building. *Building Simulation 2007*, p. 1601-1609.
7. D. Popescu, F. Ungureanu, E. Serban Simulationof Consumptionin District Heating Systems. *ENVIRONMENTAL PROBLEMS and DEVELOPMENT*. p. 50-55.
8. Website weather data: <http://meteo.ua>
9. Website weather data: <http://rp5.ua>
10. <http://www.elin.ru/Thermochron/>
11. Kordyukov M.I. Features of processes of heat and mass transfer membrane regenerative heat exchanger "air-air" in summer / M.I. Kordyukov, V.I. Deshko, I.O. Sukhodub // *Refrigeration and technology*. - 2014. - №1 (147). - S. 24-31.

УДК 620.91:697.1

В.И. Дешко, д-р техн. наук, профессор; **И.Ю. Белоус**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ УЧЕБНОГО КОРПУСА

В статье проведен анализ пространственно-временных распределений температур помещений здания учебного корпуса с центральной регулировкой отопления под влиянием внешних и внутренних факторов. Обоснована необходимость группировки помещений по назначению. Определены характеристики пространственного распределения средних температур помещений за счет накопления и анализа информации за достаточно длительный период эксплуатации здания. По измеренным данным суточного изменения температур контрольных помещений для каждой группы определено влияние отопления, солнечной радиации, внутренних теплопоступлений.

Ключевые слова: температура, температурная карта, термохрон, тепловое потребление, комфортные условия.

Надійшла 13.05.2015

Received 13.05.2015

В. Е. Костюк, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Е. И. Кирилаш

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»

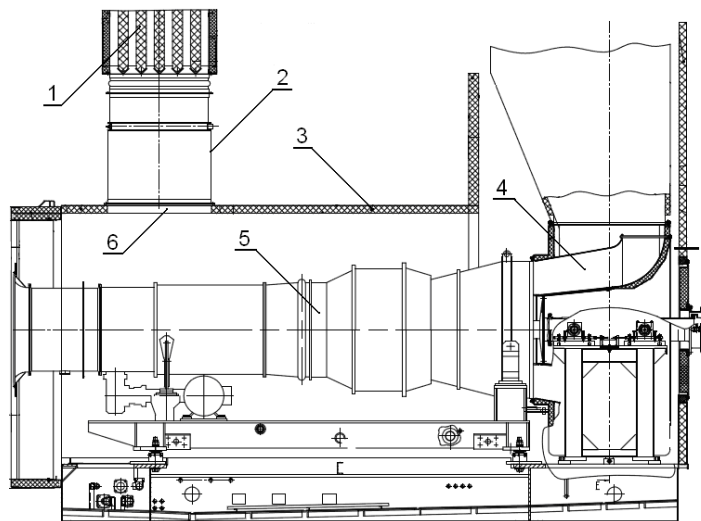
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СИЛОВОГО БЛОКА ТУРБОКОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА ПРИ НАЛИЧИИ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ГОРЯЧИХ УЗЛОВ

Рассмотрены некоторые проблемы обеспечения пожаровзрывобезопасности и приемлемого теплового состояния оборудования силовых блоков турбокомпрессорных агрегатов. Методами вычислительной аэрогидродинамики исследовано тепловое состояние оборудования силового блока при наличии и при отсутствии внешней тепловой изоляции корпуса конвертированного газотурбинного двигателя. Толщины теплоизоляционных матов, размещаемых на различных участках корпуса двигателя, рассчитывались, исходя из температуры их поверхности, максимально допустимой по условиям пожаровзрывобезопасности. Результаты показали, что покрытие корпуса двигателя тепловой изоляцией приведет к значительному снижению температур его наружной поверхности и малоразмерного оборудования силового блока при небольшом уменьшении коэффициента полезного действия турбины и мощности двигателя, из-за дополнительного теплового расширения корпуса. Целесообразность применения внешней тепловой изоляции корпусов конвертированных двигателей, работающих в укрытии силовых блоков турбокомпрессорных агрегатов, требует дополнительного технико-экономического обоснования.

Ключевые слова: турбокомпрессорный агрегат, силовой блок, газотурбинный двигатель, пожаровзрывобезопасность, тепловое состояние, тепловая изоляция, численное исследование

1. Введение

На современных блочно-комплектных компрессорных станциях газовой и нефтяной промышленности применяются турбокомпрессорные агрегаты (ТКА) с конвертированными авиационными или судовыми газотурбинными двигателями (ГТД), входящим в состав силового блока (БС). БС объединяет заключенные в укрытии, часто выполненном в виде шумотеплоизолирующего кожуха, ГТД и газоотводное устройство с системами обеспечения работы ГТД, системой вентиляции укрытия и охлаждения находящегося в нём оборудования и другими вспомогательными системами (рис. 1).



1 – щиты шумоглушения; 2 – воздуховод; 3 – укрытие; 4 – газоотводное устройство; 5 – ГТД;
6 – проём в крыше укрытия

Рис. 1. Конструкция БС

Конвертированные ГТД во время работы сильно нагреваются. Одной из возможных причин пожара (взрыва) на ТКА является воспламенение смеси топливного газа или паров смазочного масла с воздухом, образовавшейся в укрытии ГТД вследствие нарушения целостности газовых или масляных трактов и (или) разрушения элементов конструкций ГТД, при контакте с горячими поверхностями корпуса ГТД, температура которых превышает температуру воспламенения данной смеси. Еще одной проблемой является локальный перегрев и выход из строя размещённых в укрытии навесного и отдельно стоящего оборудования, приборов и коммуникаций вследствие теплового излучения высокотемпературных участков корпуса ГТД. Поэтому обеспечение пожаровзрывобезопасности и приемлемого теплового состояния (ТС) оборудования БС является актуальной задачей, имеющей большое практическое значение. Функционирование оборудования БС обычно обеспечивается механической вентиляцией укрытия. В паровых турбинах и газовых турбинах промышленного типа широко распространена внешняя тепловая изоляция их толстостенных корпусов. Теплоизлучающие поверхности покрывают изоляцией, чтобы уменьшить потери тепла в окружающую среду и тем самым увеличить КПД турбины, защитить персонал от воздействия высоких температур и шума при работе оборудования, обеспечить равномерность прогрева узлов двигателя, что предупреждает их коробление и снижает температурные напряжения, а также обеспечить необходимые противопожарные мероприятия [1, 2]. Традиционно тепловая изоляция корпусов турбин выполняется напылением теплоизоляционной смеси, например, [3]. Однако после каждого выхода из строя такой изоляции требуется её разрушение и полное восстановление, поэтому она применяется в паровых турбинах с большими периодами эксплуатации. Современные теплоизоляционные изделия из базальтовых и муллитокремнеземистых волокон, например, [2 – 5] характеризуются низкой теплопроводностью, высокой температуростойкостью, малой объёмной массой, стойкостью к вибрациям и большим ресурсом. Однако об использовании внешней тепловой изоляции для конвертированных ГТД с тонкостенными корпусами для уменьшения их роли как источников воспламенения и тепловыделений авторам неизвестно. Исследование этого вопроса путём проведения натурных испытаний связано с большими материальными затратами и рисками. Физическое моделирование затруднительно в связи со сложностью объекта и невозможностью обеспечить условия подобия. Простейшие математические модели (ММ) теплового баланса не дают информации о локальных скоростях и температурах охлаждающего воздуха в укрытии, так как они оперируют лишь средними величинами [6]. С развитием методов вычислительной аэрогидродинамики (CFD – Computational Fluid Dynamics) появилась возможность подробного моделирования физических процессов в формулировке краевых задач. Так, авторами работ [7 – 13] выполнены численные исследования отдельных физических явлений в трёхмерной постановке с целью оценки эффективности системы вентиляции укрытия БС [7 – 9], модификаций конструкции БС [10 – 12] и разработки критерия взрывобезопасности [13]. Однако работы по исследованию ТС БС при наличии тепловой изоляции его узлов авторам неизвестны.

Цель и задачи исследования

Цель работы – оценить влияние тепловой изоляции корпуса конвертированного ГТД на ТС оборудования БС ТКА методами CFD.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- сформулирована ММ ТС БС, которая учитывает совокупность значимых аэродинамических и тепловых явлений;
- определены толщины слоёв тепловой изоляции корпуса ГТД, необходимые по условиям пожаровзрывобезопасности и поддержания приемлемого ТС оборудования БС;
- численно исследовано ТС оборудования БС при наличии и при отсутствии тепловой изоляции корпуса ГТД.

Математическая модель

В рамках обобщённой ММ ТС БС [14] была сформулирована и численно решена задача о вязком квазистационарном трёхмерном турбулентном течении двух сред – воздуха и выхлопных газов, – в проточных частях укрытия и газоотводного устройства соответственно, отделённых друг от друга и окружающей среды непроницаемыми стенками, с учётом смешанного конвективного теплообмена, лучистого теплообмена и теплопроводности через стенки с использованием тепловой модели корпуса ГТД [15]. Для замыкания системы уравнений неразрывности, сохранения импульса в форме Навье – Стокса и энергии использована модель турбулентности Лаундера – Сполдинга, учитывающая силы плавучести [16]. Исследовано два варианта корпусов ГТД: существующий металлический (задача 1) и предложенный двухслойный – покрытый, начиная с силового корпуса компрессора высокого давления (КВД), матами из супертонкого базальтового волокна (задача 2).

Исходя из соображений пожаровзрывобезопасности ТКА и приемлемого ТС оборудования БС, принципиально возможно определить необходимую толщину слоёв тепловой изоляции корпуса ГТД при отсутствии его обдува вентиляционным воздухом. Однако постановка такой задачи относительно максимально допустимых температур всего оборудования ТС представляется слишком громоздкой.

Поэтому толщина матов вычислялась только по условиям пожаровзрывобезопасности ТКА в ожидании, что покрытие теплоизоляционными матами наиболее горячих участков корпуса двигателя также обеспечит приемлемые температуры остального оборудования БС. Наибольшая температура поверхности оборудования, безопасная в отношении воспламенения промышленного метана, составляет 450 °С [17]. Тяжёлые жидкие нефтепродукты, в том числе минеральные масла, самовоспламеняются при температурах выше 300 °С [18]. Чтобы исключить наличие в горючей среде источников воспламенения рекомендуется поддерживать температуры поверхностей машин не более 80 % от минимальной температуры самовоспламенения горючего вещества [19]. В таком случае наибольшая температура поверхности корпуса ГТД, безопасная в отношении воспламенения паров смазочного масла, должна составлять 240 °С. По вычисленной толщине тепловой изоляции участков корпуса ГТД, которая обеспечивает температуру его наружной поверхности менее 240 °С, были выбраны теплоизоляционные маты среди изделий производства «Черновицкого завода теплоизоляционных материалов «ROTIS» [20] толщиной 5, 20, 30 и 40 мм (рис. 2).

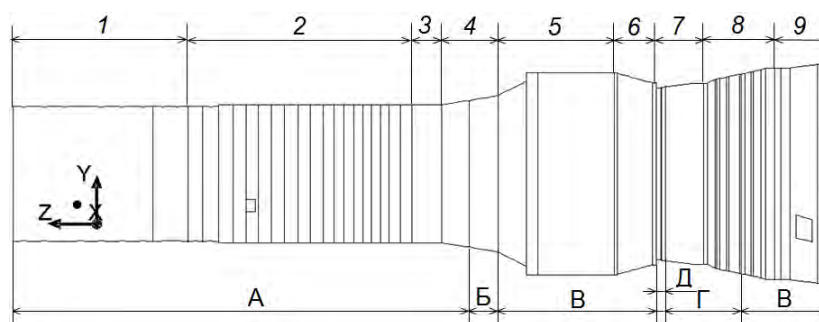


Рис. 2. Характерные участки корпуса ГТД:

1 – проставка; 2 – корпус компрессора низкого давления (КНД); 3 – переходник; 4 – силовой корпус КВД; 5 – кожух камеры сгорания (КС); 6 – силовой корпус турбины высокого давления (ТВД) и турбины низкого давления (ТНД); 7 – опорный венец (ОВ) ТНД; 8 – корпус силовой турбины (СТ); 9 – ОВ СТ; А – металлический корпус ГТД без изоляции; Б – мат прошивной огнезащитный МБПОР-5 толщиной 5 мм; В – мат теплоизоляционный и звукопоглощающий АТМ-10К в обкладке из кремнеземной ткани толщиной 20 мм; Г – мат прошивной МТПБа-КТ-6 в обкладке из кремнеземной ткани толщиной 30 мм; Д – мат прошивной МТПБа-КТ-6 в обкладке из кремнеземной ткани толщиной 40 мм

Численное решение каждой задачи отыскивалось в трёхмерной области пространства, охватывавшей проточные части укрытия и газоотводного устройства без включения в неё малоразмерных деталей – навесного и отдельно стоящего оборудования, контрольно-измерительных приборов, коммуникаций и т.п. Расчётная область покрывалась полиэдрической расчётной сеткой, включавшей около 3 млн. ячеек.

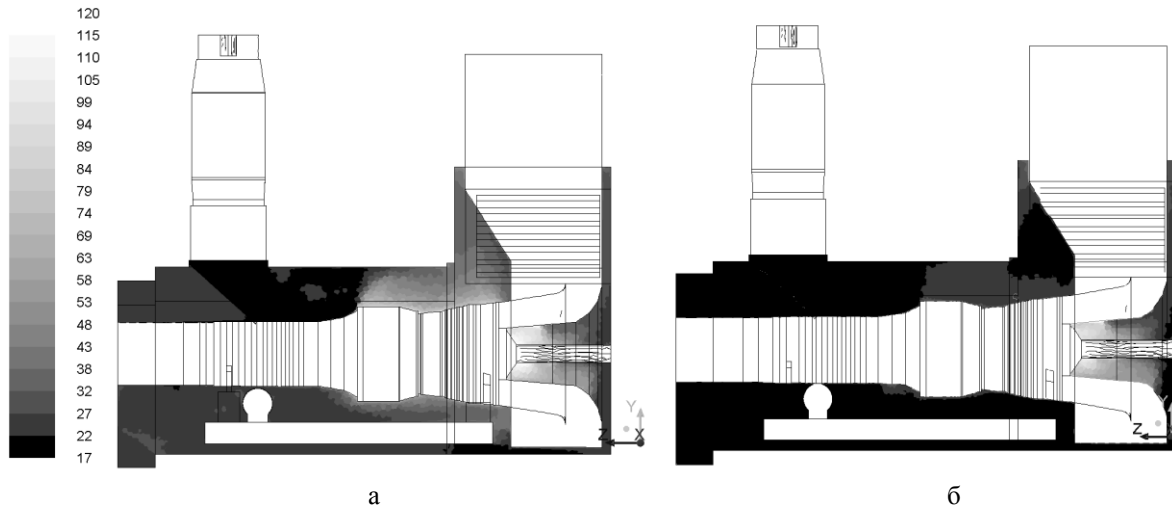
На входах в проточные части укрытия и газоотводного устройства задавались направление течения, массовые расходы, температуры и параметры турбулентности вентиляционного воздуха и выхлопных газов. На выходах из расчётной области задавалось нулевое избыточное статическое давление. На всех поверхностях твёрдых тел, омываемых вязким потоком, применялось граничное условие (ГУ) «прилипания» с использованием эмпирических пристеночных функций в модели турбулентности. Для наружных стенок укрытия наряду с одномерной моделью твёрдотельной теплопроводности использовались термические ГУ третьего рода: температура окружающей среды и коэффициенты теплоотдачи при свободной конвекции между поверхностью укрытия и окружающей средой.

На внутренней поверхности большинства участков корпуса ГТД (лопаточные венцы КНД и СТ, ОВ, полости вокруг КВД) задавались термические ГУ третьего рода: коэффициенты теплоотдачи к внутренней поверхности корпуса ГТД от омывающего её рабочего тела и температуры рабочего тела. На внутренней поверхности кожуха КС применены комбинированные ГУ, предусматривавшие задание дополнительных параметров – температуры и коэффициента излучения жаровой трубы. На участке переходника между корпусами КНД и КВД задавались ГУ второго рода – тепловой поток вследствие теплопроводности вдоль корпуса КВД, не включённого в геометрическую модель корпуса ГТД. Теплопроводность корпуса ГТД описана моделью тонкой теплопроводной оболочки. В модели твёрдотельной теплопроводности корпуса ГТД, стенок укрытия и газоотводного устройства задавались их толщины, коэффициенты теплопроводности и степени черноты. Наличием в стенках «тепловых мостиков», иными тепловыделениями, кроме ГТД, а также утечками циклового воздуха и (или) выхлопных газов пренебрегали.

Интегрирование континуальных уравнений выполнялось методом контрольного объёма. Уравнение переноса излучения решалось методом дискретных ординат.

Результаты численного исследования

Результаты расчётов ТС БС при наличии тепловой изоляции корпуса ГТД и при её отсутствии показаны на рис. 3 – 5.

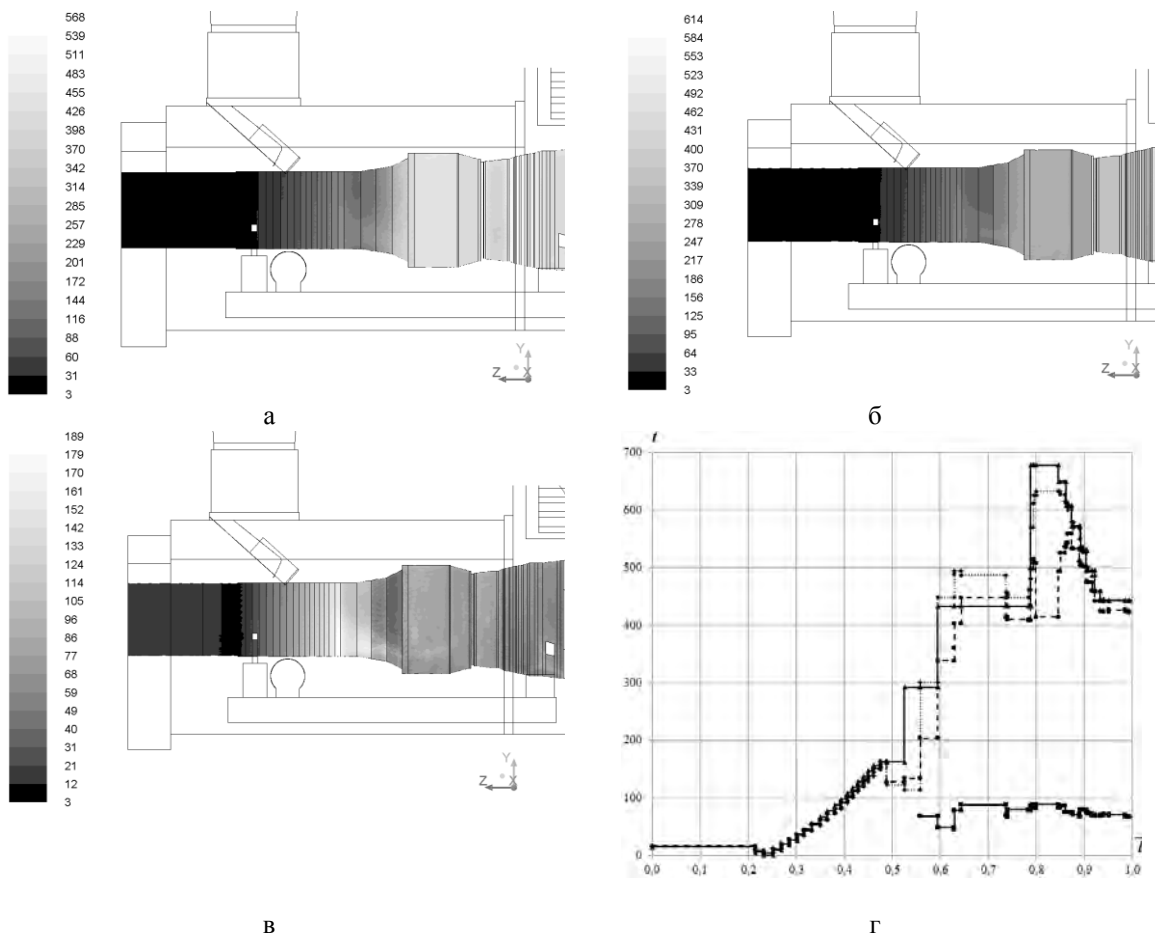


а

б

а – задача 1; б – задача 2

Рис. 3. Температура воздуха (°C) в сечении $x = \text{const}$, проходящем через ось ГТД



в

г

Рис. 4. Температуры (°C) наружной поверхности металлического корпуса ГТД без изоляции (задача 1) (а) и при её наличии (задача 2) (б), наружной поверхности изоляции (задача 2) (в) и средние температуры (°C) по участкам корпуса ГТД (г): —▲— — рабочего тела в проточной части ГТД; —●— — наружной поверхности корпуса ГТД металлического без изоляции (задача 1); —◆— — наружной поверхности металлического корпуса ГТД, покрытого изоляцией (задача 2); —■— — наружной поверхности изоляции (задача 2)

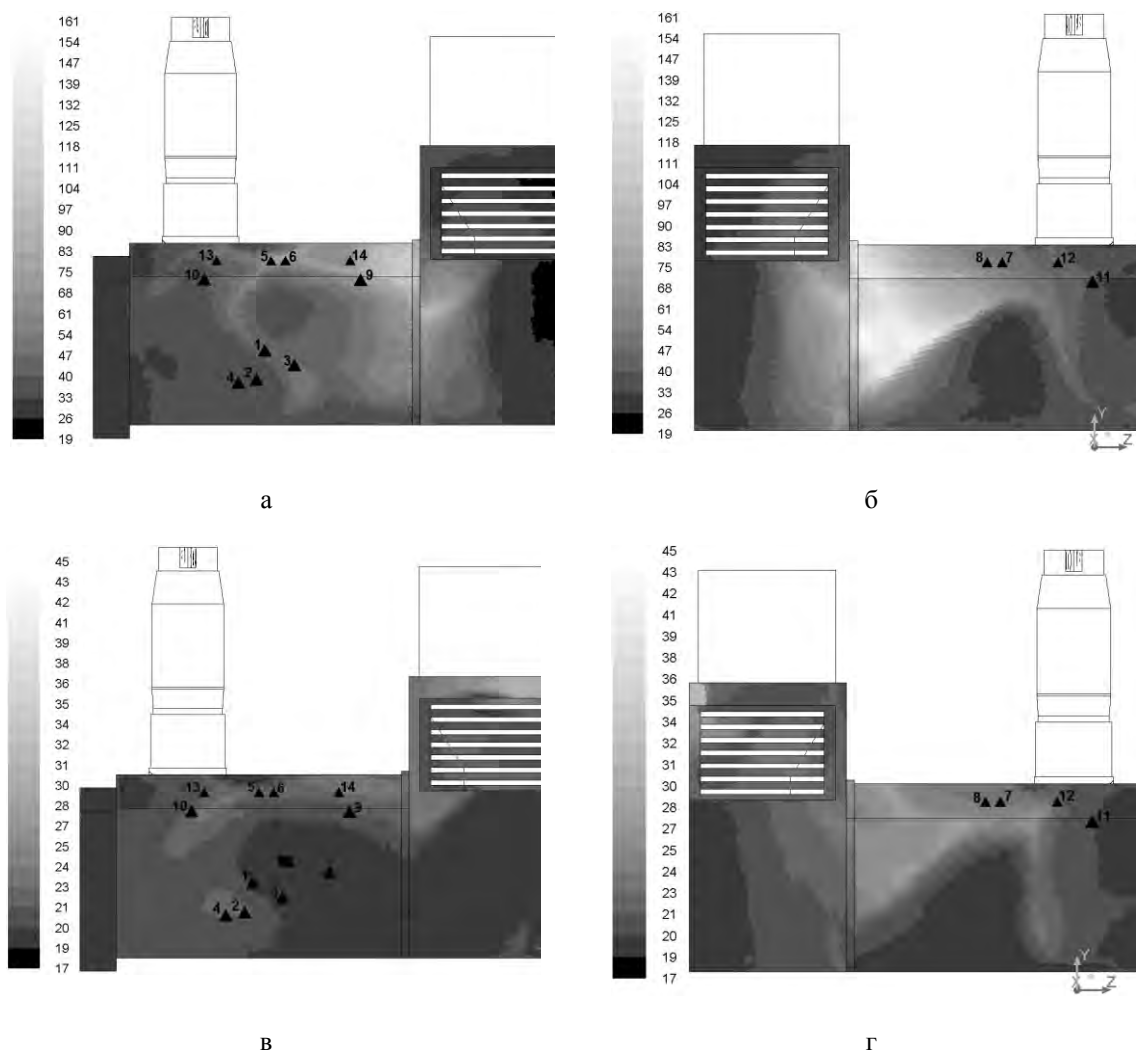


Рис. 5 Температура (°C) внутренних поверхностей стенок БС:

1 – дозатор газа; 2 – стоп-кран; 3 – газоанализатор углеводородных газов; 4 – термопреобразователь сопротивления; 5, 6, 7, 8 – тепловые пожарные извещатели; 9, 10, 11 – выключатели концевые; 12, 13, 14 – светильники; а – задача 1 (вид слева); б – задача 1 (вид справа); в – задача 2 (вид слева); г – задача 2 (вид справа)

Наличие тепловой изоляции корпуса ГТД практически не влияет на структуру и течения воздуха в БС, однако температура воздуха внутри БС снижается. Наибольшие температуры воздуха наблюдаются в застойной зоне около кожуха муфты (см. рис. 3).

Из рис. 4 видно, что при наличии изоляции температура наружной поверхности двухслойного корпуса ГТД существенно уменьшается. Ее максимальная температура на участке между корпусами КНД и КВД, на котором имеется дополнительный тепловой поток вследствие теплопроводности вдоль корпуса КВД, составляет 190 °C. При этом температура расположенной под матами металлического корпуса ГТД увеличивается. Максимальная температура наружной поверхности металлического корпуса ГТД без изоляции составляет около 570 °C на участке корпуса над рабочим колесом первой ступени СТ; при наличии изоляции на этом же участке температура наружной поверхности металлического корпуса возрастает до 610 °C. Максимальная температура наружной поверхности металлического корпуса при наличии изоляции достигает 630 °C на участках корпуса ОВ ТНД и соплового аппарата первой ступени СТ. Температуры внутренней поверхности корпуса ГТД близки к температурам наружной из-за его малой толщины и высокой теплопроводности.

Температуры внутренних стенок БС при наличии изоляции корпуса ГТД также значительно уменьшаются (см. рис. 5). Наибольшие температуры наблюдаются в районе газоотводного устройства.

Для оценки ТС малоразмерного оборудования БС, не включенного в состав расчетной области, использовались температуры ближайших к нему поверхностей стенок БС в точках, показанных

треугольными маркерами на рис. 5. Применение тепловой изоляции корпуса ГТД приводит к уменьшению температур оборудования БС на 15 ... 50 °С. При этом в наибольшей степени снижаются температуры приборов, расположенных в районе высокотемпературных участков турбины ГТД, в частности, температура светильника 14 уменьшается на 45 °С, а выключателя концевого 9 – на 50 °С.

Увеличение температуры расположенного под матами металлического корпуса ГТД вызывает его дополнительное тепловое расширение, вследствие чего увеличиваются радиальные зазоры между рабочими лопатками ротора и внутренней поверхностью корпуса. В частности, при увеличении температуры металлического корпуса над рабочим колесом первой ступени неохлаждаемой СТ с 570 °С до 610 °С радиальные зазоры между ротором и статором СТ увеличиваются приблизительно на 0,3 %. Это приводит к уменьшению её КПД на 0,8% и мощности ГТД на 2,1 %.

Выводы.

Выполненное численное исследование ТС оборудования БС ТКА показало, что наличие тепловой изоляции корпуса конвертированного ГТД значительно снижает температуры наружной поверхности корпуса ГТД и малоразмерного оборудования. Это уменьшает роль ГТД как источника воспламенения и тепловыделения, что обеспечивает потенциальную возможность снижения мощности вентиляторов, подающих воздух внутрь БС. Однако покрытие корпуса ГТД теплоизоляционными матами имеет и негативные последствия. В частности, это приведет к небольшому снижению КПД турбины и мощности ГТД из-за дополнительного теплового расширения корпуса. Кроме того, для обеспечения возможности покрытия корпуса ГТД теплоизоляционными матами понадобится модификация их трубопроводной и кабельной обвязки. Таким образом, вопрос о целесообразности применения внешней тепловой изоляции корпусов конвертированных ГТД, работающих в укрытии БС ТКА, требует дополнительного технико-экономического обоснования.

Список литературы

1. Лебедев-Цветков, Ю. Д. Оборудование и рабочие процессы газотурбинных компрессорных станций / Ю. Д. Лебедев-Цветков. – Л. : Недра, 1966. – 157 с.
2. Воронков, С. Т. Основные направления совершенствования теплозащиты оборудования ТЭС / С. Т. Воронков // Промышленная энергетика. – 2003. – № 5. – С. 19 – 23.
3. Промышленная изоляция ARNOLD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.arnoldgroup.com/3/isolierungen/isolierungen.htm>. – 25.05.2015 p.
4. Теплоизоляционные оболочки iSHELL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gkflagman.com/catalog/npravlenie/?ID=1765.htm>. – 25.05.2015 p.
5. Рудюк, В. Теплоакустическая изоляция для объектов нефтегазового комплекса / В. Рудюк // Нефтегазовая вертикаль. – №13-14. – 2014. – С. 14 – 15.
6. Шляпин, Я. К. Математическое моделирование тепловых режимов отсеков ГПА / Я. К. Шляпин // Газовая промышленность. – 2008. – № 2. – С. 16 – 19.
7. Клочков, А. В. Обеспечение взрывозащиты газотурбинного оборудования / А. В. Клочков, Е. С. Корнилова, А. А. Снитко // Газотурбинные технологии. – 2005. – № 8. – С. 20 – 22.
8. Results and Experience from GE Energy's MS5002E Gas Turbine Testing and Evaluation [Электронный ресурс] / M. D'Ercole, G. Biffaroni, F. Grifoni, F. Zanobini, P. Pecchi. – 80 Min / 700 Mb. – Proceedings of ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6-9, 2005. GT2005-68053. – 9 pp. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
9. Трусов, П. В. Численные исследования процесса вентиляции и теплового состояния шумотеплозащитных кожухов газотурбинных установок с использованием параллельных вычислений / П. В. Трусов, Д. А. Чарнцев // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т. 5, № 2. – С. 208 – 216.
10. Graf, E. Design Improvements Suggested by Computational Flow and Thermal Analyses for the Cooling of Marine Gas Turbine Enclosures [Электронный ресурс] / E. Graf, T. Luce, F. Willet. – 80 Min / 700 Mb. – Proceedings of ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6-9, 2005. GT2005-68574. – 7 pp. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
11. Vahidi, D. Numerical and Experimental Study of Ventilation for Turbine Package Enclosure [Электронный ресурс] / D. Vahidi, H. Bagheri, B. Glezer. – 80 Min / 700 Mb. – Proceedings of ASME TurboExpo 2006. Barcelona, Spain. May 8-11, 2006. GT2006-90960. – 10 p. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
12. Barbato, L. Combined 1D and 3D CFD Approach for GT Ventilation System Analysis [Электронный ресурс] / L. Barbato, M. Blarasin, S. Rosin // Newsletter. – 2008. – № 1. – С. 15 – 18. – Режим доступа: <http://www.enginsoft.it/applications/oilgas/geoilgas.html>. – 25.05.2015 p.

13. Santon, R. C. A New Gas Turbine Enclosure Ventilation Design Criterion [Электронный ресурс] / R. C. Santon, M. J. Ivings, D. K. Pritchard. – 80 Min / 700 Mb. – Proceedings of ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6-9, 2005. GT2005-68725. – 8 pp. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
14. Костюк, В. Е. Обобщённая математическая модель теплового состояния укрытий газотурбинных установок / В. Е. Костюк, Е. И. Кирилаш, А. Л. Кравчук // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2013. – № 1. – С. 22 – 26.
15. Костюк, В. Е. Тепловая модель корпуса газотурбинного двигателя / В. Е. Костюк, Е. И. Кирилаш // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2015. – № 2.
16. Launder, B. E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B. E. Launder, D. B. Spalding. – London : Academic Press, 1972. – 169 p.
17. Бурдюгов, С. И., Захаров Г. Н., Попов В. Л. Безаварийная эксплуатация «горячих» газотурбинных двигателей в составе ангарных ГПА / С. И. Бурдюгов, Г. Н. Захаров, В. Л. Попов // Газовая промышленность. – 2008. – № 4. – С. 57 – 59.
18. Эрих, В. Н. Химия и технология нефти и газа / В. Н. Эрих, М. Г. Расина, М. Г. Рудин. – Л., Химия, 1977. – 424 с.
19. Производственная безопасность. Часть 1. Опасные производственные факторы : учеб. пособие / под ред. С. В. Ефремова ; Политехн. ун-т. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 223 с.
20. Теплоизоляционные изделия [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://rotys.com/mati.htm>. – 25.05.2015 г.

V. Ye. Kostyuk, Ye. I. Kirilash

National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»

NUMERICAL RESEARCH OF THE TURBOCOMPRESSOR UNIT POWER BLOCK EQUIPMENT HEAT STATE IN THE PRESENCE OF HOT COMPONENTS HEAT INSULATION

Some problems of fire-, explosion safety and acceptable heat state support of the turbocompressor unit power block equipment were considered. Research of the power block equipment heat state in the presence and absence of external heat insulation of the converted gas-turbine engine case was performed by computational fluid dynamics methods. Based on the maximum permissible gas-turbine engine case temperature under the conditions of fire- and explosion safety, thickness of heat-insulating mats on the different gas-turbine engine case parts was calculated. Simulation results have shown essential decrease of the temperatures of the gas-turbine engine case external surface and low-sized power block equipment under low reduction of turbine efficiency and gas-turbine engine power due to additional heat expansion of the case. Advisability of external heat insulation application on the cases of converted gas-turbine engines, working in turbocompressor unit power block enclosures, needs additional feasibility study.

Key words: turbocompressor unit, power block, gas-turbine engine, fire- and explosion safety, heat state, heat insulation, numerical research.

1. Lebedev-Tsvetkov, Yu. D. Oborudovanie i rabochie protsessy gazoturbinnnykh kompressornykh stantsiy / Yu. D. Lebedev-Tsvetkov. – L. : Nedra, 1966. – 157 s.
2. Voronkov, S. T. Osnovnye napravleniya sovershenstvovaniya teplozashchity oborudovaniya TES / S. T. Voronkov // Promyshlennaya energetika. – 2003. – № 5. – С. 19 – 23.
3. Promyshlennaya izolyatsiya ARNOLD [Elektronnyy resurs]. – Режим доступа: <http://www.arnoldgroup.com/3/isolierungen/isolierungen.htm>. – 25.05.2015.
4. Teploizolyatsionnye obolochki iSHELL [Elektronnyy resurs]. – Режим доступа: <http://gkflagman.com/catalog/napravlenie/?ID=1765.htm>. – 25.05.2015.
5. Rudyuk, V. Teploakusticheskaya izolyatsiya dlya ob'ektov neftegazovogo kompleksa / V. Rudyuk // Nef-tegazovaya vertikal'. – №13-14. – 2014. – С. 14 – 15.
6. Shlyapin, Ya. K. Matematicheskoe modelirovanie teplovykh rezhimov otsekov GPA / Ya. K. Shlyapin // Gazovaya promyshlennost'. – 2008. – № 2. – С. 16 – 19.
7. Klochkov, A. V. Obespechenie vzryvozhchity gazoturbinnogo oborudovaniya / A. V. Klochkov, E. S. Kornilova, A. A. Snitko // Gazoturbinnye tekhnologii. – 2005. – № 8. – С. 20 – 22.
8. Results and Experience from GE Energy's MS5002E Gas Turbine Testing and Evaluation [Elektronnyy resurs] / M. D'Ercole, G. Biffaroni, F. Grifoni, F. Zanobini, P. Pecchi. – 80 Min / 700 Mb. – Proceedings of ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6-9, 2005. GT2005-68053. – 9 pp. – 1 elektron. opt. disk (CD-ROM).
9. Trusov, P. V. Chislennye issledovaniya protsessa ventilyatsii i teplovogo sostoyaniya shumoteplo-zashchitnykh kozhukhov gazoturbinnnykh ustanovok s ispol'zovaniem parallel'nykh vychisleniy / P. V. Trusov, D. A. Charntsev // Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred. – 2012. – Т. 5, № 2. – С. 208 – 216.

10. Graf, E. Design Improvements Suggested by Computational Flow and Thermal Analyses for the Cooling of Marine Gas Turbine Enclosures [Elektronnyy resurs] / E. Graf, T. Luce, F. Willet. – 80 Min / 700 Mb. – Proceedings of ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6-9, 2005. GT2005-68574. – 7 pp. – 1 elektron. opt. disk (CD-ROM).
11. Vahidi, D. Numerical and Experimental Study of Ventilation for Turbine Package Enclosure [Elektronnyy resurs] / D. Vahidi, H. Bagheri, B. Glezer. – 80 Min / 700 Mb. – Proceedings of ASME TurboExpo 2006. Barcelona, Spain. May 8-11, 2006. GT2006-90960. – 10 p. – 1 elektron. opt. disk (CD-ROM).
12. Barbato, L. Combined 1D and 3D CFD Approach for GT Ventilation System Analysis [Elektronnyy resurs] / L. Barbato, M. Blarasin, S. Rosin // Newsletter. – 2008. – № 1. – S. 15 – 18. – Rezhim dostupa: <http://www.enginsoft.it/applications/oilgas/geoilgas.html>. – 25.05.2015.
13. Santon, R. C. A New Gas Turbine Enclosure Ventilation Design Criterion [Elektronnyy resurs] / R. C. Santon, M. J. Ivings, D. K. Pritchard. – 80 Min / 700 Mb. – Proceedings of ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6-9, 2005. GT2005-68725. – 8 pp. – 1 elektron. opt. disk (CD-ROM).
14. Kostyuk, V. E. Obobshchennaya matematicheskaya model' teplovogo sostoyaniya ukrytiy gazoturbinnyykh ustanovok / V. E. Kostyuk, E. I. Kirilash, A. L. Kravchuk // Integrirovannyye tekhnologii i energosbere-zhenie. – 2013. – № 1. – S. 22 – 26.
15. Kostyuk, V. E. Teplovaya model' korpusa gazoturbinnogo dvigatelya / V. E. Kostyuk, E. I. Kirilash // Integrovani tekhnologii ta energosberezhennya. – 2015. – № 2.
16. Launder, B. E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B. E. Launder, D. B. Spalding. – London : Academic Press, 1972. – 169 p.
17. Burdyugov, S. I., Zakharov G. N., Popov V. L. Bezavariynaya ekspluatatsiya «goryachikh» gazoturbinnyykh dvigateley v sostave angarnyykh GPA / S. I. Burdyugov, G. N. Zakharov, V. L. Popov // Gazovaya promyshlennost'. – 2008. – № 4. – S. 57 – 59.
18. Erikh, V. N. Khimiya i tekhnologiya nefi i gaza / V. N. Erikh, M. G. Rasina, M. G. Rudin. – L., Khimiya, 1977. – 424 s.
19. Proizvodstvennaya bezopasnost'. Chast' 1. Opasnye proizvodstvennyye faktory : ucheb. posobie / pod red. S. V. Efremova ; Politekhn. un-t. – SPb. : Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. – 223 s.
20. Teploizolyatsionnyye izdeliya [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://rotys.com/mati.htm>. – 25.05.2015.

УДК 62-758.34/36:621.438:621.1.016.4.001.57:519.6

В. Є. Костюк, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

О. І. Кирилаш

**Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»
ЧИСЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ СИЛОВОГО БЛОКА
ТУРБОКОМПРЕСОРНОГО АГРЕГАТА
ЗА НАЯВНОСТІ ТЕПЛОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ГАРЯЧИХ ВУЗЛІВ**

Розглянуто деякі проблеми забезпечення пожежо- і вибухобезпечності та прийняттого теплового стану обладнання силових блоків турбокомпресорних агрегатів. Виконано дослідження теплового стану обладнання силового блока за наявності та відсутності зовнішньої теплової ізоляції корпусу конвертованого газотурбінного двигуна методами обчислювальної аерогідродинаміки. Товщини теплоізоляційних матів, що розміщалися на різних ділянках корпусу двигуна, розраховувалися, виходячи з температури їх поверхні, максимально припустимої за умовами пожежовибухобезпеки. Результати показали, що покриття корпусу двигуна тепловою ізоляцією призведе до значного зниження температури його зовнішньої поверхні і малорозмірного обладнання силового блока при невеликому зменшенні коефіцієнта корисної дії турбіни і потужності двигуна внаслідок додаткового теплового розширення корпусу. Доцільність використання зовнішньої теплової ізоляції корпусів конвертованих двигунів, що працюють в укритті силових блоків турбокомпресорних агрегатів, потребує додаткового техніко-економічного обґрунтування.

Ключові слова: турбокомпресорний агрегат, силовий блок, газотурбінний двигун, пожежовибухобезпека, тепловий стан, тепла ізоляція, числове дослідження.

Надійшла 17.05.2015

Received 17.05.2015

В.П. Калинин, канд. техн. наук, доцент, А.В. Мейта, канд. техн. наук
 Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕРВАЛА ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ДРОБИЛЬНО-ПОМОЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

В работе рассматривается процедура определения шага дискретизации измерений, который удовлетворял бы как требованиям к качеству контроля процесса, так и возможностям аппаратных средств. На основе исследований и априорной информации были проведены расчеты длительности интервалов дискретизации и минимальных объемов выборок случайных процессов электрических нагрузок дробильно-помольных комплексов. При заданной точности измерений равной 10 % расчетный период дискретизации для анализа электропотребления объектов дробильно-помольного комплекса составляет 10 минут.

Ключевые слова: дробильно-помольный комплекс, дискретизация, интервал измерения, электропотребление.

Введение. Физический процесс электропотребления является непрерывной функцией времени. Для измерения и дальнейшей обработки информации об электропотреблении с помощью цифровых технических средств необходимо преобразовать исследуемый процесс в дискретную форму. Правильный выбор интервала дискретизации Δt позволяет с достаточной степенью точности восстановить значение исследуемой функции в интервалах между замерами.

Исследование электрических нагрузок в дробильно-помольном комплексе производится для установления закономерностей электропотребления и решения проблемы автоматического управления технологическим процессом электропотребления.

Построение системы автоматического управления технологическими процессами электропотребления связано с необходимостью статистического анализа натуральных графиков электрических нагрузок, полученных за определенный промежуток времени для различных режимов работы комплекса.

Цель и задачи исследования. Основными характеристиками изменения нагрузки являются математическое ожидание и корреляционная функция. Большинство типовых графиков нагрузки характеризуются экспоненциальной (1) либо экспоненциально-косинусной (2) корреляционными функциями [1].

$$K(\tau) = D \cdot e^{-\alpha|\tau|}, \quad (1)$$

$$K(\tau) = D \cdot e^{-\alpha|\tau|} \cdot \cos \omega_0 \cdot \tau. \quad (2)$$

Основными параметрами корреляционных функций являются дисперсия D , коэффициент затухания α и частота ее колебаний ω_0 . Как известно [1], математическое ожидание m_P и корреляционную функцию K_P случайного процесса $P(t)$ определяют по выражениям

$$m_P = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt, \quad (3)$$

$$K_P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{T-\tau} [P(t+\tau) - m_P] \cdot [P(t) - m_P] dt. \quad (4)$$

Вероятностные характеристики - математическое ожидание, дисперсия и др. - определяются точно лишь при бесконечном количестве реализаций при усреднении по ансамблю или на бесконечном отрезке времени при временном усреднении. В действительности приходится ограничиваться конечным количеством реализаций или интервалом времени. Поэтому всякая вычисленная по экспериментальным данным статистическая характеристика отличается от теоретической вероятностной [2]. Непрерывный случайный процесс может быть заменен дискретной последовательностью случайных величин, а его вероятностные характеристики превращаются в последовательность оценок этих величин. Дискретизация по времени широко применяется при исследовании случайных процессов.

Сравнение аналоговых и дискретных систем показывает, что последние на сегодняшний день получили более широкое распространение по причине своей большей надежности и лучших стоимостных показателей [3, 4]. В цифровых системах используются различные методы дискретизации входных сигналов. При выборе способа описания процессов в дискретной форме необходимо определить период дискретизации, который зависит от требуемой точности восстановления процессов по дискретным данным. При организации контроля осредненной за период T мощности необходимо выбирать такой шаг дискретизации, который бы обеспечивал адекватное представление протекающего процесса. Очевидно, наиболее простой способ достижения такой цели – это выбор достаточно малого шага дискретизации. Однако излишняя обработка информации нежелательна с точки зрения функционирования системы.

Таким образом, возникает задача определения такого шага дискретизации, который удовлетворял бы как требованиям к качеству контроля процесса, так и возможностям аппаратных средств. При этом, величина шага дискретизации должна быть выбрана из разумного компромисса между требованиями точности и экономичности.

Результаты исследований. Рассмотрим вопрос оценки необходимой длины реализации случайного процесса, исходя из требуемой точности определения расчетных электрических нагрузок. Погрешность определения расчетного тока нагрузки (величины, используемой для определения потребляемой мощности) обусловленная неточностью исходных данных [5, 6]:

$$\Delta = \frac{m_I}{I_P} \cdot \frac{\partial I_P}{\partial m_p} \cdot \Delta m_p + \frac{D_I}{I_P} \cdot \frac{\partial I_P}{\partial D_I} \cdot \Delta D_P, \quad (5)$$

где Δm_I - относительная погрешность определения математического ожидания тока нагрузки, ΔD_I - относительная погрешность определения дисперсии тока нагрузки.

Полагая в общем виде:

$$I_P = m_I \cdot \sqrt{1 + \nu \cdot V_I^2}, \quad (6)$$

где $V_I = \frac{\sqrt{D_I}}{m_I}$ - коэффициент вариации тока нагрузки; ν - коэффициент, учитывающий инерционность нагрева и ухудшение качества изоляции, получаем

$$\Delta = \Delta m_I + \frac{\nu \cdot V_I^2}{2 \cdot (1 + \nu \cdot V_I^2)} \Delta D. \quad (7)$$

При максимальном значении $\nu = 18$ [2] получаем

$$\Delta = \Delta m_I + \frac{9 \cdot V_I^2}{(1 + 18 \cdot V_I^2)} \Delta D. \quad (8)$$

Погрешности определения математического ожидания и дисперсии случайного процесса с экспоненциально – косинусной корреляционной функцией [7]:

$$\Delta m_I = \frac{V_I}{\sqrt{2 \cdot \alpha \cdot T}}, \quad (9)$$

$$\Delta D_I = \frac{1}{\sqrt{\alpha \cdot T}}. \quad (10)$$

где T – длительность реализации.

Из выражений (8) - (10) определяется необходимая длина реализации случайного процесса в зависимости от требуемой погрешности определения расчетной нагрузки:

$$T = \frac{V_I^2}{\alpha \cdot \Delta^2} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{9 \cdot V_I^2}{1 + 18 \cdot V_I^2} \right). \quad (11)$$

Таким образом, необходимая длина реализации случайного процесса определяется его коэффициентом вариации и коэффициентом затухания корреляционной функции.

Основопологающей теоремой дискретного регулярного представления является теорема Котельникова [8]. Согласно этой теореме, непрерывное значение случайной функции может быть представлено ее дискретными выборками, при условии, что процесс наблюдается бесконечное время ($T \rightarrow \infty$), а также имеет ограниченный спектр частот (от 0 до F_c).

Восстановление исследуемого процесса осуществляется с помощью ряда

$$\lambda(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \lambda(k \cdot \Delta t) \cdot \frac{\sin \varpi_c \cdot (t - k \cdot \Delta t)}{\varpi_c \cdot (t - k \cdot \Delta t)}, \quad (12)$$

где $\lambda(k \cdot \Delta t)$ - мгновенное значение сигнала в моменты $t = k \cdot \Delta t$; ϖ_c - граничная частота частотного спектра исследуемого сигнала; $\Delta t = \frac{\pi}{\varpi_c} = \frac{1}{2 \cdot F_c}$ - интервал дискретизации.

Как правило [9], заданными являются наивысшая частота в спектре исследуемого сигнала, разрешение по частоте, точность вычисляемых спектральных оценок. При этих исходных данных необходимо правильно выбрать следующие параметры: Δt - шаг дискретизации; N - число точек реализации; m - число ординат оценки корреляционной функции, характеризующее интервал корреляции случайного процесса.

Параметры Δt , N , m определяют количество обрабатываемой информации и необходимое время вычисления. Относительную среднеквадратическую ошибку используемой оценки определяет отношение $\frac{m}{N}$. Так для обеспечения точности $\varepsilon = 1\%$ необходимо, чтобы $\frac{N}{m} \geq 10^4$.

Выбор метода записи графиков электрических нагрузок в каждом отдельном случае производится в соответствии с решаемой задачей. Для анализа режимов электропотребления в дробильно-помольных комплексах за длительные циклы времени, связанные с необходимостью получения больших объемов информации, более целесообразен второй метод, так как он обеспечивает удобную с точки зрения обработки информации запись непрерывных графиков нагрузки последовательного ряда усредненных значений.

Проблема получения информации о процессах изменения нагрузок за время длительных периодов, кроме решения задачи выборочного статистического исследования нагрузок, в последние годы обрела ряд новых аспектов, связанных со стремительным развитием энергетики и средств вычислительной техники и внедрением электронных счетчиков. Одним из основных вопросов проведения экспериментальных исследований по определению вероятностных характеристик случайных процессов является выбор длительности измерений, интервалов дискретизации и периода квантования.

Длительность измерений параметров потоков электроэнергии и мощности находится из выражения

$$T_B = \frac{2\tau_k \cdot \nu^2}{\Delta^2}, \quad (13)$$

где τ_k - интервал корреляции, ν - коэффициент вариации случайного процесса, Δ - среднеквадратическая ошибка.

Стационарные случайные процессы электропотребления в промышленности есть эргодическими, если их корреляционная функция уменьшается по модулю с ростом аргумента. Большинство графиков электрических нагрузок основных потребителей промышленных предприятий характеризуются экспоненциальными корреляционными функциями:

$$R(\tau) = e^{-\frac{|\tau|}{T_k}}, \quad (14)$$

где T_k - постоянная времени корреляции.

Интервал корреляции определяется из выражения:

$$\tau_k = \frac{1}{\alpha \cdot (1 + m^2)}, \quad (15)$$

где α - коэффициент угасания корреляционной функции, $m = \frac{\omega_0}{\alpha}$ - кратность коэффициентов корреляционной функции, ω_0 - круговая (собственная) частота корреляционной функции.

Преобразование непрерывной реализации случайного процесса, включает в себя дискретизацию по времени и квантование по амплитуде (уровню). Интервал дискретизации выбирается исходя из требований по точности описания корреляционной функции, а так же скорости записи случайного процесса и особенностей носителей информации.

Интервал дискретизации по времени определяется согласно теореме Котельникова, из выражения:

$$\Delta t \leq \frac{1}{2F_{\max}}, \quad (16)$$

где $F_{\max} = \frac{1}{T_{\min}}$ - максимальная частота процесса, которая соответствует минимальному периоду.

Непрерывная реализация вероятностных характеристик мощностей графиков электропотребления определяется выборками, взятыми с интервалами Δt , в виде последовательных выборок в дискретные моменты времени $K\Delta t$ с интервалом между ними. Объем выборок существенно влияет на точность определения вероятностных характеристик и корреляционных функций графиков электрических нагрузок. Дисперсия оценки математического ожидания мощности $P(t)$ для нормируемой корреляционной функции с учетом дискретизации

$$D[M[P]] = \frac{D[P]^2}{N} \left[1 + 2 \sum_{K=1}^{N-1} \left(1 - \frac{K}{N}\right) \rho(K\Delta t) \right], \quad (17)$$

где N - число значений дискретной последовательности, которая связана с Δt соотношением $\Delta t = T/(N-1)$, K - число интервалов дискретизации, ρ - нормированная корреляционная функция.

Из приведенной формулы (17) следует, что при увеличении объема выборки N , т.е. при бесконечном делении интервала T , величина дисперсии $D[M[P]]$ стремится к значению $D[P]$, что приводит к увеличению дисперсии. Таким образом, существует оптимальное число N_{\min} , которое минимизирует дисперсию оценки математического ожидания с учетом дискретизации. Минимальный объем выборки может быть рассчитан из выражения граничной ошибки выборки:

$$N_{\min} = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{\Delta^2}, \quad (18)$$

где t - коэффициент доверия, зависящий от вероятности определения граничной ошибки, σ^2 - выборочная дисперсия, Δ - граничная ошибка.

На основе исследований и априорной информации были проведены расчеты длительности интервалов дискретизации и минимальных объемов выборок случайных процессов электрических нагрузок дробильно-помольных комплексов.

Согласно [9], приближенное значение Δt может быть определено из следующих формул:

$$N = \frac{3}{4} \cdot \frac{m}{\varepsilon^2}, \quad (19)$$

$$T = N \cdot \Delta t. \quad (20)$$

Откуда, преобразуя, получим выражения для определения интервала дискретизации:

$$\Delta t = \frac{4}{3} \cdot T \cdot \frac{\varepsilon^2}{m}. \quad (21)$$

Для определения периода дискретизации для объектов дробильно-помольного комплекса воспользуемся следующими исходными данными:

Длительность выборки полагаем равной времени работы цеха измельчения в сутки $T = 12$ часов. Достаточной точностью вычислений считаем $\varepsilon = 10\%$. Поскольку объекты комплекса обладают большой инерционностью, то принимаем $m = 1$, поскольку за время периода дискретизации изменений существенно влияющих на работу комплекса не происходит.

Тогда, согласно формуле (21) период дискретизации $\Delta t = 10$ мин.

Минимальные интервалы времени для графиков шаровой загрузки и качества помола, необходимые для построения адекватной модели измельчения, определяются исходя из технологических условий. Согласно требований к производству силикатного кирпича проверка качества измельченной смеси должна осуществляться один раз в час. Несоблюдение данного требования может привести к ухудшению качества изделия и его браковке. Износ мелющих тел за смену составляет величину до нескольких процентов от общей массы шаровой загрузки (в зависимости от условий измельчения и материала шаров). Догрузка мелющих тел для мельниц осуществляется раз в смену при остановке барабана, поэтому рационально будет осуществлять контроль за догрузкой именно с такой частотой.

Технологически установленные интервалы замеров по качеству помола и массе шаровой догрузки превышают период дискретизации принятый для электрических нагрузок, поэтому в качестве базового интервала дискретизации будет принят интервал для определения электрических нагрузок.

Выводы.

При получении экспериментальных зависимостей следует выбирать такой шаг дискретизации измерений, который удовлетворял бы требованиям к качеству контроля процесса и возможностям аппаратных средств. Основной теоремой дискретного регулирования является теорема Котельникова,

согласно которой непрерывное значение случайной функции может быть представлено ее дискретными выборками для бесконечного времени и ограниченного спектра частот. Реальные процессы наблюдаются на конечном интервале времени, что вносит дополнительные погрешности за счет отбрасывания выборок вне принятого интервала. Расчетный период дискретизации для анализа электропотребления объектов дробильно-помольного комплекса составляет 10 минут.

Список литературы.

1. Гайдукевич В. И. Случайные нагрузки силовых электроприводов [Текст]/ Гайдукевич В. И. Титов В. С. - М. Энергоатомиздат, 1983. – 160 с
2. Калинин В.П. Контроль и оперативное управление электропотреблением в промышленных сетях: Дис. канд. техн. наук: 05.14.02. – К., 1983. - 287с.
3. Ильин В.А. Телеуправление и измерение [Текст]/ Ильин В.А.. – М.: Энергия, 1974. – 408 с.
4. Мирский Г. Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения [Текст]/ Мирский Г. Я.. - М. Энергоатомиздат, 1982.
5. Саенко Ю. Л. Разработка уточненных методов выбора токоведущих частей и трансформаторов при резкопеременных нагрузках. Дис. канд. техн. наук.- Киев, 1986.
6. Жежеленко И.В. Оценка времени нагрева проводников изменяющимся во времени током/ Жежеленко И.В. Саенко Ю.Л. // Известия вузов. Сер. Энергетика. 1983. № 8. - С. 3 – 8.
7. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости [Текст]/ Котельников В.А.. – М.: Госэнергоиздат, 1956.-151 с.
8. Харкевич А.А. О теореме Котельникова/ Харкевич А.А.//Радиотехника, - 1956, т.13, № 8.
9. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента [Текст]/ Асатурян В.И. – М.: Радио и связь, 1983.-248 с.

V. Kalinchyk, O. Meyta

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”

DETERMINATION OF SAMPLING INTERVAL DURING ELECTRICITY CONSUMPTION MODES STUDIES FOR CRUSHING-GRINDING COMPLEX UNITS

The paper considers a procedure for sampling interval determination to fulfill both requirements for process control quality and hardware features. Based on studies and prior information sampling interval duration was calculated. The calculations for minimal sample size for stochastic processes of electrical loads for crushing-grinding complex. For desired measurements accuracy of 10 % the calculated sampling interval for analysis of electricity consumption for crushing-grinding complex units is 10 minutes.

Key words: crushing-grinding complex, discretization, sampling interval, electricity consumption.

1. Gaidukevych V.I. Stochastic loads of power-by-wires [Text]/ Gaidukevych V.I., Titov V.S. – М.: Energoatomizdat, 1983. – 160 p.
2. Kalinchyk V.P. Control and operational management of electrical consumption for industrial networks: PhD dissertation: 05.14.02 – К., 1983. – 287 p.
3. Illin V.A. Remote control and measurements [Text]/ Illin V.A. – М.: “Energiia”, 1974. – 408 p.
4. Mirskiy G.Y. Characteristics of stochastic interrelation and their measurements [Text]/ Mirskiy G.Y. – М.: “Energoatomizdat”, 1982.
5. Saenko Y.L. Development of qualified methods for conductive parts and transformers selection at abruptly variable loads. PhD dissertation. – Kyiv, 1986.
6. Zhezhelenko I.V. Estimation of heating period for conductors changing in time current / Zhexhelenko I.V., Saenko Y.L. // HEI bulletin. Ser. “Energetika”. 1983. #8. – p. 3-8.
7. Kotelnikov V.A. Theory of potential immunity [Text] / Kotelnikov V.A. – М.: “Gosenergoizdat”, 1956. – 151 p.
8. Kharkevich A.A. on Kotelnikov’s theory / Kharkevich A.A. // “Radiotekhnika”, - 1956, v.13, #8.
9. Asaturian V. I. Experimental design theory [Text] / Asaturian V.I. – М.: “Radio and connection”, 1983 – 248 p.

Надійшла 19.04.2015

Received 19.04.2015

ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ КІНЦЕВИХ СПОЖИВАЧІВ В РДДБР

В статті досліджено цілі, завдання та методи середньострокового прогнозування електричного навантаження кінцевих споживачів. Розроблено індивідуальну прогнозну модель електричного навантаження досліджуваного кінцевого споживача, з урахуванням виробничих, технологічних та зовнішніх факторів, які впливають на режими електроспоживання. На підставі результатів досліджень зроблено висновок, що врахування у прогнозній моделі ряду факторів технологічного та виробничого характеру суттєво покращує якість прогнозування. Досліджено чинники, які мають бути враховані під час побудови індивідуальних прогнозних моделей електричного навантаження кінцевих споживачів у рамках вирішення завдань середньострокового прогнозування попиту на електроенергію в РДДБР.

Ключові слова: РДДБР, прогнозування електричного навантаження, кластеризація, експоненціальне згладжування.

Вступ.

Загальновідомо, що найбільш заощадливий режим вироблення електроенергії в об'єднаній електроенергетичній системі (ОЕС) України, яка ґрунтується переважно на генерувальних потужностях атомних (АЕС) і теплових електричних станцій (ТЕС), досягається за умови її рівномірного споживання в часі [1]. За незмінного навантаження найкращим чином використовуються технічні особливості електрогенерувального устаткування базових електричних станцій, забезпечуючи при цьому найзаощадніше використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) і найнижчий рівень шкідливих викидів до оточуючого середовища [2]. І така тенденція лише посилюється, зважаючи на збільшення наприкінці 2014 року частки електроенергії, що виробляється на АЕС, майже до 60% в загальному балансі енергоринку України [3].

Якщо ж забезпечити рівномірне споживання електроенергії з об'єктивних причин неможливо, то, за нерівномірного електричного навантаження, найбільшої економії можна досягти за умови точного виконання попередньо узгоджених режимів вироблення й споживання електричної енергії. Економічний ефект у цьому випадку досягається, в першу чергу, за рахунок оптимізації структури й обсягів генерувальних потужностей, які залучаються для покриття попиту на електричну енергію, і скорочення потужностей, що резервуються в ОЕС для покриття ймовірних відхилень електричного навантаження від узгоджених рівнів. Саме на таких принципах базується ринок двохсторонніх договорів і балансуєчий ринок (РДДБР), який сьогодні запроваджується в Україні.

Повномасштабний РДДБР охоплює кілька ринків [4]:

- ринок двохсторонніх договорів (РДД), де продавці й покупці укладають контракти на продаж/купівлю електроенергії на довгострокові періоди (місяць, рік тощо);
- ринок «на добу наперед» (РДН), де уточнюються графіки виробітку/споживання електроенергії наступної доби;
- балансуєчий ринок (БР), де в реальному часі узгоджуються поточні рівні попиту й пропозиції на електричну потужність (електроенергію);
- ринок допоміжних послуг (РДП), де системний оператор надає допоміжні послуги з метою забезпечення сталості і надійної роботи ОЕС України та нормованої якості електричної енергії.

Довгостроковий прогнозований попит на електроенергію покривається в РДД і має базуватися на глибокому аналізі динаміки споживання електричної енергії за попередні періоди. РДН застосовується для уточнення очікуваного попиту на електричну потужність (електроенергію) наступної доби з розподілом за визначеними в РДДБР часовими інтервалами з метою своєчасного залучення необхідних для його покриття електрогенерувальних потужностей і має базуватися на середньострокових («на добу наперед») прогнозах параметрів режимів електроспоживання. В БР системний оператор (СО) контролює поточні значення параметрів виробітку й використання електричної потужності (електроенергії) суб'єктами РДДБР – сторонами договору в реальному часі та координує процеси виробництва й споживання електричної електроенергії, а також надає суб'єктам РДДБР допоміжні послуги для забезпечення безперебійного постачання електричної енергії нормованої якості, зокрема, закупаючи їх

у постачальників допоміжних послуг в РДП. Таким чином СО має можливість балансувати роботу ОЕС України в реальному часі [5].

Тут доречно зауважити, що майже всі інструменти керування попитом на електричну потужність (електроенергію) за нормальних режимів функціонування ОЕС знаходяться у кінцевих споживачів. Електричні станції при цьому змушені «слідувати» за споживачами, реагуючи на змінення їхнього попиту. А беручи до уваги, що технічні можливості генерувального устаткування щодо маневрування електричною потужністю часто-густо обмежені (і до того ж в Україні традиційно спостерігається дефіцит маневрених потужностей [6]), ефективність запровадження в Україні РДДБР напряду залежатиме від щільності взаємодії операторів РДДБР (а саме оператора РДН /ОРДН/ і СО) з кінцевими споживачами, в першу чергу через залучення останніх до керування попитом на електричну потужність (електроенергію) в РДДБР.

Кваліфіковані кінцеві споживачі спроможні забезпечити узгоджене споживання електричної енергії, а також стати постачальниками широкого спектру допоміжних послуг, від маневрування навантаженням через оперативне керування власними режимами електроспоживання, зокрема з метою балансування попиту і пропозицій в РДДБР, до забезпечення енергоефективних режимів електроспоживання, впровадження енергозберігаючих технологій й обладнання тощо. Варто лише створити сприятливі умови, за яких кваліфіковані кінцеві споживачі залучалися б до керування власним попитом на електричну потужність (електроенергію) на економічних засадах.

Базовим інструментом формування інформаційного забезпечення завдань керування попитом на електричну потужність (електроенергію) в РДДБР мають стати сучасні повномасштабні автоматизовані системи контролю, обліку та керування енерговикористанням (АСКОЕ) [7], які ґрунтуються на передових інформаційних технологіях і спеціалізованому математичному забезпеченні. Зокрема, в РДДБР надзвичайної важливості набувають методи прогнозування електричного навантаження (електроспоживання) на середньострокові («на добу наперед») та короткострокові (до 60 хвилин) періоди. Завдання середньострокового прогнозування мають вирішуватися під час узгодження обсягів електроспоживання в РДН, а короткострокове прогнозування застосовується, в першу чергу, для оперативного керування попитом на електричну потужність (електроенергію) в БР [7]. Підвищення точності та достовірності прогнозних оцінок сприятиме підвищенню вірогідності їхнього виконання (чим якісніший прогноз – тим легше його виконати), що врешті решт має забезпечити заощадження ПЕР і скорочення шкідливих викидів.

Результати попередніх досліджень [8-10] доводять, що задачу середньострокового прогнозування в РДДБР доцільно розв'язувати шляхом удосконалення математичних моделей та методів прогнозування із застосуванням кластеризації та врахування впливу на режими електроспоживання кінцевих споживачів ряду факторів, зокрема виробничого і технологічного характеру. Слід зауважити, що у більшості опублікованих робіт, присвячених проблемам прогнозування електричного навантаження, зокрема в [12], практично відсутня інформація щодо врахування при розв'язанні завдань прогнозування надзвичайно важливих параметрів виробничих процесів кінцевих споживачів. Під час прогнозування, зокрема, не враховуються планові ремонти електротехнічного устаткування, зміни у налаштуваннях технологічних ліній, а також коливання обсягів виробництва на інтервалі передісторії. Разом з тим, такі коливання спричиняють змінення тенденцій часових рядів значень електричного навантаження кінцевих споживачів. Проведені дослідження доводять, що неврахування вищезазначених факторів, а також результатів стохастичного керування режимами електроспоживання на інтервалі передісторії, що здійснюється, наприклад, в пікові години доби з метою заощадження коштів в умовах застосування диференційованих тарифів на електричну енергію, привносить додаткову помилку до результатів прогнозування.

Мета і завдання.

Метою роботи є удосконалення ієрархічної багатофакторної математичної моделі електричного навантаження досліджуваного кінцевого споживача з метою підвищення точності середньострокового прогнозування шляхом врахування впливу технологічних, виробничих, режимних та інших факторів на індивідуальні режими електроспоживання.

Матеріал та результати досліджень.

Під час аналізу даних було використано 2688 початкових значень усередненого за 30-хвилинні інтервали електричного навантаження підприємства цементної промисловості, що використовує сухий спосіб виробництва цементу. Часовий ряд значень електричного навантаження підприємства наведено на рис.1.

Аналіз характеру змінення електричного навантаження показує, що на досліджуваному періоді підприємство перейшло від режиму повного завантаження виробництва до режиму підтримки функціонування підприємства в зимовий період, для якого характерно лише забезпечення відповідних умов зберігання технологічного устаткування у виробничих цехах, а також споживання електричної

енергії на господарські потреби. Тому є доцільним розбиття часового ряду на окремі відрізки, що характеризуються специфічними характеристиками.

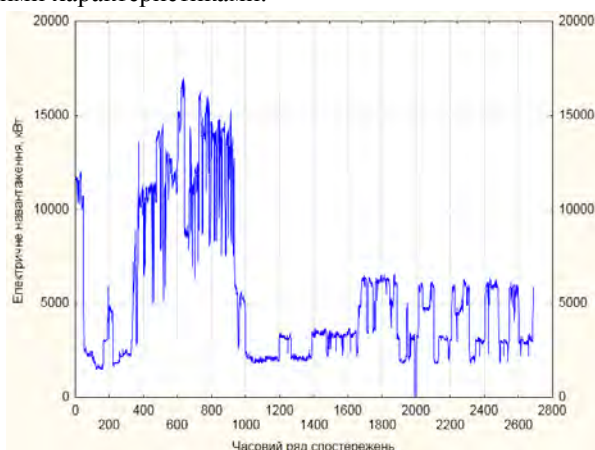


Рис.1. Часовий ряд значень електричного навантаження кінцевого споживача

Попередні дослідження показують, що для середньострокового прогнозування електричного навантаження найчастіше застосовуються експоненціальне згладжування [8,9], інтегрована модель авторегресії – плаваючого середнього ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) [16] та нейронні мережі [17]. Для прогнозування електричного навантаження досліджуваного кінцевого споживача було обрано метод експоненціального згладжування, який дозволяє суттєво скоротити терміни обчислень та налаштувань самої моделі. Власне прогнозування здійснювалося за допомогою програмного пакета STATISTICA [9] через простоту завантаження даних, високу швидкість обчислень та добру інтерпретацію результатів прогнозування.

З метою виявлення сезонної складової часового ряду електричного навантаження попередньо було виконано спектральний аналіз Фур'є. Для оцінки точності результатів прогнозування застосовано середню абсолютну відсоткову помилку прогнозування MAPE (Mean Absolute Percentage Error) [9]. Результати прогнозування за методом експоненціального згладжування наведено на рис.2.

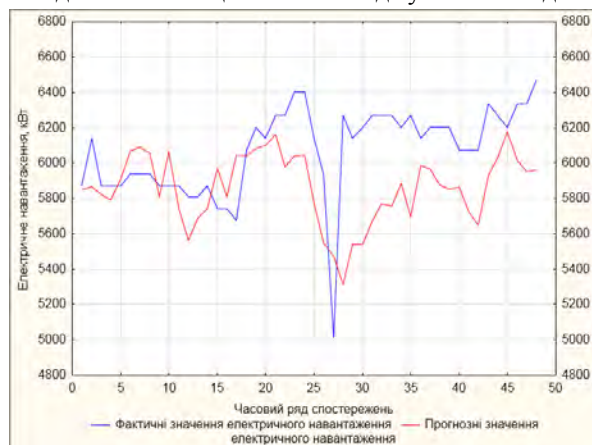


Рис.2. Порівняння прогнозних та фактичних значень електричного навантаження підприємства на добовому інтервалі часу

Візуальний аналіз показує, що результати прогнозування не є задовільними. Середня абсолютна відсоткова помилка прогнозування склала 16,63%. Для визначення цільового значення MAPE звернемося до світового досвіду. В енергосистемі Великобританії, наприклад, під час прогнозування електричного навантаження на наступну добу приймають помилку прогнозування на рівні 2% [15]. Тому актуальним є пошук шляхів уточнення прогнозних оцінок.

В [14] йдеться про застосування двох підходів, за допомогою яких можна підвищити точність прогнозу:

- кластеризація і подальше прогнозування;
- консенсус-прогноз.

Застосування кластеризації, тобто розбиття часового ряду на гомогенні відрізки, в завданнях прогнозування було вперше запропоновано Russel Fogler в 1974 році [15]. Прогнозування часових рядів в [14] запропоновано здійснювати в два етапи:

1. Кластеризація.
2. Прогнозування всередині кластера.

Такий підхід є комбінацією двох моделей: перша модель визначає власне кластер, друга – реалізує прогнозування всередині кластера. На сьогоднішній день такий підхід є надзвичайно поширеним.

За результатами кластерного аналізу за методом k – середніх [10, 11] зроблено висновки щодо доцільності розбиття наявного часового ряду значень електричного навантаження підприємства протягом досліджуваного періоду на три кластери із такими характеристиками:

- кластер 1 із середнім значенням 12053 кВт*год;
- кластер 2 із середнім значенням 5963 кВт*год;
- кластер 3 із середнім значенням 3102 кВт*год.

Результати кластерного аналізу наведено в табл.1 і на рис.3. Проте, не можна стверджувати, що і в подальшому буде доцільним розбиття часового ряду на 3 кластери. Адже можливі зміни режиму роботи підприємства, технологічного процесу, кліматичних параметрів тощо. Тому слід виконувати періодичні дослідження, спрямовані на визначення раціонального числа кластерів для наявної передісторії параметрів режимів електроспоживання досліджуваного кінцевого споживача.

Таблиця 1

Результати кластерного аналізу досліджуваного часового ряду

Змінна кластеру (доба)	Кластер	Відстань до центроїду
1	1	1266,31
2	3	514,04
3	3	1022,02
4	3	905,69
-	-	-----
54	2	669,33
55	3	1213,83
56	3	735,58

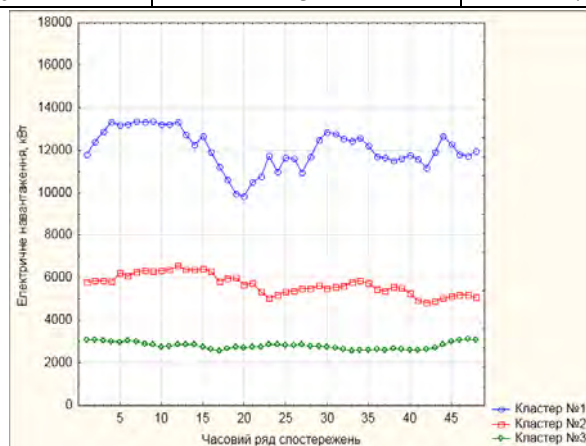


Рис.3. Розбиття на кластери часового ряду значень електричного навантаження досліджуваного кінцевого споживача

Для визначення кластеру, на основі передісторії якого буде формуватися середньостроковий прогноз, було проаналізовано графік електричного навантаження підприємства наприкінці досліджуваного періоду (рис.4). За результатами аналізу зроблено висновок щодо віднесення параметрів режимів електроспоживання наступної доби до кластеру 2.

Аналіз часового ряду електричного навантаження досліджуваного кінцевого споживача після кластеризації (кластер 2) дозволяє зробити ряд висновків. За результатами спектрального аналізу Фур'є виявлено, що ряд містить яскраво виражену сезонну компоненту тривалістю 24 інтервали. Також спостерігаються цикли в межах доби тривалістю 8 та 12 інтервалів, що зумовлено характером технологічного режиму. Цикл в межах тижня тривалістю 168 інтервалів проявляється слабо, оскільки підприємство працює без вихідних. Крім того, ряд містить «провали», які виникли внаслідок виведення в ремонт частини електротехнічного устаткування підприємства. З метою усунення нерегулярних складових в процесі оброблення вихідних даних «провали» було згладжено зі збереженням добового циклу. Під час ідентифікації моделі, оцінювання її параметрів і перевірки на адекватність за допомогою аналізу залишкової компоненти [13] було зроблено висновок щодо доцільності застосування сезонної моделі.

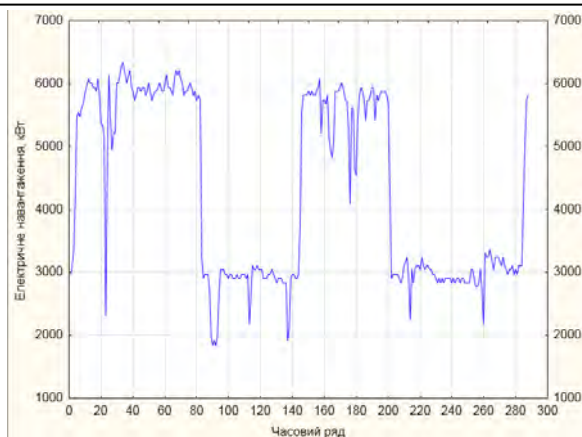


Рис.4. Тенденція часового ряду значень електричного навантаження досліджуваного кінцевого споживача

Середня абсолютна відсоткова помилка прогнозування на досліджуваному часовому ряду значень електричного навантаження підприємства після виконання кластеризації склала 15,3%. Результати порівняння прогнозних і фактичних значень наведено на рис.5.

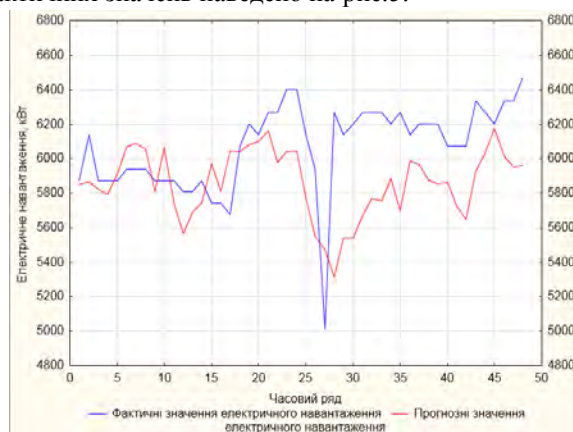


Рис.5. Порівняння прогнозних та фактичних значень електричного навантаження підприємства на добовому інтервалі часу після виконання кластеризації

Звичайно, такі результати прогнозування також не є задовільними. Але їх можна пояснити неврахуванням технологічних параметрів режимів роботи підприємства на досліджуваному періоді.

Розглянемо графік електричного навантаження підприємства з 2496 по 2736 значення, додавши до досліджуваного часового ряду 48 прогнозованих (на базі кластеру 2) значень електричного навантаження підприємства на наступну добу, із подальшим їх порівнянням з фактичним навантаженням (рис.6).

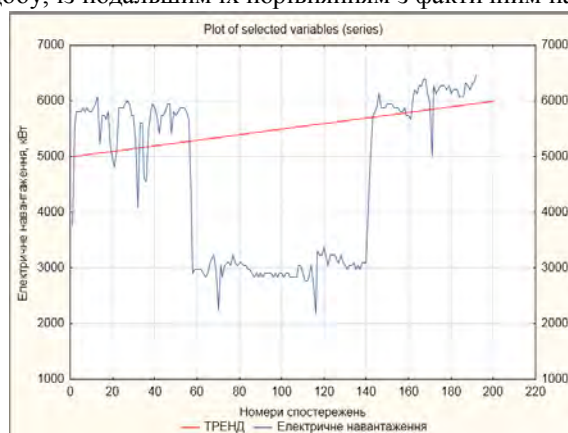


Рис.6. Графік електричного навантаження досліджуваного кінцевого споживача на інтервалі з 2496 по 2736 значення часового ряду

Як видно з рис.6, віднесення графіка навантаження в період з 2688 по 2736 значення часового ряду до кластеру 2 в цілому виявилось вірним рішенням і здійснювалося лише на підставі статистичної обробки часового ряду, без урахування зміни технологічного режиму роботи підприємства наступної доби. Але спостерігається зростання загального рівня електричного навантаження, яке проявляється у наявності лінійного тренду (рис.6). Також помітний провал посеред робочого дня, що не відтворено прогнозною моделлю.

З метою усунення зазначених невідповідностей було вжито заходів з підвищення адекватності прогновної моделі:

1. З метою формування бази даних (БД) передісторії враховано запланований режим роботи підприємства наступної доби. Також, на цьому етапі, реалізовано кластеризацію із розбиттям часового ряду на 3 кластери, що дозволило скоротити час оброблення даних.

2. Враховано лінійне зростання навантаження підприємства (рис.6). Після отримання інформації від підприємства про те, що воно буде плавно переходити до режиму повного завантаження, було скориговано прогнозну модель – додано лінійний тренд. Це призвело до зменшення MAPE до 7,21%.

3. Виконано кореляційний аналіз впливу режимів роботи потужних струмоприймачів на характер загального електричного навантаження підприємства. За результатами кореляційного аналізу в прогнозній моделі враховано вплив цементного та вугільного млинів, коефіцієнт кореляції для яких $r > 0,5$ (кореляційну матрицю наведено в табл.2). Це призвело до зменшення MAPE до 5,8 %.

Таблиця 2

Результати кореляційного аналізу графіків навантаження потужних струмоприймачів та загального графіку електричного навантаження підприємства

Змінні	Середнє значення	Середнє квадр. відхилення	Загальне навантаження	Цементний млин	Вугільний млин
Загальне навантаження	31335,32	5898,89	1	0,65	0,68
Цементний млин	3850,35	2592,08	0,65	1	0,87
Вугільний млин	797,19	665,42	0,68	0,87	1

4. Виконано сезонну декомпозицію часового ряду (табл.3) [9]. За результатами сезонної декомпозиції виділено чотири компоненти: сезонну компоненту (позначається St, де t – момент часу), тренд (Tt), циклічну компоненту (Ct), залишкову (випадкову, нерегулярну) компоненту (It). З метою виявлення зв'язку навантаження підприємства з погодними умовами виконано кореляційний аналіз сформованого із залишкової компоненти нового часового ряду (кореляційну матрицю наведено в табл.4). За результатами аналізу побудовано регресійну модель залишкової компоненти, що дозволило врахувати вплив погодних умов на характер навантаження підприємства. Це призвело до зменшення MAPE до 5,51 %.

Таблиця 3

Результати сезонної декомпозиція часового ряду

Номер результату	Електричне навантаження, кВт	Ковзне середнє	Різниця	Сезонна складова	Скоригов. ряд	Згладжений тренд циклічний ряд	Залишкова компонента
1	4950			-104,78	5054,78	6388,15	-1333,37
2	6930			-106,10	7036,10	6447,87	588,23
---	---	---	---	---	---	---	---
13	7788	6118,75	1669,25	176,29	7611,71	7362,55	249,16
14	7986	6039,00	1947,00	292,65	7693,35	7629,31	64,04
---	---	---	---	---	---	---	---
671	5940			-593,57	6533,57	6286,74	246,82
672	5412			-544,27	5956,27	6301,03	-344,76

5. До результатів прогнозування внесено поправку у зв'язку із запланованим ремонтом електротехнічного устаткування. Також враховано інформацію щодо планової зупинки цементного млину з метою перевірки його технічного стану в період із 12.00 до 13.00 прогновної доби (рис.6), що не було враховано у базовій моделі. Це дозволило знизити MAPE до 4,86%. Результати прогнозування та фактичного навантаження наведено на рис. 7.

Результати кореляційного аналізу залежності залишкової компоненти від погодних умов

Змінні	Середнє значення	Середнє квадр. відхилення.	Температура	Атмосферний тиск	Вологість	Залишкова компонента
Температура	0,74	2,89	1	-0,415	-0,920	0,075
Атмосферний тиск	740,06	2,54	-0,415	1	0,081	0,138
Вологість	85,31	8,90	-0,920	0,081	1	-0,154
Залишкова компонента	246,35	5898,89	0,075	0,138	-0,154	1

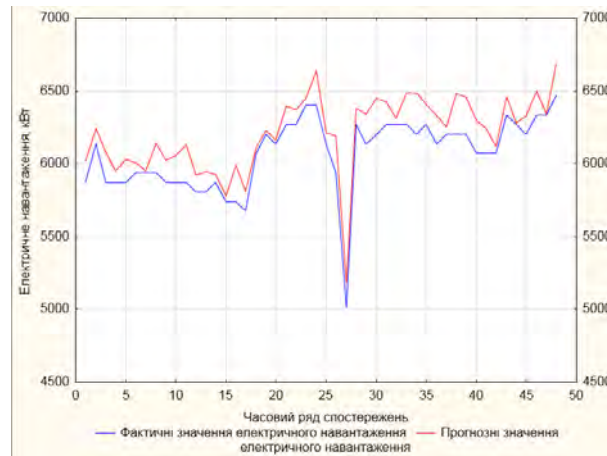


Рис. 7. Порівняння прогнозних та фактичних значень електричного навантаження підприємства на добовому інтервалі часу після коригування прогнозної моделі

Таким чином, шляхом послідовного врахування окремих технологічних, виробничих, режимних та зовнішніх факторів, що чинять вплив на характер режимів електроспоживання кінцевого споживача, та відповідного коригування параметрів прогнозної моделі на досліджуваному часовому ряді значень електричного навантаження середню абсолютну відсоткову помилку прогнозування зменшено більше ніж втричі: з 16,63% до 4,86%. Значення MAPE і величину її зменшення на кожному етапі коригування прогнозної моделі наведено в табл. 5 і на рис. 8.

Таблиця 5

Динаміка зменшення середньої абсолютної відсоткової помилки прогнозування електричного навантаження досліджуваного підприємства за результатами коригування параметрів прогнозної моделі

Етапи коригування прогнозної моделі	MAPE, %	Зменшення помилки прогнозування, %
Експоненціальне згладжування	16,63	0
Прогнозування на базі передісторії 2 кластеру	15,30	1,33
Врахування лінійного тренду зростання навантаження	7,21	8,09
Врахування впливу потужних струмоприймачів	5,80	1,41
Врахування погодних умов	5,51	0,29
Внесення поправок у зв'язку із виведенням в ремонт електричного устаткування	4,86	0,65
Результуюче зменшення помилки		10,44 %

Слід зазначити, що підприємством під час розрахунків за спожиту електричну енергію застосовується одноставковий тариф, диференційований за зонами доби, в результаті чого в досліджуваному часовому ряді значень електричного навантаження наявна додаткова випадкова складова, що зумовлена стохастичним керуванням споживачами-регуляторами з метою економії коштів і яку не було враховано під час побудови регресійної моделі. Тому, з метою підвищення точності середньострокового прогнозування, слід прагнути до упорядкованого застосування методів управління режимами електроспоживання підприємства на плановій основі. Такий підхід дозволить врахувати в

прогнозній моделі планові керуючі впливи під час управління електричним навантаженням підприємства, що сприятиме підвищенню точності прогнозних оцінок.

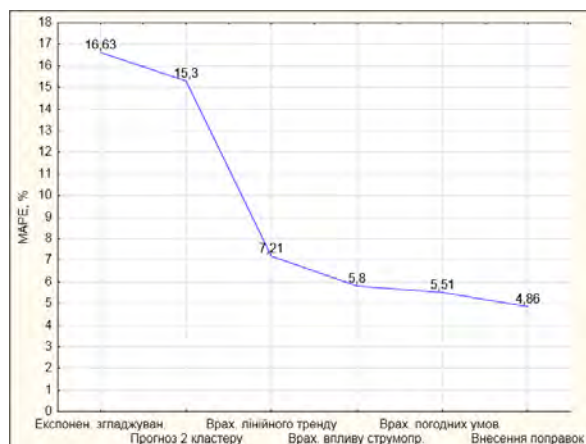


Рис.8. Динаміка зменшення середньої абсолютної відсоткової помилки прогнозування електричного навантаження досліджуваного підприємства за результатами коригування параметрів прогнозної моделі

Висновки.

За результатами проведених досліджень можна зробити ряд висновків.

1. На режими електроспоживання кінцевих споживачів електричної енергії чинять вплив ряд факторів, зокрема виробничого і технологічного характеру, переважна більшість яких є передбачуваними, а відтак їхній вплив можна врахувати, зокрема під час середньострокового прогнозування електричного навантаження на наступну добу шляхом коригування (уточнення) прогнозних моделей.

2. Існуючі класичні методи прогнозування базуються на виявленні тенденцій часових рядів на інтервалі передісторії і не враховують вищезазначені фактори. В результаті прогнози, що побудовано в такий спосіб, добре збігаються з фактичним електроспоживанням в разі «нормальної» поведінки об'єкту прогнозування, і різко відхиляються від загальної тенденції в разі виникнення одного чи декількох вищезазначених факторів.

3. З метою підвищення якості прогнозування необхідно, окрім часових рядів значень електричного навантаження (електроспоживання) кінцевих споживачів на інтервалі передісторії, володіти інформацією, зокрема виробничого і технологічного характеру, врахування якої під час прогнозування сприятиме підвищенню точності й достовірності прогнозних оцінок. До такої інформації належить:

- виробничі плани підприємств;
- технологічні карти виробництв;
- планові режими роботи потужних струмоприймачів;
- плани проведення ремонтних, профілактичних та інших робіт;
- інші фактори, що впливають на режими електроспоживання кінцевих споживачів електричної енергії.

4. З метою підвищення якості середньострокового прогнозування необхідно також упорядкувати і враховувати в прогнозних моделях стратегії керування поточними режимами електроспоживання кінцевих споживачів, які здійснюються, зокрема, з метою економії плати за електричну енергію в умовах диференційованої вартості електричної енергії.

Таким чином можна стверджувати, що для ефективного керування попитом на електричну потужність (електроенергію) в РДДБР кваліфікованими кінцевими споживачами мають застосовуватися індивідуальні прогнозні моделі, які додатково враховують ряд факторів, зокрема виробничого і технологічного характеру, що зумовлюють передбачувану поведінку цього кінцевого споживача в конкретних умовах. Крім того, для підвищення точності й достовірності прогнозних оцінок, необхідно упорядкування і планування поведінки конкретного кінцевого споживача, і врахування її під час побудови індивідуальних прогнозних моделей.

Список літератури

1. Праховник А.В., Коцар О.В. Керування режимами електроспоживання в умовах запровадження в Україні ринку двохсторонніх договорів та балансуєчого ринку // Енерг. та електрифікація, 2010. – №2 – С.42 – 52.

2. Коцар О.В. Керування режимами електроспоживання кінцевих споживачів в умовах запровадження в Україні ринку двохсторонніх договорів та балансуєчого ринку // Праці Інституту

електродинаміки Національної академії наук України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. Видання наукове. – Київ, 2011 р. – С.121 – 130.

3. Споживання та виробіток електроенергії ОЕС України за січень 2015 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://eircenter.com/multimedia/infografika/2015/02/05/spozhivannya-ta-virobitok-elektroenergiyi-oes-ukrayini-za-sichen-2015/>

4. Про засади функціонування ринку електричної енергії України / Закон України // Офіційний сайт Верховної Ради України, 24.10.2013 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/663-vii>

5. Застосування деривативів на ринку електроенергії / Н.Л.Іващук, О.В.Іващук, О.Л.Соловей. Жешівський Університет, Національний університет «Львівська політехніка», Інститут прикладних проблем механіки і математики НАН України [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу http://www.rusnauka.com/8_NMIW_2008/Economics/28309.doc.htm

6. Праховник А. В. Інтегроване ресурсне планування енергозабезпечення / А. В. Праховник, О.В.Кулик [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://escosys.narod.ru/2006_5/art_09.doc.

7. Коцар О.В. Застосування АСКОВЕ для керування режимами електроспоживання в умовах функціонування ринку двохсторонніх договорів та балансуєчого ринку // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. Видання наукове. – Київ, 2010 р. – С.97 – 102.

8. Праховник А.В., Розен В.П., Дегтярев В.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий. - М.: Недра. - 1985. – 232с.

9. Боровиков В.П., Ивченко Г.И. Прогнозирование в системе STATISTICA в среде Windows. Основы теории и интенсивная практика на компьютере // Учеб. пособие – Москва, 2000 – 384с.

10. Підвищення точності прогнозування навантаження споживачів електричної енергії / П.М.Галабійський, студент I курсу магістратури; наук.керівник О.В.Коцар, канд.техн.наук, доцент // Матеріали VI Міжн. наук.-техн. Конф. «Енергетика. Екологія. Людина – 2014», 21-23 травня 2014 року – Київ. – С. 45 – 52.

11. Кластеризация: метод k-средних [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.statistica.ru/theory/klasterizatsiya-metod-k-srednikh/>

12. Черненко П. О., Мартинюк О. В, Заславський А. І. Моделювання і прогнозування електроспоживання та екстремальних значень електричного навантаження енергооб'єднання. – Енергетика та електрифікація. – 2009. – №11. – С. 24–34.

13. Прогнозирование в STATISTICA [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.statsoft.ru/solutions/tasks/forecast/>

14. Чугуева И. Два способа повысит точность прогноза [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.mbureau.ru/blog/dva-sposoba-povysit-tochnost-prognoza>

A pattern recognition model for forecasting [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <http://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/288.2.pdf>

15. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление // В 2 т.– М.: Мир, 1974 – 608с.

16. Нейронные сети STATISTICA [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.statsoft.ru/tv/screen-video/neural-networks/>

17. K-means [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://znaimo.com.ua/K-means>

O. Kotsar, Y. Rasko, P. Galabitskiy

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

INCREASING THE RELIABILITY OF LOAD FORECASTING IN BCM&BM

The article investigates the goals, objectives and methods of the midterm electric load forecasting of final consumers. An individual electrical load forecasting model is developed for the investigated final consumer. Proposed model includes the production, processing and external factors affecting the modes of power consumption. Based on the results of study concluded that the inclusion of a number of factors of forecasting model of technological and industrial character significantly improves the quality of forecasting. Were investigated the factors that must be considered when building forecasting models of electrical load of individual final consumers for solving tasks of midterm forecasting of electrical demand in BCM&BM.

Keywords: BCM&BM, electric load forecasting, clustering, exponential smoothing.

1. A.Prakhovnik, O.Kotsar. Managing of power consumption modes in terms of introduction of bilateral contracts market and balancing market of Ukraine // Energetic and Electrification, 2010. – №2 – p.42 – 52.

2. O.Kotsar. Managing of power consumption modes of end users in terms of introduction of bilateral contracts market and balancing market of Ukraine // Proceedings of the Institute of Electrodynamics National

Academy of Sciences of Ukraine. Scientific Papers. Special Issue. Scientific publication. – Kyiv, 2011 p. – p.121 – 130.

3. Consumption and generation of power of UES of Ukraine for January 2015 [electronic resource] - Mode of access to the resource: <http://eircenter.com/multimedia/infografika/2015/02/05/spozhivannya-ta-virobitok-elektroenergiyi-oes-ukrayini-za-sichen-2015/>

4. About bases of functioning electricity market of Ukrain Law of Ukraine // Official site of the Verkhovna Rada of Ukraine, 24.10.2013 [electronic resource] - Mode of access to the resource: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/663-vii>

5. The use of derivatives in the electricity market / N.Ivashyk, O.Ivashyk, O.Solovei. Rzeszow University, National University «Lviv Polytechnic», Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics, NAS Ukraine [electronic resource] – Mode of access to the resource: http://www.rusnauka.com/8_NMIW_2008/Economics/28309.doc.htm

6. A.Prakhovnik. Integrated resource planning of power supply / A.Prakhovnik, O.Kylik [electronic resource] - Mode of access to the resource: http://esco-ecosys.narod.ru/2006_5/art_09.doc.

7. O.Kotsar. Application of AMR for managing of power consumption modes in terms of functioning of bilateral contracts market and balancing market // Proceedings of the Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine. Scientific Papers. Special Issue. Scientific publication. – Kyiv, 2010 p. – p.97 – 102.

8. Prakhovnyk A.V., Rozen V.P., Dehtiarev V.V. Energy Saving Modes of Power Supply of Mining Enterprises. – M.: Nedra. – 1985. – 232p.p.

9. V.Borovik, G.Ivchenko. Forecasting in system STATISTICA for Windows. Basic theory and intensive practice in the computer // Textbook – Moscow, 2000 – 384p.

10. Improving the accuracy of forecasting load of electricity consumers / P.Galabitskiy, O.Kotsar// Materials of VI international scientific-technical conferences. «Energy. Ecology. Human – 2014», 21-23 may 2014 – Kyiv. – p. 45 – 52.

11. Clustering: k-means method [electronic resource] - Mode of access to the resource: <http://www.statistica.ru/theory/klasterizatsiya-metod-k-srednikh/>

12. P.Chernenko, O.Martinyuk, A.Zaslavskiy. Modeling and forecasting of power consumption and extreme values of electric load of energy association. // Energetic and Electrification. – 2009. – №11. – p. 24–34.

13. Forecasting in STATISTICA [electronic resource] - Mode of access to the resource: <http://www.statsoft.ru/solutions/tasks/forecast/>

14. I.Chygyeva. Two ways to improve the accuracy of forecasting [electronic resource] - Mode of access to the resource: <http://www.mbureau.ru/blog/dva-sposoba-povysit-tochnost-prognoza>

15. A pattern recognition model for forecasting [electronic resource] - Mode of access to the resource: <http://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/288.2.pdf>

16. G.Box, G.Jenkins. Time series analysis. Forecast and Control // В 2 т.– М.: Мир, 1974 – 608с.

17. Neural Networks STATISTICA [electronic resource] - Mode of access to the resource: <http://www.statsoft.ru/tv/screen-video/neural-networks/>

18. K-means [electronic resource] - Mode of access to the resource: <http://znaimo.com.ua/K-means>

УДК 621.317.38

О.В. Коцарь, канд. техн. наук, доцент, **Ю.А. Расько, П.М. Галабицкий**

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ В РДДБР**

В статье исследованы цели, задачи и методы среднесрочного прогнозирования электрической нагрузки конечных потребителей. Разработана индивидуальная прогнозная модель электрической нагрузки исследуемого конечного потребителя с учетом производственных, технологических и внешних факторов, влияющих на режимы электропотребления. На основании результатов исследований сделан вывод, что учет в прогнозной модели ряда факторов технологического и производственного характера существенно улучшает качество прогнозирования. Исследованы факторы, которые должны быть учтены при построении индивидуальных прогнозных моделей электрической нагрузки конечных потребителей в рамках решения задач среднесрочного прогнозирования спроса на электроэнергию в РДДБР.

Ключевые слова: РДДБР, прогнозирование электрической нагрузки, кластеризация, экспоненциальное сглаживание.

Надійшла 29.04.2015

Received 29.04.2015

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Рассмотрено содержание действующего стандарта по нагрузкам силовых масляных трансформаторов. Приведена последовательность моделирования нестационарных тепловых режимов силовых масляных трансформаторов в электрических сетях.

Цель исследования: повышение эксплуатационной надежности электрических сетей и систем за счет интенсификации нагрузочной способности силовых масляных трансформаторов.

Методика реализации: внедрение передовых алгоритмов и программ моделирования нестационарных термодинамических процессов силовых масляных трансформаторов для автоматизированного контроля внутреннего теплового состояния.

Результаты исследования: проанализированы основные положения действующих нормативных документов по нагрузочной способности силовых масляных трансформаторов; исследована целесообразность применения программного пакета SolidWorks для моделирования тепловых режимов силовых масляных трансформаторов.

Выводы: показано, что внедрение современных алгоритмов и программных пакетов позволяет создать эффективную модель автоматизированного контроля нестационарных тепловых режимов силовых масляных трансформаторов в электрических сетях.

Ключевые слова: силовой трансформатор, нагрузочная способность, нестационарный тепловой режим, моделирование.

Введение. Электрическая энергия при ее передаче от шин электростанций до конечных потребителей претерпевает до восьми трансформаций. При этом в электрических сетях соответствующих классов напряжения на каждый киловатт передаваемой мощности приходится устанавливать от 1,5 до 2,5 кВА трансформаторной мощности. Приведенная в [1] статистическая информация о силовых масляных трансформаторах, установленных в электрических сетях разных классов напряжения, свидетельствует о том, что значительное количество трансформаторов понизительных подстанций нуждается в замене или серьезном капитальном ремонте. Неудовлетворительное техническое состояние трансформаторного парка приводит к частым отказам и авариям трансформаторов с серьезными нарушениями показателей надежности электроснабжения.

В сложившихся тяжелых экономических условиях особое значение приобретает обеспечение наивысшей эффективности от каждого киловольт-ампера установленной трансформаторной мощности. В масштабах страны улучшение даже на 1 % использования установленной мощности за счет интенсификации нагрузочной способности трансформаторов, находящихся в эксплуатации, равносильно годовому выпуску современного трансформаторного завода.

Постановка задачи. Для оценки нагрузочной способности трансформаторов необходимо определить температуру в наиболее нагретых точках изоляции обмотки. Такой расчет сводится к определению превышения температуры верхних слоев масла над температурой охлаждающей среды и превышения температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой масла при неустановившихся режимах нагрева.

Многочисленные результаты температурных испытаний масляных трансформаторов с различными системами охлаждения свидетельствуют о том, что определение температуры наиболее нагретой точки изоляции обмоток является достаточно сложной технической задачей.

Сегодня в электрических сетях отсутствуют надежные датчики температуры, которые могут быть размещены внутри бака трансформатора, находиться там постоянно и контролировать значение температуры наиболее нагретой точки изоляции обмоток. Кроме того, в различных эксплуатационных режимах такая точка может менять свое место расположения внутри бака, что делает установку таких датчиков малоэффективной.

Одним из вариантов решения поставленной задачи является моделирование нестационарных тепловых режимов внутри бака трансформатора.

В статье изложены некоторые результаты такого моделирования с использованием программного пакета SolidWorks.

Анализ нормативной базы. Общие сведения об оценке температурного режима и определении нагрузочной способности силовых масляных трансформаторов изложены в межгосударственном стандарте «Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов» [2]. Стандарт МЭК 354 при переходе на пятизначную нумерацию получил обозначение IEC 60354. Со временем был разработан и введен в действие обновленный стандарт IEC 60076-7 [3].

В основе расчета нагрузочной способности силовых масляных трансформаторов лежит тепловой износ изоляции обмоток – необратимый процесс, характеризующийся тем, что под воздействием температуры и ряда других факторов физико-химические свойства твердой изоляции обмоток с течением времени претерпевают изменения. При этом изоляция обмоток становится хрупкой и теряет способность выдерживать механические нагрузки от вибраций или коротких замыканий, а скорость старения изоляции обмоток зависит от температуры и длительности ее воздействия.

Зависимости изменения температуры масла $\Theta_m(t)$ и температуры наиболее нагретой точки обмотки $\Theta_{\text{ннт}}(t)$ силового масляного трансформатора ТМН-6300/110 при изменении коэффициента загрузки по току K приведены на рис. 1.

Моделирование. Как отмечено выше, моделирование нестационарных тепловых режимов силовых масляных трансформаторов выполнялось с использованием программного пакета SolidWorks [4], позволяющего с использованием встроенной библиотеки создавать необходимый конструктивный элемент (силовой трансформатор), заполнять его внутренний объем элементами (магнитопровод с обмотками), средой с определенными свойствами (трансформаторным маслом) и моделировать внутренние нестационарные термодинамические процессы.

Общий вид модели активной части трансформатора показан на рис. 2, а модель трансформатора в сборе (с радиаторами охлаждения) – на рис. 3.

Следующим шагом является моделирование внутренних теплообменных процессов в баке трансформатора. Для этого задаются общие настройки, а также вводятся параметры трансформаторного масла. Пример задания начальных условий модели расширительного бака показан на рис. 4, а собственно бака трансформатора – на рис. 5.

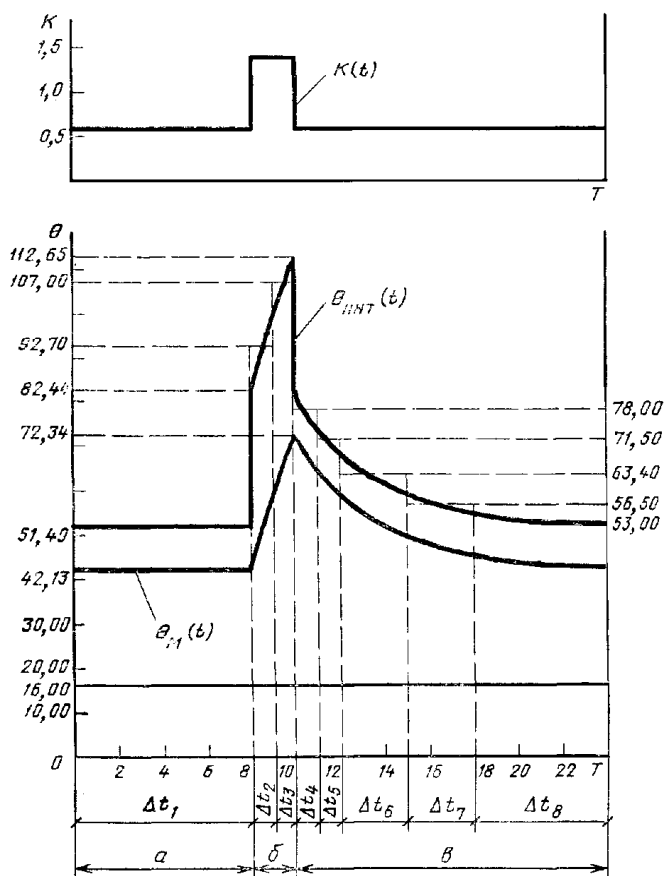


Рис. 1. Зависимости изменения температуры масла $\Theta_m(t)$ и температуры наиболее нагретой точки обмотки $\Theta_{\text{ннт}}(t)$ силового масляного трансформатора ТМН-6300/110 при изменении коэффициента загрузки по току K .

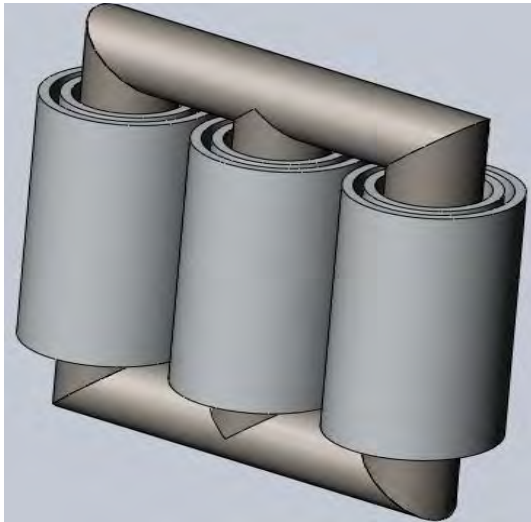


Рис. 2. Модель магнітопровода з обмотками

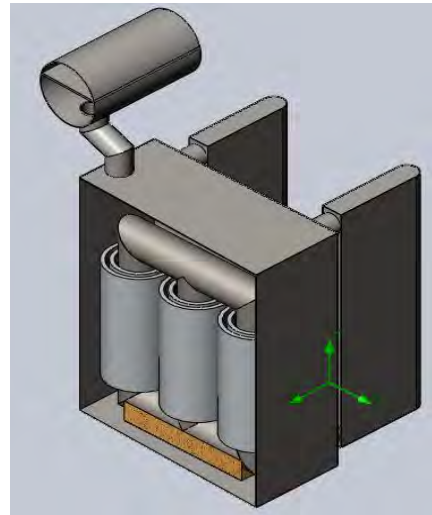


Рис. 3. Модель трансформатора в зборі

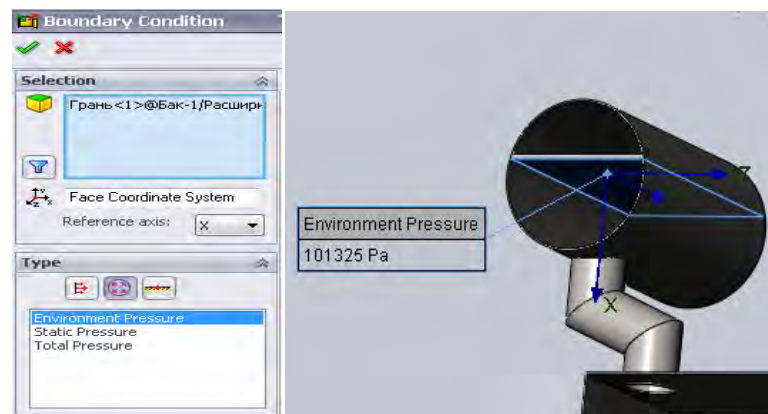


Рис. 4. Приклад задачі початкових умов розширювального бака

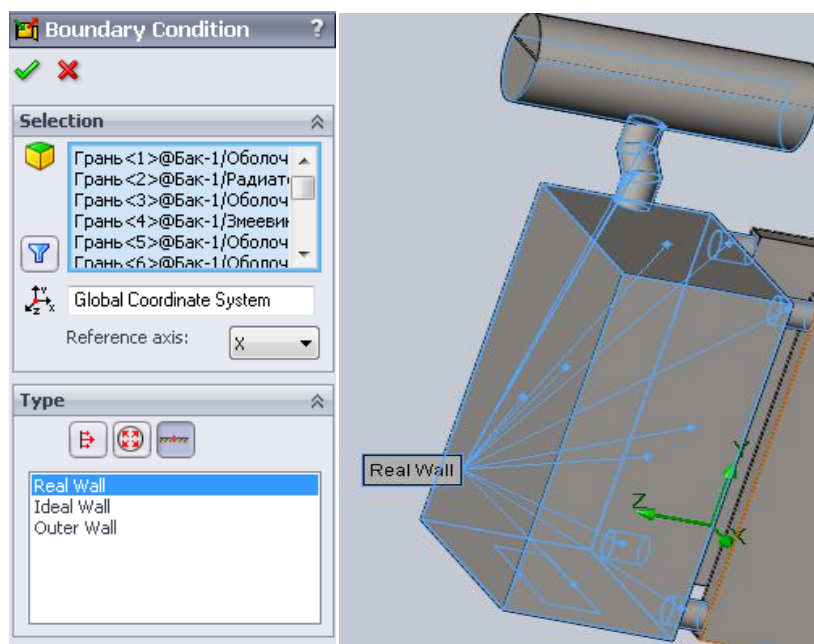


Рис. 5. Приклад задачі початкових умов бака трансформатора

При создании модели также задаются необходимые внешние и внутренние габаритные размеры трансформатора (параметры и толщина бака и охладителей, габариты обмоток и др.), а также электрические параметры (величина потерь мощности, коэффициент загрузки по току и др.).

Ниже приведены некоторые результаты моделирования. Распределение температуры по поверхности обмоток ВН и магнитопровода показано на рис. 6, в поперечном срезе бака – на рис. 7, а в продольном срезе бака трансформатора – на рис. 8.

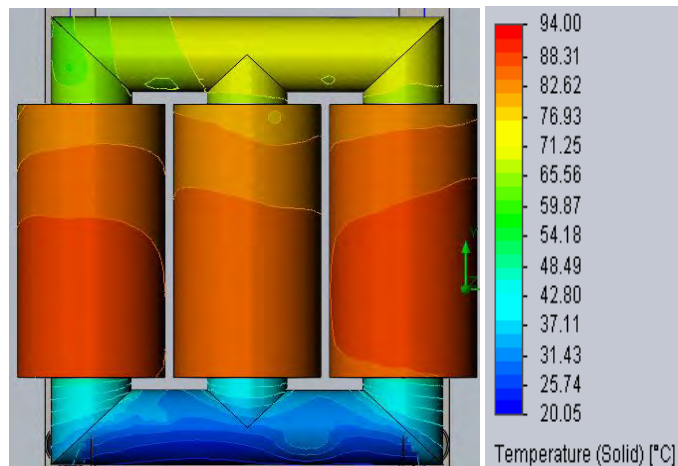


Рис. 6. Распределение температуры по поверхности обмоток ВН и магнитопровода

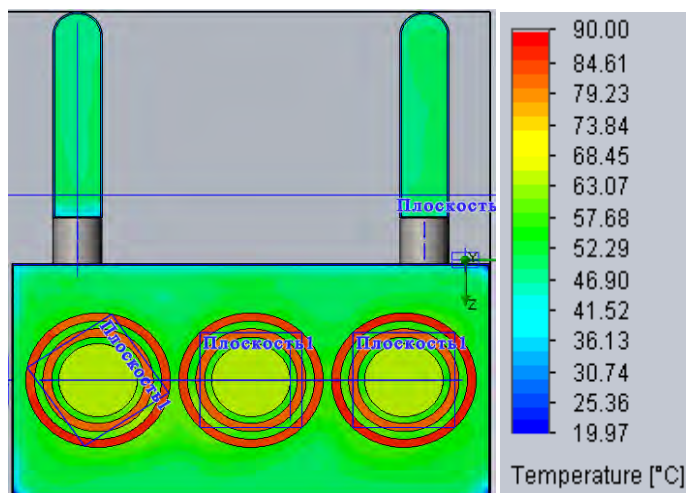


Рис. 7. Распределение температуры в поперечном срезе бака трансформатора

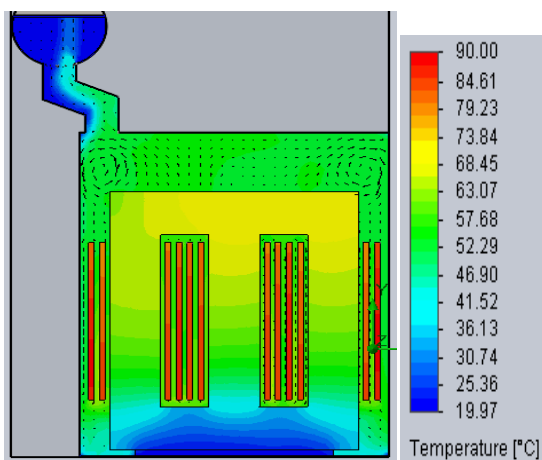


Рис. 8. Распределение температуры в продольном срезе бака трансформатора

Температурные поля скорости циркуляции масла внутри бака трансформатора показаны на рис. 9.

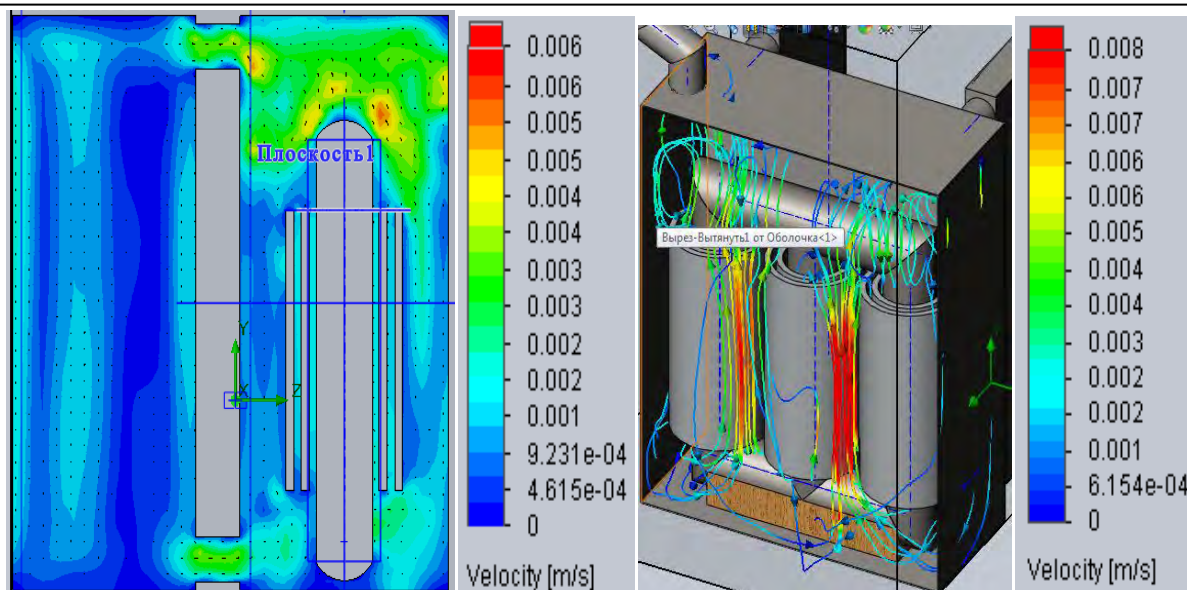


Рис. 9. Температурные поля скорости циркуляции масла внутри бака трансформатора

Выводы. Интенсификация нагрузочной способности силовых маслонаполненных трансформаторов в электрических сетях может быть достигнута только при обеспечении полного и непрерывного мониторинга его внутреннего теплового состояния на основе применения современных автоматизированных систем контроля и диагностики.

Созданная модель нестационарных тепловых режимов силовых масляных трансформаторов позволяет с высокой точностью определить место расположения и значение температуры наиболее нагретой точки изоляции обмотки внутри бака, что в свою очередь, позволяет оперативно уточнять значение допустимой перегрузки по току силовых масляных трансформаторов в различных эксплуатационных режимах.

Список литературы.

1. Бабушкин В.М., Нейман В.А., Чевычелов В.А. Электрические сети: развитие, новые решения. Пособие для электроэнергетиков – К.: Энергетика и электрификация, 2002. – 168 с., ил.
2. МГОСТ 14209-97 (МЭК 354) Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. Дата введения 2002.01.01.
3. IEC 60076-7:2005 Power transformers - Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers Released: 2005-12-15.
4. Шам Тику. Эффективная работа в SolidWorks / пер. с англ. – С-Пб.: «Питер Принт», 2004.

S. Kazanskiy, V. Mossakovskiy, D. Pechonkin

SIMULATION OF NON-STATIONARY THERMAL MODES OF OIL POWER TRANSFORMERS

The content examined is of the active standard for oil power transformer loads. It shows the sequence of simulation of non-stationary thermal modes of oil power transformers in electric networks.

Objective: to increase the operational reliability of electrical networks and systems through the intensification of the capacity load of oil power transformers.

Technique of realization: the introduction of advanced algorithms and software simulation of unsteady thermodynamic processes of oil power transformers for the automated control of the internal thermal state.

Results: The analysis of the main provisions of the existing regulations on the load capacity of oil power transformers; investigated is the expediency of SolidWorks software package for the simulation of thermal modes of oil power transformers.

Conclusions: it has been shown that the introduction of advanced algorithms and software packages allows for the creation of an effective model for the automated control of non-stationary thermal modes of oil power transformers in electric networks.

Key words: power transformer, load capacity, non-stationary thermal modes, simulation.

1. Babushkin V.M., Neiman V.A., Chevychelov V.A. Electrical networks: the development and new solutions. Allowance for electric power engineering - K. : Power Industry and Electrification, 2002. - p. 168, il.
2. MGOST 14209-97 (IEC 354) Manual load power oil transformers. Date of introduction 2002.01.01.
3. IEC 60076-7: 2005 Power transformers - Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers. Released: 2005-12-15.
4. Sham Tickoo. Effective work in SolidWorks / transl. from english - Edited by: «Peter Print», 2004.

УДК 621.314

С.В. Казанський, канд. техн. наук, доцент; **В.І. Моссаковський**, **Д.П. Печьонкін**
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ СИЛОВИХ ОЛИВНИХ
ТРАНСФОРМАТОРІВ

Розглянуто зміст чинного стандарту з навантажень силових оливних трансформаторів. Наведено послідовність моделювання нестационарних теплових режимів силових оливних трансформаторів в електричних мережах.

Мета дослідження: підвищення експлуатаційної надійності електричних мереж і систем за рахунок інтенсифікації навантажувальної здатності силових оливних трансформаторів.

Методика реалізації: запровадження новітніх алгоритмів і програм моделювання нестационарних термодинамічних процесів силових оливних трансформаторів для автоматизованого контролю внутрішнього теплового стану.

Результати дослідження: проаналізовано основні положення чинних нормативних документів з навантажувальної здатності силових оливних трансформаторів; досліджено доцільність застосування програмного пакету SolidWorks для моделювання теплових режимів силових оливних трансформаторів.

Висновки: показано, що впровадження сучасних алгоритмів і програмних пакетів дозволяє створити ефективну модель автоматизованого контролю нестационарних теплових режимів силових оливних трансформаторів в електричних мережах.

Ключові слова: силовий трансформатор, навантажувальна здатність, нестационарний тепловий режим, моделювання.

Надійшла 08.04.2015

Received 08.04.2015

УДК 621.43.016.7

В.Г. Петренко, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.
А.С. Соломаха, канд. техн. наук; **П.О. Барабаш**, канд. техн. наук, доцент
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ВПОРСКУВАННЯ
ЗРІДЖЕНОГО ПРОПАНАУ ДО ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО
ЗГОРАННЯ

Робота присвячена дослідженню процесу впорскування зрідженого газу до впускного колектору двигуна внутрішнього згорання на сталому режимі роботи з позицій класичної термодинаміки. Розроблено методику розрахунку параметрів газоповітряної суміші в залежності від початкових параметрів повітря та зрідженого газу на вході до двигуна. Розглянуто процес випаровування зрідженого пропану після його впорскування до впускного трубопроводу двигуна внутрішнього згорання. Показано вплив впорскування зрідженого пропану на температуру заряду та на наповнення циліндру і, відповідно, на енергетичні показники двигуна. Виконано розрахунок для двох режимів роботи двигуна – на повному навантаженні та в режимі холостого ходу.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання, зріджений нафтовий газ, газова система живлення двигуна

© Петренко В.Г., Соломаха А.С., Барабаш П.О., 2015

Вступ. В умовах стрімкого зростання ціни на бензин все більшого поширення набуває використання альтернативних палив. Одним з перевірених часом варіантів є дообладнання автомобілів для роботи на пропан-бутанових сумішах. Ціна зрідженого газу суттєво менша за товарні високооктанові бензини. Крім того, кількість автомобільних газових заправок різко зросла, і сьогодні практично кожна бензинова АЗС пропонує також і заправку пропан-бутаном. Спалювання газового палива в ДВЗ крім економічного ефекту дозволяє підвищити екологічні характеристики двигуна.

Більшість автомобільних систем живлення зрідженим газом передбачають випаровування палива перед його подачею до двигуна у спеціальному редукторі-випаровувачі. До недоліків такої схеми можна віднести збільшення парціального об'єму палива в робочій газоповітряній суміші, що призводить до зменшення наповнення циліндрів двигуна з відповідним зниженням енергетичних показників в порівнянні з бензиновим варіантом. Крім того, дозування подачі палива в газовому вигляді вимагає збільшення дозуючих отворів майже на порядок в порівнянні з подачею рідкого палива, що спричиняє збільшення маси рухомих частин газових форсунок та інерційності їх роботи.

При подачі до двигуна газового палива в рідкому стані вказані недоліки в значній мірі нівелюються. До суттєвих переваг впорскування зрідженого газу можна віднести відсутність редуктора-випаровувача як окремого агрегату системи живлення. Випаровування палива відбувається, залежно від схеми, безпосередньо у впускному колекторі або в камері згорання двигуна, що дозволяє за рахунок випарного охолодження повітря збільшити наповнення циліндрів двигуна [1]. В результаті вдається досягти енергетичних показників двигуна при живленні пропан-бутаном на рівні бензинового аналогу [2,3].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Схеми з впорскуванням зрідженого газу у впускний колектор в основному досліджувалися експериментальним шляхом [2-6], а основна увага в наведених роботах присвячена визначенню енергетичних та екологічних показників двигуна. При цьому, відзначається, що ефективність двигуна при роботі на зрідженому газі залежить не лише від його марки, а й від моменту та місця впорскування. В відомих джерелах відсутні узагальнюючі критерії та параметри щодо порівняння різних типів двигунів та способів впорскування.

Одним із таких параметрів є ступінь охолодження повітря у вхідному колекторі в результаті випаровування зрідженого газу, за допомогою якого можна оцінити покращення якості наповнення циліндрів свіжим зарядом. Зменшення температури вхідного заряду при впорскуванні зрідженого пропану в загальному випадку залежить від місця впорскування палива, витрат повітря та пропану (тобто від режиму роботи двигуна) та їх початкових температур. Зокрема в роботі [5] поряд з енергетичними характеристиками виконано заміри температури у вхідному колекторі в залежності від способу (одинарне чи повійне впорскування), моменту впорскування, обертів двигуна та його навантаження. При цьому показано, що температура повітря практично не залежить від режиму роботи двигуна та способу впорскування. Це говорить про високу інтенсивність протікання процесу, в результаті чого на нього впливають лише витрати та початкові параметри повітря та зрідженого газу, що дозволяє вирішувати дану задачу теоретичним методами. Відмічене дає можливість виконати оцінку впливу випарного охолодження в результаті впорскування зрідженого газу без проведення спеціальних складних стендових випробувань.

Метою статті є термодинамічний аналіз процесу охолодження вхідного повітря при впорскуванні зрідженого пропану у впускний колектор ДВЗ.

Аналіз процесу випаровування зрідженого пропану в повітряному потоці.

Свіжий заряд (у газоподібному стані) під час руху по впускній системі та всередині циліндру контактує з гарячими стінками і підігрівається на величину ΔT . Ступінь підігріву заряду залежить від швидкості його руху, тривалості впуску, а також від різниці температур стінки та заряду. При підвищенні температури знижується щільність заряду, тому надмірний підігрів негативно впливає на заповнення циліндру. З цієї точки зору вигідним є процес впорскування палива в рідкому стані у впускну систему двигуна, при якому надлишкова теплота використовується для випаровування палива.

Таким чином, приріст температури свіжого заряду можна записати як:

$$\Delta T = \Delta T_{\text{нід}} - \Delta T_{\text{вин}} \quad (1)$$

де $\Delta T_{\text{нід}}$ – підвищення температури свіжого заряду за рахунок теплообміну; $\Delta T_{\text{вин}}$ – зменшення температури свіжого заряду за рахунок випаровування палива. В загальному випадку ΔT може бути як додатнім, так і від'ємним.

При проведенні теплового розрахунку двигуна $\Delta T_{\text{нід}}$ приймають на основі наявних експериментальних даних та непрямих розрахунків. Як правило, $\Delta T_{\text{нід}} = 20 \dots 40$ °C [7].

Для визначення $\Delta T_{\text{вин}}$ в рівнянні (1) розглянемо процес впорскування зрідженого пропану в потік повітря у вхідному колекторі (рис.1). Для сталого режиму роботи двигуна процес, що розглядається, можна прийняти адіабатним та ізобарним.

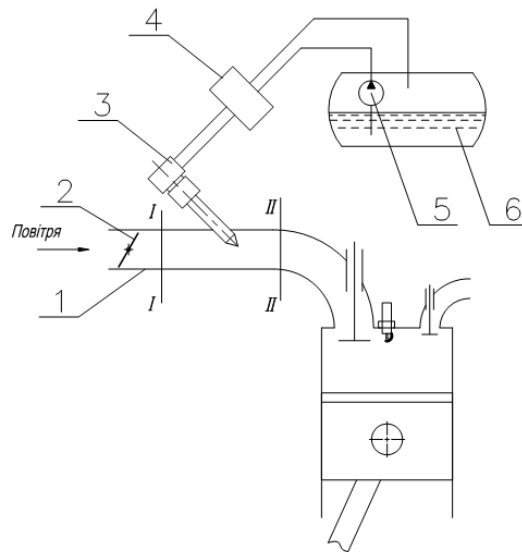


Рис.1 Принципова схема подачі зрідженого пропану

1 – впускний трубовід; 2 – дросельна заслінка; 3 – форсунка; 4 – регулятор тиску; 5 – паливний насос; 6 – бак з пропаном.

В такому процесі ентальпія паливо-повітряної суміші залишається постійною. Це впливає з Першого закону термодинаміки, який для газоповітряної суміші, що містить 1 кг повітря можна записати як:

$$dQ = dH_i - Vdp \quad (2)$$

Оскільки, в адіабатно-ізобарному процесі $dQ = 0$ та $dp = 0$, то з рівняння (2)

$$dH_i = 0 \quad (3)$$

Приріст ентальпії визначається за формулою

$$dH_i = C_i \cdot dT \quad (4)$$

де C_i – ефективна теплоємність, що визначає зміну ентальпії суміші на 1 кг повітря, кДж/кг_{пов.}

Для процесів, в яких відбувається фазовий перехід, суміш повітря та пропану неможна розглядати як механічну суміш газу, пари та рідини, як це прийнято для газових сумішей (тобто як сума добуток масової долі кожної складової на її питому теплоємність). Виражена таким чином теплоємність не відповідає фізичній суті цього поняття, так як при цьому не враховується тепло фазового переходу.

Тому для розглянутого ізобарного процесу ефективну теплоємність, що визначає зміну ентальпії газоповітряної суміші (на 1 кг повітря), можна записати у вигляді [8]:

$$C_i = \frac{dH_i}{dT} = c_p + h_n \cdot \frac{d(d_n)}{dT} \quad (5)$$

де c_p – питома ізобарна теплоємність суміші, кДж/(кг·К); h_n – ентальпія пропану, що знаходиться в суміші, кДж/кг; d_n – відносна кількість пропану в суміші (газовміст), кг/кг_{пов.}

В рівнянні (5) похідна $\frac{d(d_n)}{dT}$, що характеризує інтенсивність фазового переходу, залежить не тільки від умови $p = const$. На інтенсивність фазового переходу при постійному тиску буде впливати також додатковий параметр (в нашому випадку адіабатність процесу, $s = const$). Завдяки цьому, в загальному випадку, теплоємність суміші, в якій відбувається фазовий перехід, є функцією процесу.

Так як температура в процесі змінюється $dT \neq 0$, то для того, щоб виконувалася рівність (3) необхідно, щоб в рівності (4) ефективна теплоємність суміші, що складається з повітря ($c_p > 0$) та пропану, що випаровується $\left(h_n \cdot \frac{d(d_n)}{dT} < 0 \right)$, дорівнювала $C_i = 0$. З урахуванням рівності (5):

$$c_p = -h_n \cdot \frac{d(d_n)}{dT} \quad (6)$$

З фізичної точки зору це означає, що теплота на випаровування пропану повністю надходить від оточуючого повітря.

Отже, остаточно отримуємо:

$$\frac{d(d_n)}{dT} = -\frac{c_p}{h_n} \quad (7)$$

З рівняння (7) очевидно, що в адіабатно-ізобарному процесі ($p = \text{const}$, $s = \text{const}$) при подачі пропану в потік повітря ($d(d_n) > 0$) температура може лише знижуватися ($dT < 0$), тобто відбувається охолодження суміші.

Кількість тепла, що може бути витрачене на випаровування зрідженого пропану, залежить від теплоємності суміші в початковому стані. Тому можна прийняти, що $c_p = c_{p1} = \text{const}$. Ентальпію пропану (газу) в процесі випаровування в першому наближенні можна прийняти як середнє значення між початковим та кінцевим станом, тобто $h_n = \frac{h_{n1} + h_{n2}}{2} = \bar{h}_n$.

З урахуванням цього, розділивши змінні та проінтегрувавши вираз (7) отримуємо:

$$c_{p1} \cdot (t_1 - t_2) = \bar{h}_n \cdot (d_{n2} - d_{n1}) \quad (8)$$

Рівняння (8) встановлює зв'язок між зміною температури та вмістом газу (пропану) в суміші.

Особливості впорскування зрідженого пропану в потік повітря.

Якщо не враховувати теплообмін з навколишнім середовищем, то процес впорскування зрідженого пропану до впускного трубопроводу можна показати в діаграмі тиск-ентальпія (p-h діаграма) як відрізок AA₁BC (див. рис.2).

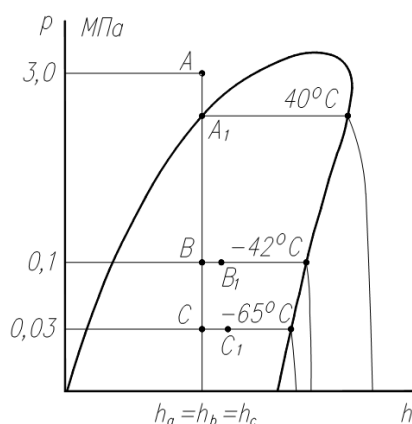


Рис.2 Процес впорскування зрідженого пропану в p-h діаграмі

Перед подачею на форсунку зріджений газ стискується, при цьому його параметри будуть відповідати точці А. Як відомо, процес розпилення через просту форсунку (дросель) наближено описується залежністю $dH = \text{const}$, тобто процес розпилення AA₁B(C) проходить по ізоентальпі. На рис.2 процес AA₁ – падіння тиску пропану в однофазному рідкому стані; A₁B(A₁C) – процес адіабатного випаровування пропану, перегрітого по відношенню до температури насичення при тиску у вхідному трубопроводі. Після виходу з форсунки відбувається різке падіння тиску до його значення у впускному трубопроводі (точка В). У зв'язку з тим, що точка В знаходиться в зоні вологої насиченої пари, зріджений газ на виході з сопла вибухово скипає [9-10], в результаті чого частина рідини переходить в газоподібний стан, а зріджений пропан різко охолоджується (спрацьоване падіння температури витрачається на зміну агрегатного стану). Далі утворені в процесі розпилення та вибухового скипання краплі пропану продовжують випаровуватися за рахунок охолодження повітря, що призводить до зміщення точки В(С) праворуч (в положення В₁ та С₁).

Таким чином, формування заряду можна умовно поділити на два етапи: 1) впорскування та 2) випарного охолодження, яке описується рівнянням (8).

На першому етапі відбувається подача зрідженого газу через форсунку. В процесі вибухового скипання рідини частина зрідженого пропану переходить в газоподібний стан, в результаті чого відбувається стрімке охолодження рідкої фази. На другому етапі утворені краплі зрідженого пропану випаровуються за рахунок охолодження повітря.

Оцінка ступеня охолодження повітря в результаті впорскування зрідженого пропану.

Для пропану (C₃H₈) стехіометричний склад паливоповітряної суміші складає 15,7 кг_{повітря}/кг_{пропан} [6, 11], тобто $d_{n2} = 1/15,7 = 0,06$ кг_{пропан}/кг_{повітря}. Прийемо температуру та тиск зрідженого пропану на вході в форсунку відповідно $t = 40$ °C, $p \approx 30$ МПа (точка А на рис.2). Температуру навколишнього повітря прийемо 15°C, а $\Delta T_{\text{від}} = 25$ °C. Тоді у впускному колекторі в зоні впорскування пропану $t_1 = 40$ °C, а тиск

залежить від режиму роботи двигуна. Розглянемо два випадки впорскування палива: при повному навантаженні ($p_{пов} \approx 1$ бар) та на режимі холостого ходу ($p_{хх} \approx 0,3$ бар).

1. *Випадок* $p_{пов} = 0,1$ МПа. З p-h діаграми [12] для прийнятих нами умов степінь сухості в кінці процесу впорскування дорівнює 0,45 (точка В, рис.2). Тобто 45% по масі зрідженого пропану (або 0,027 кг_{пропан}/кг_{повітря} для прийнятих нами даних) відразу перетворюється в газоподібний стан на виході з дросельного отвору форсунки. Цей процес відбувається за рахунок внутрішньої енергії пропану, в результаті чого решта 55% зрідженого пропану охолоджується приблизно до мінус 42 °С (температура фазового переходу для пропану при тиску 1 бар). Далі утворені в процесі впорскування краплі зрідженого пропану (55% по масі) випаровуються та приймають температуру суміші. Цей процес відбувається за рахунок відбору теплоти від потоку повітря.

В рівнянні (8) невідомими величинами є температура суміші в кінці процесу (t_2) та середня ентальпія пропану в процесі (\bar{h}_n), при цьому $\bar{h}_n = f(p_2 = const, t_2)$ [6]. Приймаючи, що $c_{p1} = 1$ кДж/кг отримуємо:

$$1 \cdot (40 - t_2) = \bar{h}_n \cdot (0,06 - 0,027)$$

Найпростіше таке рівняння розв'язується методом послідовних наближень. В результаті отримуємо $t_2 = 22$ °С.

2. *Випадок* $p_{пов} = 0,03$ МПа. З p-h діаграми [12] для прийнятих нами умов степінь сухості в кінці процесу впорскування дорівнює 0,55 (точка С, рис.2). Тоді рівняння (8) має вигляд:

$$1 \cdot (40 - t_2) = \bar{h}_n \cdot (0,06 - 0,033)$$

В результаті отримуємо $t_2 = 25$ °С.

Зниження температури заряду суттєво впливає на коефіцієнт наповнення. Так, охолодження суміші на 20 градусів дозволяє збільшити наповнення циліндру приблизно на 5% [7]. Таким чином, застосування системи живлення з впорскуванням зрідженого пропану дозволяє без конструктивних змін двигуна покращити його енергетичні показники.

Висновки

1. Проведене аналітичне дослідження дозволяє розрахувати ступінь охолодження вхідного повітря при впорскуванні зрідженого пропану в впускний колектор ДВЗ, що є необхідною складовою при розробці та переобладнанні цих систем живлення.
2. Запропонована методика розрахунку дозволяє також розраховувати термодинамічні процеси сумішоутворення при впорскуванні зріджених газів безпосередньо до камери згорання ДВЗ.
3. Наведена методика розглядає процес як рівноважний. Питання впливу нестационарності реальних процесів буде розглянуто в наступних публікаціях.
4. Застосування системи живлення з впорскуванням зрідженого пропану дозволяє без конструктивних змін двигуна покращити наповнення його циліндрів на 4...5%, що призводить до росту потужності двигуна.

Список літератури

1. <http://www.vialle.nl/>
2. Lejda K. Problemy zasilania wtryskowego ciekłym LPG w silnikach o zapłonie iskrowym / K.Lejda, A. Jaworski // ARCHIWUM MOTORYZACJI. – 2009. – №1. – pp. 47-65.
3. Jaklinski P. The effect of LPG injector position on the SI engine operation / P.Jaklinski, L.Grabowski, M.Wendeker, J.Czarnigowski, P.Szczesny, G.Baranski, R.Sochaczewski // COMBUSTION ENGINES. – 2007. – №4(131). – pp.33-41.
4. Buczaj M. Kształtowanie się cen paliwa lpg oraz ich zmienność w porównaniu z paliwem U95 w latach 2002-2011 // TECHNIKA TRANSPORTU SZYNOWEGO. – 2012. – №5. – pp.1695-1702.
5. Lejda K. The effect of injection timing parameters for liquid LPG fuel on selected operating parameters of the internal combustion engine / K. Lejda, A. Jaworski, A.Ustrzycki // COMBUSTION ENGINES. – 2007. – №3(130). – pp.16-26.
6. Piątkowski P. Testing of Ecological Properties of Spark Ignition Engine Fed with LPG Mixture / P. Piątkowski, T. Bohdal. // Rocznik Ochrona Środowiska. – 2011. – T13. – pp.607-618.
7. Автомобильные двигатели / Под общ. ред. Ховаха М.С. – М.: Машиностроение. – 1967. – 496 с.
8. Михайловский Г.А. Термодинамические расчеты процессов парогазовых смесей. – М.:Машгиз. – 1962. – 184с.
9. Соломаха А.С. Експериментальне дослідження розпилення перегрітої води // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2013. – №1/8(61). – с.20-25
10. Дикий М.О. Тепломасообмін при випаровуванні крапель перегрітої води в повітряному потоці / М.О.Дикий, А.С.Соломаха., В.Г.Петренко // Водний транспорт. – 2013. – №2(17). – с.18-24.
11. Биков Г.О. Автомобільні газонаповнювальні компресорні станції / Г.О.Биков, К.І.Капітанчук, М.С.Кулик, І.О. Орлов. – К.: Книжкове вид-во НАУ. – 2006. – 292с.

12. Стаскевич Н.Л. Справочник по сжиженным углеводородным газам / Н.Л.Стаскевич, Д.Я.Вигдорчик. – Л. Недра, 1986. – 543 с.

V. Petrenko, A. Solomakha, P. Barabash

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE PROCESS RELATED TO LIQUEFIED PROPANE INJECTION TO INTERNAL COMBUSTION ENGINE

The paper is dedicated to a research into the process of liquefied gas injection to the inlet manifold of the internal combustion engine working on a steady-state mode from a perspective of classical thermodynamics. There has been developed a method for calculating the parameters of the gas-air mixture depending on initial parameters of air and liquefied petroleum gas – (LPG) at the engine inlet. The process of evaporation of liquefied propane, being injected to the inlet pipe of the internal combustion engine, has been reviewed. The influence of injected liquefied propane on the temperature of the charge and the cylinder filling, and therefore, on the engine energy performance has been shown. There have been done calculations for the two modes of the engine operation – full load and idle modes.

Key words: internal combustion engine, liquefied petroleum gas (LPG), gas fuel system for ICE.

1. <http://www.vialle.nl/>
2. Lejda K. Problemy zasilania wtryskowego ciekłym LPG w silnikach o zapłonie iskrowym / K.Lejda, A. Jaworski // ARCHIWUM MOTORYZACJI. – 2009. – №1. – pp. 47-65.
3. Jaklinski P. The effect of LPG injector position on the SI engine operation / P.Jaklinski, L.Grabowski, M.Wendeker, J.Czarnigowski, P.Szczesny, G.Baranski, R.Sochaczewski // COMBUSTION ENGINES. – 2007. – №4(131). – pp.33-41.
4. Buczaj M. Kształtowanie się cen paliwa lpg oraz ich zmienność w porównaniu z paliwem U95 w latach 2002-2011 // TECHNIKA TRANSPORTU SZYNOWEGO. – 2012. – №5. – pp.1695-1702.
5. Lejda K. The effect of injection timing parameters for liquid LPG fuel on selected operating parameters of the internal combustion engine / K. Lejda, A. Jaworski, A.Ustrzycki // COMBUSTION ENGINES. – 2007. – №3(130). – pp.16-26.
6. Piątkowski P. Testing of Ecological Properties of Spark Ignition Engine Fed with LPG Mixture / P. Piątkowski, T. Bohdal. // Rocznik Ochrona Środowiska. – 2011. – T13. – pp.607-618.
7. Avtomobilniye dvigateli / Pod obsch. red. Khovakha M.C. – M.: Mashinostroeniye. – 1967. – 496 s.
8. Mikhayilovskiy G.A. Termodinamicheskiye rascheti protsessov parogazovikh smesey. – M.: Mashgiz. – 1962. – 184s.
9. Solomakha A.S. Eksperymentalne doslidzhennya rozpylennya peregritoyi vody // Skhidno-eyuropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2013. – №1/8(61). – s.20-25.
10. Dikiy M.O. Teplomasoobmin pry vyparovuvanni krapel peregritoyi vody v povitryanomu pototsi / M.O. Dikiy, A.S. Solomakha, V.G. Petrenko // Vodnyi transport. – 2013. – №2(17). – s.18-24.
11. Bykov G.O. Avtomobilni gazonapovnyvalni kompresorni stantsiyi / G.O. Bukov, K.I. Kapitanchuk, M.S. Kulyk, I.O. Orlov. – K.: Knyzhkove vud-vo NAU. – 2006. – 292s.
12. Staskevich N.L. Spravochnik po szhizhennym uglevodorodnym gazam / N.L.Staskevich, D.Y. Vigdorchik. – L.: Nedra, 1986. – 543 s.

УДК 621.43.016.7

В.Г. Петренко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

А.С. Соломаха, канд. техн. наук; П.О. Барабаш, канд. техн. наук, доцент

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВПРЫСКА СЖИЖЕННОГО ПРОПАНА В ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Работа посвящена исследованию процесса впрыска сжиженного газа в впускной коллектор двигателя внутреннего сгорания на установившемся режиме работы с позиций классической термодинамики. Разработана методика расчета параметров газозооной смеси в зависимости от начальных параметров воздуха и сжиженного газа на входе в двигатель. Рассмотрен процесс испарения сжиженного пропана после его впрыска во впускной трубопровод двигателя внутреннего сгорания. Показано влияние впрыска сжиженного пропана на температуру заряда и на наполнение цилиндра и, соответственно, на энергетические показатели двигателя. Выполнен расчет для двух режимов работы двигателя - на полной нагрузке и в режиме холостого хода.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, сжиженный нефтяной газ, газовая система питания двигателя.

Надійшла 12.04.2015

Received 12.04.2015

МОДИФІКОВАНІ СХЕМИ РОЗРАХУНКУ НОРМОВАНОЇ ЦІНИ ВИРОБНИЦТВА В ЗАДАЧАХ ДЕТЕРМІНОВАНО- СТОХАСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НОВИХ ЕЛЕКТРОГЕНЕРУВАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

Розглядаються практичні аспекти застосування схем розрахунку оцінок техніко-економічних показників електрогенерувальних установок з відновлюваними джерелами енергії за принципом середньозваженої (нормованої) ціни виробництва – для умов їх функціонування, передбачених українським законодавством. Невизначеність прогнозних технічних і вартісних оцінок показників за проектом спорудження сонячно-фотоелектричної станції (СФЕС) в Україні, яку пов'язують із використанням традиційного детермінованого підходу, запропоновано знизити шляхом програмно-аналітичного врахування мінливих технологічних і економічних показників через параметри керованого розподілу їх випадкових значень в структурі детерміновано-стохастичних економіко-математичних розрахункових моделей. Наведено приклади розв'язання задач для СФЕС методами Монте-Карло (MCSim) й точкового оцінювання (PEsM). Чисельні результати моделювання є придатними для співставлення й використання у подальшому для розв'язування складніших оптимізаційних задач.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, розрахунок нормованої ціни, життєвий цикл, детерміновано-стохастична модель, ймовірнісні методи, дисперсійний аналіз.

У дослідженнях [1-3] техніко-економічних показників енергопостачальних систем з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) застосовано розрахункові моделі за схемою визначення нормованої ціни виробництва енергії (фактично, середньозваженої собівартості – *Levelised Energy Cost*; для позначення й артикуляції вживають акронім *LEC*, також *LCOE* – *Levelised Cost of Electricity*). Поширеним є вжиток поняття «моделі життєвого циклу» для позначення розрахункових схем, кінцевою метою застосування яких є отримання прогнозних значень обсягів та цінних оцінок технологічних об'єктів енергетики. Економіко-математичні моделі, побудовані на основі поняття життєвого циклу, є придатними для розв'язання задач техніко-економічного аналізу об'єктів енергетики на «постанційному» рівні й мають подальшу перспективу застосування у поєднанні зі складними ринковими моделями балансового типу, призначеними для дослідження проблем секторального рівня економіки [4].

Метою цієї роботи є продемонструвати можливості детермінованих та детерміновано-стохастичних моделей енергетичних устав для обчислення уточнених оцінок обсягів і собівартості електрогенерування, а також цін на вироблену електроенергію за умов застосування шкали «зелених тарифів», встановлених в Україні для сонячних фотоелектричних станцій середньої потужності, зокрема.

Особливості аналітичних записів моделі «життєвого циклу». Центральна постановка задачі побудови такої розрахункової моделі, яку формулюють для вичерпного аналізу прогнозних техніко-економічних показників енергетичного об'єкта, полягає у забезпеченні значення кумулятивного доходу від збуту виробленої енергії через розрахунок її нормованої ціни $L(\tau)$ у розрізі по періодах життєвого циклу об'єкта (життєвий цикл становить n таких періодів з номером τ , $\tau = \overline{1, n}$) – за дотримання певних значень показника внутрішньої ставки дохідності *IRR* (*Internal Rate of Return*). В контексті інвестиційних задач показник *IRR* також іменують внутрішньою ставкою дохідності на дисконтований грошовий потік – *DCFROR*, або просто *ROR* – *Rate of Return* [4].

Практикою застосування модельних конструкцій для розрахунків за схемою *LEC* [5] продемонстровано можливості отримання прогнозних оцінок нормованої собівартості електроенергії для традиційних і нових технологій. Загалом різні (з огляду на широке число проектних реалізацій) результати відображають специфіку поглядів авторів-дослідників щодо умов локальних ринків, оскільки конкретний запис моделі залежить від ступеню деталізації наявних даних про умови функціонування досліджуваних об'єктів, що проектуються або вже функціонують. Певна невизначеність щодо прогнозних техніко-економічних показників, неточності та відмінності проектних реалізацій зумовлює необхідність подання вартісних оцінок у межах їх ймовірнісних інтервалів [6].

Більшість якісних досліджень, опублікованих протягом 2010-2013рр., містять застереження вступного розділу, де ретельно зазначено правила й економічні умови, за яких виконано співставні

техніко-економічні розрахунки [7, 8], також зазначено перелік джерел використаної статистичної інформації економічного змісту. Зазвичай дослідники наголошують на обов'язковості застосування ринкових процедур щодо визначення усіх компонентів вартості виконуваних робіт на всіх стадіях проекту, починаючи з особливостей вибору земельної ділянки – з урахуванням необхідності її підготовки, утилізації залишків існуючих конструкцій у разі потреби, щорічної плати за землекористування. До проектної вартості включають розрахункові оцінки витрат на проектування, постачання обладнання; на будівельно-монтажні роботи з урахуванням умов роботи персоналу компанії-забудовника, на експлуатаційний супровід протягом гарантійного терміну. Аналізують умови післягарантійного обслуговування, рівень і порядок оплати праці – закінчуючи умовами страхування різноманітних ризиків тощо. Додаткові витрати власника, пов'язані з під'єднанням об'єкта до розподільної мережі, управління проектом спорудження, витрати початкового періоду і матеріально-технічне забезпечення (запасні частини, технологічні рідини тощо) зазвичай не охоплюють проектним кошторисом [6].

Особливо важливим чинником, який впливає на достовірність отриманих техніко-економічних оцінок, є коректність припущень щодо поведінки фінансово-економічної системи (державної, світової). Втім, попри те, що для обчислення грошових потоків протягом життєвого циклу енергетичного об'єкта ці моделі охоплюють прогностичні облікові дані про більшість передбачених розробником господарських операцій пов'язаних з і спорудженням і експлуатацією об'єкта, за структурою ці моделі зазвичай є однопродуктовими, відтак значно простішими для практичних інженерних оцінок, порівняно з багатодуктовими оптимізаційними моделями балансового типу [9].

В моделях використовуються такі терміни для позначення вартості грошей і, відповідно, цін: *дійсні* і *номінальні*. «Дійсні» відображають реальну поточну спроможність (силу) грошових потоків у незмінній (фіксованій) валюті. «Номінальні» – враховують підвищення цін на товари і послуги в часі, тобто цінову «ескалацію». У разі, якщо розрахунки здійснюються у грошових одиницях валюти, яка має дійсну вартість, на відміну від номінальної, значення відсоткової дохідності капіталу так само мають бути дійсними («очищеними» від ескалації, зумовленої інфляційними явищами). Дійсні відсоткові ставки ніколи «не спостерігаються» – вони визначаються на підставі співвідношення:

$$(1 + R) = (1 + r) \times (1 + i), \quad (1)$$

де застосовані позначення: $R, \%$ – номінальна ставка (дисконт, або середня кредитна ставка, за якою банківська установа може надати позику), r – дійсна чи фіксована ставка, $i, \%$ – показник ескалації цін (або ж темп інфляції, зумовлений зростанням споживчих цін і/або цін промислових виробників – у подальшому «інфляція»). Значення ставок у виразі (1) обчислюють у відносних одиницях, задають у %.

Середньозважену собівартість виробленої енергії $LCOE$ (L_{COE}) визначають в термінах поточної (фіксованої на дату приведення) вартості грошей PV (*Present Value*) для номінального значення потужності GW енергоустанови з урахуванням розрахункових значень коефіцієнта використання встановленої потужності C_{ft} (КВВП) для кожного планового року t : \Leftrightarrow т експлуатації об'єкта електрогенерації. Для цього розглядають рівняння балансу сумарних приведених грошових потоків надходжень і витрат, записане для розрахункового (прогностичного) терміну експлуатації тривалістю n років:

$$PV_{revenue} = PV_{cost}, \quad t = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Розрізняють три окремі визначення оцінок нормованої ціни, які однаково успішно застосовують для побудови моделей за схемою $LCOE$, відтак ці визначення потребують правильного тлумачення у записих модельних конструкцій, використаних для співставлення числових результатів моделювання:

1) оцінка *номінальної* нормованої ціни. Всі витратні компоненти PV_{cost} визначають у номінальній вартості грошей з урахуванням уявлень щодо прогностичних річних рівнів інфляції. Вираз для визначення нормованої ціни (сталого значення для всіх періодів t циклу) з врахуванням (2) отримують у вигляді:

$$L_{COE} = PV_{cost} \left/ 8760 \cdot GW \cdot \sum_t \frac{C_{ft}}{(1 + R)^t} \right., \quad (3)$$

причому для приведення грошових потоків до обраної дати застосовують номінальне значення дисконту R .

2) оцінка *дійсної* нормованої ціни – також є сталим значенням для всіх періодів t циклу. Щорічні експлуатаційні витрати $C_t^{O\&M}$ в структурі витратних компонент PV_{cost} визначають у дійсній вартості грошей на дату приведення вартості за рівнянням (2), тобто «очищеними» від інфляції $i \neq 0, \%$. Для цього номінальні прогностичні значення компонент $C_t^{O\&M}$ записують через їх дійсні прогностичні значення у t -му році експлуатації, застосувавши множник $(1 + i)^t$:

$$PV_{\text{cost}} = C^{\text{cap}} + \sum_t^n C_t^{\text{O\&M}} \left[\frac{1+i}{1+R} \right]^t = C^{\text{cap}} + \sum_t^n \frac{C_t^{\text{O\&M}}}{(1+r)^t}, \quad (4)$$

де r – дійсна ставка дисконту, %, визначається за співвідношенням (1); C^{cap} – загальна сума капітальних витрат на проектування будівництво й монтаж об'єкта, з урахуванням обслуговування заборгованості за користування банківською позикою. Нормовану ціну визначають за виразом (3) з урахуванням (4), причому в (3) слід прийняти $R = r$.

3) оцінка *номінальної* нормованої ціни, отриманої на основі фіксованої *дійсної* з урахуванням дії інфляційних чинників. Для її розрахунку поточні експлуатаційні витрати $C_t^{\text{O\&M}}$ враховують з показником річної інфляції $i \neq 0$ в термінах номінальної вартості грошей:

$$L_t = L_{\text{COE}} \cdot (1+i)^t, \quad (5)$$

Значення нормованої ціни для випадку врахування явища поступової деградації продуктивності установки (ефективну потужність диференційовано за роками) обчислюють безпосередньо за виразом

$$L_{\text{COE}} = PV_{\text{cost}} / 8760 \cdot \sum_t^n \frac{GW_t \cdot C_{ft}}{(1+r)^t}. \quad (6)$$

У виразах (3)–(6) особливу увагу слід приділити порядкові визначення показника C^{cap} , встановивши дату приведення грошових потоків (наприклад такою, що відповідає проектній даті початку експлуатації об'єкта, [1, 2]).

На рис. 1 зображено криві нормованої ціни на електроенергію для певних умов ринку електроенергії (ставки дисконтування $R = 10,0\%$, середнє значення інфляції $i=2,5\%$), які графічно пояснюють зміст наведених визначень нормованої ціни. Шкали дійсної і номінальної вартостей співпадають.



Рис. 1 Графічна ілюстрація вживаних визначень нормованої ціни

Приклад 1. Вартісні оцінки технологій сонячної фотоелектричної станції (СФЕС) за детермінованою моделлю з урахуванням прогностичних економічних показників. З метою формування розв'язків детермінованої моделі гіпотетичного об'єкта, оберемо енергетичну установку типу «СФЕС, змонтована на даху» потужністю $1,0 \text{ МВт}_{\text{пнк}}$, яка спроектована з урахуванням економічних умов господарювання в Україні, зокрема для розташування у межах географічних широт міста Києва.

Техніко-економічні й вартісні показники СФЕС, взяті до розрахунків як орієнтовні прогностичні номінальні значення на основі ринкових цінових пропозицій на обладнання і вартість послуг з монтажу і обслуговування, з використанням фотоелектричних модулів СФЕМ на основі полікристалічного та монокристалічного кремнію [7, 8].

Серії значень нормованої ціни на електроенергію та кумулятивного грошового потоку отримані в результаті варіантних розрахунків для різних значень капітальних витрат та дисконту – з урахуванням витрат на обслуговування банківської позики протягом п'яти років за схемою щорічних виплат рівними частками, шляхом ануїтетних платежів. Прийнято, що експлуатація СФЕС розпочинається у 2015-му році, амортизаційні відрахування за основними засобами здійснюється прямолінійним методом [8], а ціну збуту електроенергії СФЕС до оптового ринку електроенергії встановлено на рівні «зеленого» тарифу, передбаченому законодавством України (у подальшому – «ЗУ»).

Для аналізу динаміки грошових потоків в номінальних грошах обрано запис моделі на основі виразів (5)-(6). Цінові оцінки виконані для розрахункового терміну експлуатації $n = 20$ років, за середнього протягом цього терміну інфляції $i = 4,0\%$ і номінального дисконту $R=14\%$ та вартості банківської позики $RD=9,0\%$; значення «зеленого» тарифу на електроенергію наземних СФЕС в Україні зображено верхніми кривими: ступінчаста для випадку застосування певного алгоритму зміни у часі (регулювання) коефіцієнта зеленого тарифу для обраного типу СФЕС).

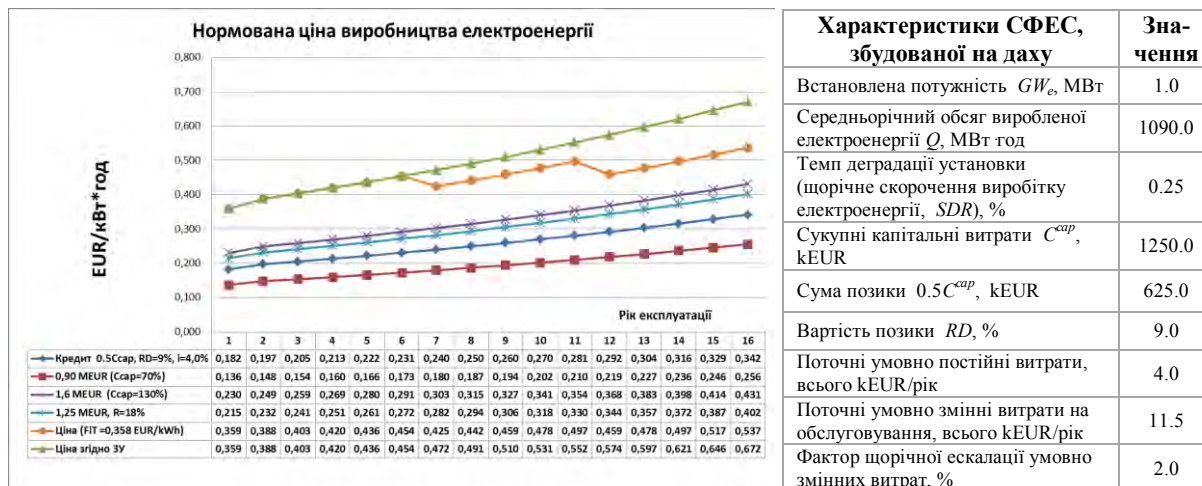


Рис. 2 Розрахункові нормовані ціни електроенергії СФЕС і параметри моделі

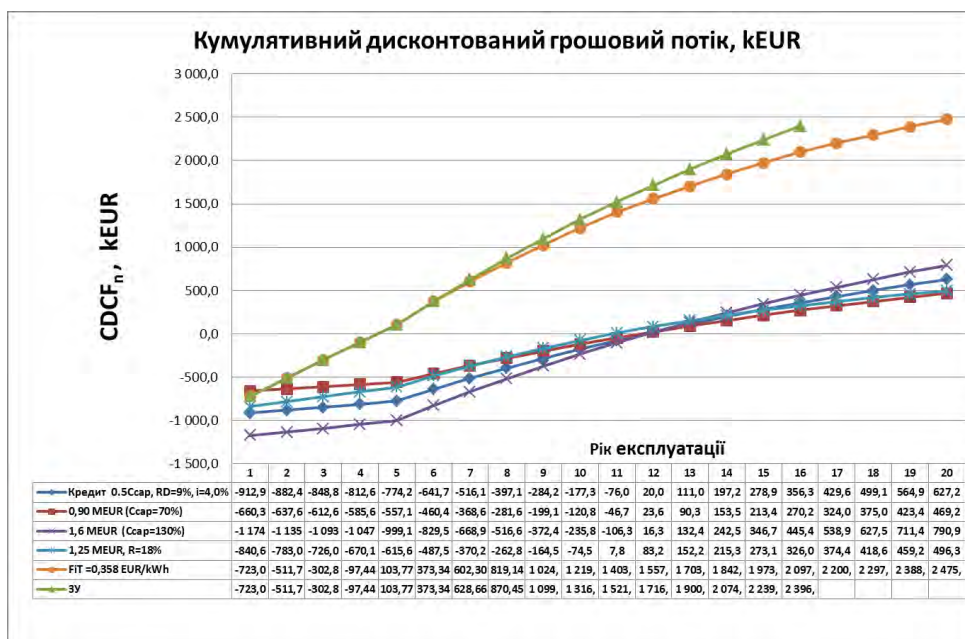


Рис. 3 Розрахункові криві кумулятивного дисконтованого грошового потоку

Насамперед, на рис. 2 зображено криві розрахованих нормованих цін: перші чотири серії – нормована собівартість; наступні дві – нормовані ціни, причому остання – за умови збуту на рівні зеленого тарифу згідно ЗУ. В таблиці рис. 2 наведено основні розрахункові показники детермінованої моделі. Відповідні криві приведених кумулятивних грошових потоків ($CDCF_n$ – *Cumulated Discounted Cash Flows*), сформованих від збуту виробленої електроенергії протягом n років за цінами рис. 2 зображено на рис. 3.

Поверхневий аналіз динаміки розрахованих грошових потоків свідчить про високу дохідність проекту (фактично, на рівні надприбутків), відтак принципово постає питання можливості застосування раціонального регулювання коефіцієнтів зеленого тарифу для технології електрогенерування СФЕС вже починаючи з п'ятого року періоду експлуатації [2]. Зображена на рис. 3 крива, що відповідає деякому способу м'якого регулювання дохідності за проектом шляхом періодичного ступінчастого зниження

пільгового тарифу (рис.2), фіксує той факт що скупний дохід отриманий від збуту за діючим зеленим тарифом (ЗУ) протягом 16-и років є так само досяжним наприкінці повного життєвого циклу СФЕС (розрахунковий термін експлуатації становить $n=20$ років).

Детермінована модель СФЕС, числові результати розрахунків за якою подані вище, не відображає повною мірою фінансових ризиків інвестора, відтак породжує сумніви щодо успішності проекту за умов підвищеної волатильності фінансових показників в умовах загострення економічної кризи в Україні. Це логічно пов'язується із використанням в модельних записах детермінованої моделі фіксованих розрахункових значень технологічних параметрів, які в дійсності мають *мінливий характер*, зумовлений примхами природи чи вадами прогнозних оцінок щодо вартісних показників компонентів електрогенерувальної системи.

Детерміновано-стохастичні економіко-математичні моделі життєвого циклу із використанням ймовірнісних методів. Ймовірнісні методи слушно пов'язують з методологічною основою стохастичного факторного аналізу, зокрема дисперсійного й кореляційного аналізу [10,11].

За цією методологією побудова моделі зводиться до запису функції n випадкових значень розрахункових параметричних змінних (параметрів) $y_m = f(X)$, причому X – вектор, що містить мінливі (слабко обумовлені) параметри у вигляді множини: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, а функція щільності розподілу (у подальшому – “PDF” – *Probability Density Function*) для вектора X є відомою.

Функція y_m може бути задана неявно, наприклад реалізована шляхом структурованих записів у табличному процесорі з метою подальших аналітичних досліджень, наприклад, методом дисперсійного аналізу. В загальному випадку функція y_m є векторною, і тоді шуканий вектор змінних Y_m є таким що містить довільне число компонент – розрахункових змінних детерміновано-стохастичної моделі (ДСМ):

$$Y_m = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}.$$

Задача полягає у знаходженні функцій PDF для y_m , або обмежується обчисленнями стандартних параметрів розподілу, якщо кількість ітерацій є достатньо великою відповідно до закону великих чисел [11].

Метод Монте-Карло (*Monte Carlo Simulation*, у подальшому – *MCSim*). Для спрощення викладу обмежимося розглядом одновимірної функції $y_m = y$. Розрахунковий процес за цим методом достатньо просто реалізувати за таким покроковим алгоритмом:

Крок 1. Встановити початкове значення лічильника ітерацій $k = 1$.

Крок 2. Здійснити вибірки для компонент вектора X з використанням PDF для кожного компонента x_i .

Крок 3. Розрахувати значення функції y_k на кроці k для вектора $X = X_k$:

$$y_k = f(X_k).$$

Крок 4. Розрахувати очікуване значення Y як середнє (математичне очікування), також середньоквадратичне відхилення значень функції y для всіх попередніх ітерацій $Y = \{y_k | k = 1, 2, \dots\}$:

$$M(y) = (1/k) \sum_k y_k, \quad \sigma(y) = M(Y^2) - M^2(Y). \quad (7)$$

Крок 5. Перевірити умову завершення ітераційного процесу. Такою умовою може бути число виконаних ітерацій n порівняно із попередньо заданим, зокрема. Для продовження ітераційного процесу: збільшити значення лічильника на «1»: $k = k + 1$, перейти до Кроку 2.

Крок 6. Завершення процесу.

Критерієм завершення ітераційного процесу пошуку для задач цього дослідження є задана кількість ітерацій стохастичного процесу (числа розрахункових значень $y_k, k = \overline{1, n}$).

В якості компонент вектора розрахункових змінних детерміновано-стохастичної моделі СФЕС обираємо значення цінних оцінок за схемою нормованої ціни: собівартості, обчислені з врахуванням особливостей структури обліку нормованих витрат, а також тарифної ціни на вироблену електроенергію СФЕС.

Метод Монте-Карло підтримує всі можливі форми функцій щільності розподілу PDF параметрів моделі і ця властивість є однією з його вагомих переваг, адже фізико-технічні параметри енергоустанов на основі ВДЕ можуть набувати випадкових значень, розподілених довільно (криві їх PDF-функцій можуть мати будь-яку форму в загальному випадку). В інженерній практиці найчастіше описують статистичні властивості техніко-економічних показників з використанням *несиметричних* розподілів: із «трикутною» формою функції щільності розподілу або з несиметричною формою функції щільності типу *PERT-*

розподілу (версія Бета-розподілу [12]). Обидва види згаданих несиметричних розподілів задаються трьома характерними значеннями випадкової величини (мінливого показника): його мінімальним і максимальним значеннями, які відповідають нульовій щільності ймовірності реалізацій випадкового процесу, і найбільш очікуваним (бажаним) значенням x_0 , якому відповідає максимальне значення функції PDF – щільності розподілу випадкових значень мінливого показника.

Значення ймовірності реалізації випадкового значення параметра моделі з несиметричною формою одновимірної функції щільності отримуємо, застосовуючи *метод зворотного перетворення*. Відомо, що для двох довільних розподілів імовірності справедливим є співвідношення:

$$\xi_2 = \Pi_2^{-1}(\Pi_1(\xi_1)), \quad (8)$$

де $\Pi_1(\xi_1)$ – відомий закон розподілу випадкового значення ξ_1 ; $\Pi_2^{-1}(p)$ – функція обернена до $\Pi_2(\xi_2)$, p – ймовірність набуття параметром випадкового значення ξ . У разі, якщо перший (відомий) закон розподілу є *рівномірним*, тобто, $\Pi_1(\xi) = \xi \quad \forall \xi \in [0,1]$, отримуємо:

$$\xi_2 = \Pi_2^{-1}(\xi). \quad (9)$$

Тут функція $\Pi_2^{-1}(\xi)$ є такою, що $\Pi_2^{-1}(\Pi_2(\xi)) = \xi$.

Зокрема, для параметра x з «трикутною» формою PDF -функції (див. рис. 4, де несиметричну PDF -форму щільності утворено двома прямими лініями, які формують вершину PDF -функції для найбільш очікуваного значення x_0) за цим методом знайдемо значення його ймовірності $s_{\Delta}(p)$ через ймовірність його рівномірного розподілу $p \in [0, 1]$ за наступними виразами:

$$s_{\Delta}(p) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{1+c/a} \cdot p} & \forall p \in [0, t_0]; \\ 1 - \sqrt{\frac{c/a}{1+c/a} \cdot (1-p)} & \forall p \in]t_0, 1]. \end{cases} \quad (10)$$

Відповідно до позначень, прийнятих на рис. 4, для показника x , випадкові значення якого описуються $PERT$ -розподілом (його несиметричну функцію щільності PDF утворено двома відтинками кривих нормального розподілу з різними параметрами, що визначаються в процесі зворотного перетворення), отримуємо ймовірності $s_{PERT}(p)$ у вигляді:

$$s_{PERT}(p) = \begin{cases} \frac{1 + \frac{1}{3} \cdot \Phi^{*-1}(1 + \tilde{p} - \Phi^*(3))}{(1+c/a)} & \forall p \in [0, t_0]; \\ \frac{1 + \frac{1}{3} \cdot c/a \cdot \Phi^{*-1}\left[\frac{1}{2} + \frac{1}{c/a} \cdot \left(\tilde{p} - \left(\Phi^*(3) - \frac{1}{2}\right)\right)\right]}{(1+c/a)} & \forall p \in]t_0, 1], \end{cases} \quad (11)$$

де $\Phi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{\xi^2}{2}} d\xi$ – функція Лапласа із відомими властивостями [11]; $\tilde{p} = \frac{p}{2}(1+c/a)$.

Справедливість записаних співвідношень легко перевірити застосувавши підстановку виразу для оберненого перетворення: $x(t) = (x_0 - a) + (c + a)t, \quad \forall t = [0, 1]$.

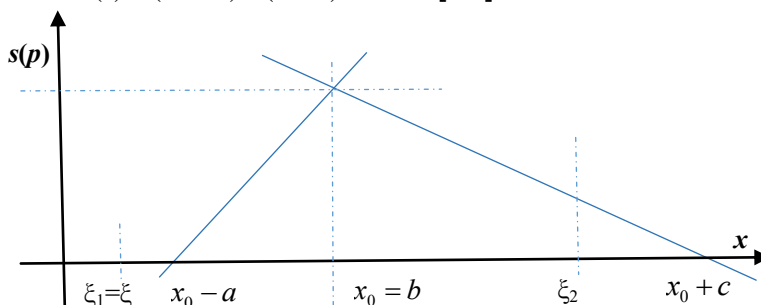


Рис. 4 Визначення ймовірності реалізації ξ_2 випадкового параметра x з кусково-лінійною («трикутною») формою PDF -функцією щільності розподілу через його рівномірно розподілене значення $\xi_1 = \xi$.

Метод точкового оцінювання. В спеціальній літературі відомий як *Point Estimate Method* (у подальшому – *PEsM*). Метод *PEsM* дозволяє отримати розрахункові значення середнього значення $M(y)$ та середнього квадрата $M(y^2)$ невідомої змінної y шляхом адитивної процедури за $2n$ кроків і є реалізацією методу моментів, запропонованого К. Пірсоном [13].

Метод точкового оцінювання формалізують з використанням записів для областей імовірних значень $\gamma_{\zeta,i}$ та ймовірних концентрацій $\pi_{\zeta,i}$ з використанням значень третього моменту $M_3(x_{\zeta})$ для кожного невизначеного параметра x_{ζ} ; причому $i=1,2$. Алгоритм розрахунків є таким:

Крок 1. Початкові умови: $M(y) = M(y^2) = 0$, $\zeta = 1$, причому $\zeta = \overline{1, n}$.

Крок 2. Визначення областей імовірних значень $\gamma_{\zeta,i}$ та ймовірних концентрацій $\pi_{\zeta,i}$:

$$\gamma_{\zeta,i} = \frac{M_3(x_{\zeta})}{2\sigma_{x_{\zeta}}^3} + (-1)^{i+1} \sqrt{n + \frac{1}{2} \left(\frac{M_3(x_{\zeta})}{2\sigma_{x_{\zeta}}^3} \right)^2}, \quad \pi_{\zeta,i} = (-1)^i \frac{\gamma_{\zeta,3-i}}{2n \sqrt{n + \frac{1}{2} \left(\frac{M_3(x_{\zeta})}{2\sigma_{x_{\zeta}}^3} \right)^2}}, \quad (12)$$

де $M_3(x_{\zeta})$ – момент третього порядку параметра x_{ζ} .

Крок 3. Визначити множину точок концентрації $x_{\zeta,i}$ за виразом:

$$x_{\zeta,i} = \mu_{x_{\zeta}} + \gamma_{\zeta,i} \cdot \sigma_{x_{\zeta}}, \quad i = 1, 2, \quad (13)$$

де $\mu_{x_{\zeta}}$ і $\sigma_{x_{\zeta}}$ – задані середнє значення й стандартне середньоквадратичне відхилення параметра x_{ζ} , відповідно; причому для більшості реальних фізичних систем варіації компонент вектора параметрів $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{\zeta,i}, \dots, x_n\}$, $i = 1, 2$ мають бути невід’ємними: $x_{\zeta,i} \geq 0$.

Крок 4. Розрахувати математичні очікування $M(y)$ і $M(y^2)$ за виразами:

$$M(y) = M(y) + \sum_{i=1}^2 \pi_{\zeta,i} f(x_1, x_2, \dots, x_{\zeta,i}, \dots, x_n), \quad (14)$$

$$M(y^2) = M(y^2) + \sum_{i=1}^2 \pi_{\zeta,i} \cdot f^2(x_1, x_2, \dots, x_{\zeta,i}, \dots, x_n). \quad (15)$$

Крок 5. Змінити номер невизначеного параметра $\zeta = \zeta + 1$; якщо $\zeta < n$, повернутись до Кроку 2, інакше продовжити і перейти до Кроку 6.

Крок 6. Розрахувати середнє значення змінної y та її середньоквадратичне відхилення:

$$\mu_y = M(y), \quad \sigma_y = \sqrt{M(y^2) - M^2(y)}. \quad (16)$$

Алгебраїчні вирази для обчислення моментів несиметричного розподілу «трикутної» форми, придатні для обчислень за методом *PEsM*, подано таблицею 1. Записи отримані аналітично для функції щільності розподілу *PDF* несиметричного розподілу випадкового параметра, зображеної на рис. 4, шляхом обчислення визначених інтегралів [10] з використанням прийнятих позначень, причому покладено $x_0 = b$.

Таблиця 1

Аналітичні вирази, придатні для обчислення моментів несиметричного розподілу мінливого параметра моделі

Параметр розподілу з «трикутною» формою <i>PDF</i>	Аналітичний вираз для обчислень, записаний в термінах позначень, ужитих на рис. 4
Перший момент	$M_1(x) = \mu_x = \frac{1}{3}(a + b + c)$
Другий момент	$M_2(x) = \frac{1}{6}(a^2 + b^2 + c^2 + ab + bc + ac)$
Дисперсія	$D(x) = M_2(x) - \mu_x^2 = \sigma_x^2 = \frac{1}{18}(a^2 + b^2 + c^2 - ab - bc - ac)$
Третій момент	$M_3(x) = \frac{1}{10}[a^3 + b^3 + c^3 + a^2(b + c) + b^2(a + c) - c^2(a + b) + abc]$

Вірогідні інтервали значень деяких параметрів ДСМ СФЕС

Для СФЕУ, змонтованих на даху та СФЕС відкритого типу	Одиниця виміру	Значення, діапазон	
		Мін.	Макс.
Встановлена пікова потужність СФЕУ та/або СФЕС	МВт _{пік}	1,1	2,0
Питомі капіталовкладення	kEUR/ МВт _{пік}	1,30	1,60
Частка основних фондів групи 4	% / від вартості проекту	90	95
Термін експлуатації (тривалість «життєвого циклу»)	рік	15	20
Деградація СФЕМ (щорічне зменшення виробництва СФЕУ)	%	0,1	0,21
Коефіцієнт корисної дії сонячних модулів (ККД СФЕМ)	%	13	19
Частка умовно-змінних експлуатаційних витрат від вартості об'єкта (без врахування заробітної плати)	% / від вартості проекту	0,8	1,6
Збільшення умовно-змінних витрат з часом	% / рік	2,0	3,0
Питомі умовно-постійні експлуатаційні витрати	EUR/кВт	8,0	16,0
Дисконт номінальний	%	10,0	18,0
Інфляція (цінова ескалація)	%	7,0	10,0

Імітаційне моделювання техніко-економічних показників СФЕС методом MCSim. В основу моделі покладено записи для визначення дійсних нормованих цін за виразом (4). Запис моделі дозволяє серед витрат врахувати амортизаційні нарахування, обчислені будь-яким методом, в тому числі визначеним законодавчою практикою закордоном [14]. У прикладах розглянутих нижче застосовано алгоритм нарахування методом прискореного зменшення залишкової вартості основних засобів 4-ої групи, визначеним Податковим Кодексом України (ПКУ) [15]. Модель враховує всі особливості чинного законодавства України щодо пільгового оподаткування тих суб'єктів господарювання, які експлуатують енергоустанови на основі відновлюваних джерел енергії.

Для об'єкта, розглянутого у *Прикладі 1*, детерміновано-стохастична модель (у подальшому – ДСМ) побудована з урахуванням мінливого характеру сукупності показників (параметрів), які характеризуються певною невизначеністю на етапі формулювання задачі: технічні параметри задані у межах їх очікуваних відхилень від середнього чи бажаного значення, а фінансово-економічні показники – відповідно до прогнозів у межах обраних довірчих інтервалів. Такі параметри в процесі імітаційного моделювання набувають довільних значень завдяки організації ітераційної процедури. В загальному випадку функції щільності розподілу PDF цих параметрів задають на підставі наявних статистичних даних, отриманих шляхом лабораторних досліджень, експертних оцінок або очікувань.

Сукупність техніко-економічних параметрів моделі СФЕС у процесі конструювання групують за їх описовим змістом: фінансові, експлуатаційні, режимні. Число мінливих параметрів моделі, варіація яких здійснюється незалежно, визначає дослідник. Для тестових розрахунків цього дослідження число таких параметрів становить 23, причому варіація реального значення ставки дисконтування забезпечується шляхом розрахунку за виразом (1) двох випадкових параметрів – номінального дисконту та інфляції.

Вірогідні інтервали числових значень деяких мінливих параметрів ДСМ СФЕС, обрані для отримання співставних результатів моделювання ймовірнісними методами, подано таблицею 2.

Приклад 2. У цьому прикладі розрахунки кривих щільності розподілу значень собівартості та середньозваженої ціни виробництва СФЕС виконано за методом Монте-Карло, кількість ітерацій стохастичного процесу може становити від 10 тис до 100 тисяч, що є прийнятним для більшості практичних задач.

Тестові розрахунки за ітераційним алгоритмом обчислень методом Монте-Карло виконано з використанням аналітичних записів функцій щільності розподілу (PDF) до тих параметрів техніко-економічної задачі, статистичні дані щодо яких є відомими, або визначені частково. Зокрема, значення ККД сонячного фотоелектричного модуля (СФЕМ на основі монокристалічного кремнію) промислові виробники цих компонентів вважають розподіленими нормально навколо моди $M_{\text{ККД}}=16\%$ із стандартним середньо-квадратичним відхиленням $\sigma_{\text{ККД}} = 1\%$ (рис. 5а), коефіцієнт деградації (%/рік) – за несиметричним розподілом із формою щільності PDF рис. 5б (так званий PERT-розподіл). Водночас, питомі умовно-постійні експлуатаційні витрати на обслуговування устави коливаються в межах від

8÷20 €/рік із найбільш вірогідним значенням близько 10 €/рік і подані – функція PDF має «трикутну» форму (рис. 5в).

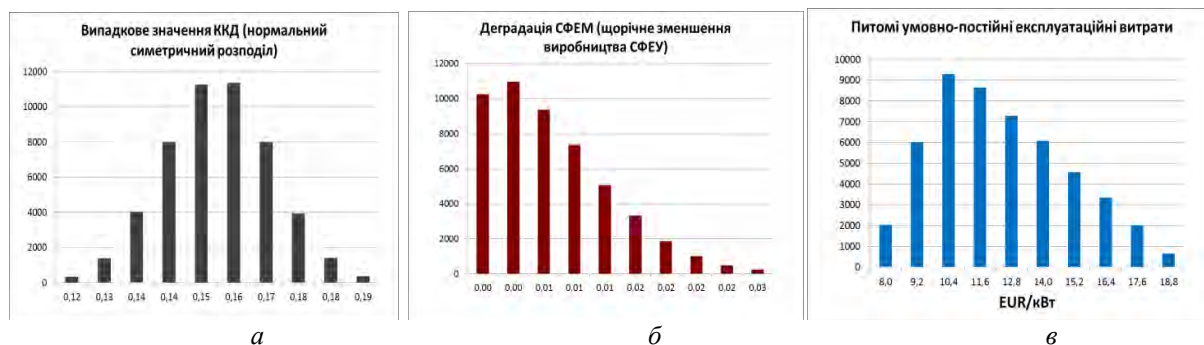


Рис. 5 Функції щільності розподілу випадкових значень параметрів СФЕС

Розрахунки виконані для діапазону значень проектної потужності СФЕС $1,1 \div 2,0$ МВт_{пик} (конструктивне виконання – «змонтована на даху»); довільно обране значення потужності для кожної реалізації процесу розподілене рівномірно. Числові інтервали значень параметрів розрахункової моделі, у межах яких здійснено стохастичний процес їх вибірки за методом Монте-Карло, адаптовано до фізичних (природних) та економічних умов функціонування в Україні. Питомі капіталовкладення для такої устави обираються з інтервалу значень 1300÷1800 EUR/ МВт_{пик} відповідно до опублікованих прогнозних показників на середньострокову перспективу до 2035 року [6].

Криві розподілу розрахункових значень собівартості виробленої електроенергії подано на рис. 6а у варіантах для порівняння:

- “Собівартість_MODEL”, EUR/МВт год – з урахуванням аналітичних записів заданих функцій щільності розподілу обраних параметрів: номінального дисконту, % річних; питомих умовно-постійних витрат на експлуатацію, EUR/кВт; деградації PV-модулів (щорічного зниження обсягів генерування електроенергії PV-панелями) і ККД PV-модулів (СФЕМ),

- “Собівартість_UNIFORM”, EUR/МВт год – за умов, коли вибіркові значення всіх змінних параметрів розрахункової моделі розподілені рівномірно або нормально (останні два рядки у співставній таблиці 3), однак випадкова вибірка значень цих параметрів моделі здійснюється одноразово й розрахункові значення підтримуються фіксованими, тобто є однаковими для всіх розрахункових періодів (протягом терміну експлуатації – життєвого циклу);

- “Собівартість_ANNUITY”, EUR/МВт год – за умов, коли значення щорічних дисконтованих витрат за проектом спорудження й експлуатації СФЕС вважати однаковими в межах життєвого циклу (тривалість життєвого циклу є випадковою величиною, див. табл. 2).

Для оцінки форм PDF-кривих результуючих розрахункових розподілів собівартості від нормального розподілу на рисунку пунктирними лініями зображено стандартизовані криві нормального розподілу, побудовані для отриманих за методом Монте-Карло середніх значень та середньоквадратичних похибок собівартості.

Зауважимо, що числові значення стохастичної змінної “Собівартість_ANNUITY” (крива із середнім значенням 151,3 EUR/МВт год), значення якої обчислені за схемою ДСМ СФЕС, практично відповідають розрахунковим значенням собівартості, отриманим за детермінованою моделлю у *Прикладі 1*: відмінності зумовлені застосуванням прискореного методу нарахування амортизації та вибіркою випадкового значення тривалості життєвого циклу (рівномірно розподіленого у межах від 15 до 20 років) для ДСМ.

На рис. 7 зображено гістограми розрахункової середньозваженої тарифної ціни на вироблену електроенергію СФЕС за двома варіантами: а) у випадку застосування рівномірного розподілу значень параметрів моделі і б) у випадку реалізації процесу згідно моделі з керованою щільністю.

На обох рисунках із збереженням кроку сітки по вертикальній осі (повторюваність реалізацій або частота вибірки випадкового значення) зазначено:

- “Ціна_MODEL” – криві (гістограми) розподілу середньозваженої ціни у випадку застосування певного алгоритму «регулювання» зеленого тарифу з метою зменшення середньої ціни виробника [2];

- “Ціна_ЗУ” – криві розподілу ціни за умов дії зеленого тарифу для обраної СФЕС, визначеного законодавцем, починаючи з 2015 року.

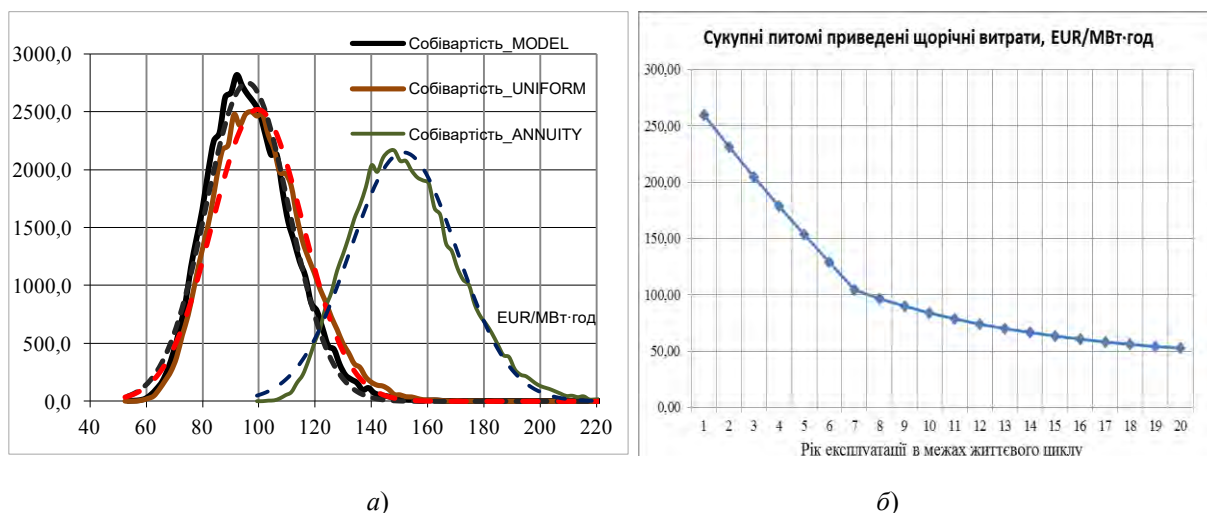


Рис. 6. Чисельні результати моделювання показників за ДСМ СФЕС 1,1 ÷ 2,0 МВт_{пк}, Приклад 2 : а) гістограми розрахованих методом *MCSim* значень собівартості електроенергії, виробленої (*MCSim*, 50 тис. ітерацій); б) крива приведеної собівартості СФЕС 1,1 МВт_{пк} для певної часткової реалізації ДСМ

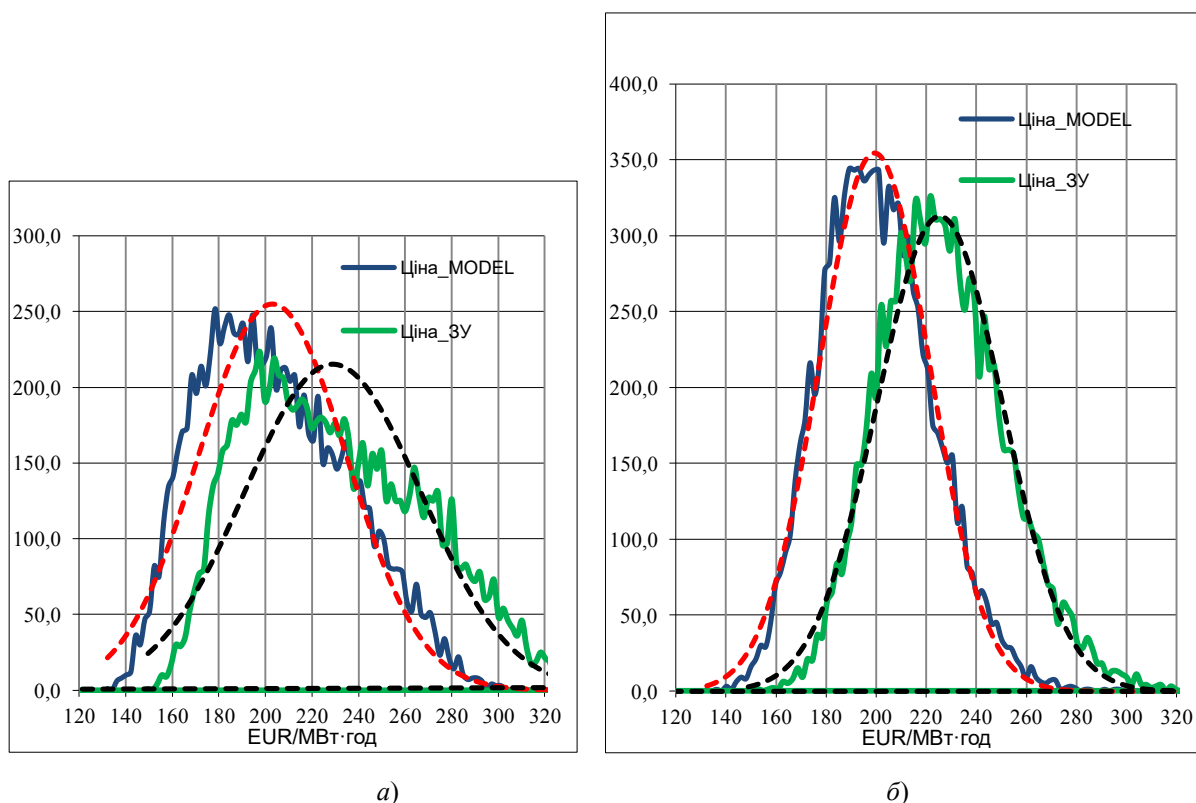


Рис. 7. Гістограми середньозваженої тарифної ціни на електроенергію СФЕС зі встановленою потужністю 0,1 ÷ 2 МВт_{пк}, 10 тис. ітерацій *MCSim*: а) за умови рівномірного розподілені значень параметрів моделі і б) у випадку реалізації процесу згідно моделі з керованою щільністю.

Відмінності форми кривих на рис.7б від рис.7а зумовлені уточненим розподілом розрахункових значень дисконту, ККД (рис. 5а) і деградації (рис. 5б) сонячних панелей. Цілком слушним є висновок про переваги детерміновано-стохастичних моделей з «керованим» розподілом параметрів [3] – таких, де випадкові параметри ДСМ задають уточненими на підставі даних лабораторних досліджень, експертних

оцінок та статистичних даних, отриманих у процесі експлуатації подібних електрогенерувальних об'єктів.

Супутнім результатом детерміновано-стохастичного моделювання, є можливість аналізувати поточні прогнозні витрати за проектом СФЕС шляхом побудови кривих собівартості (щорічних витрат на виробництво одиниці електроенергії у вартості грошей, фіксованій на дату початку експлуатаційного періоду об'єкта) – приклад кривої питомих витрат для однієї з випадкових реалізацій цієї ДСМ зображено на рис. 6б. Крива, отримана за умови прискореної амортизації основних фондів, демонструє помітне зниження питомих витрат у часі. Подібні розрахункові дані часто використовують у практиці техніко-економічного обґрунтування вигоди від реалізації проекту об'єкта з ВДЕ, порівнюючи їх з питомими витратами на підтримання традиційних технологій. Однак, питомі витрати у розрізі по роках не відтворюють повною мірою концепту моделі середньозваженої ціни *LCOE* (1)-(6), відтак не можуть слугувати інструментом для з'ясування дійсних економічних переваг проекту шляхом співставлення.

Моделювання техніко-економічних показників СФЕС методом *PEsM*. З метою подальшого співставлення числових результатів моделювання розрахункові експерименти для ДСМ СФЕС з використанням *PEsM* виконано з урахуванням особливостей задачі у попередньо опрацьованих прикладах. Зазначимо, що для реалізації методу відповідно до алгоритмічної покрокової процедури (10)-(14) у таблиці 2 інтервали випадкових значень параметрів (їх довірчі інтервали) з урахуванням вимог кроку (11) обрано звуженими. Необхідність налаштування інтервалів на вимогу забезпечення невід'ємних числових значень варіацій окремих параметрів у даному випадку слід віднести до недоліків методу *PEsM*.

Крім того, для співставного аналізу результатів у першому наближенні, зокрема з оцінками, отриманими за методом *MCSim* у *Прикладі 2*, випадкові значення параметрів з «керованим» несиметричним розподілом будемо вважати розподіленими за трикутним законом (рис. 4).

Приклад 3. Розв'язки моделі за методом точкового оцінювання *PEsM* отримано для експериментальних наборів даних, для чого вхідні параметри у серіях співставних розрахунків були розподілені: а) рівномірно і б) за нормальним законом $N = [\mu_{x_\zeta}, \sigma_{x_\zeta}]$, $\zeta = \overline{1, n}$; для обох випадків загальне число вхідних параметрів моделі, що змінюються незалежно, становить $n = 23$. Несиметричні властивості розподілів прогнозних значень чотирьох «керованих» мінливих параметрів з «трикутною» *PDF*-формою розподілу, включно номінального дисконту R , визначено за схемою *Прикладу 2* (див рис. 5).

Фактично, цей приклад демонструє можливості застосованих у цьому дослідженні ймовірнісних методів щодо точності отриманих розрахункових даних досліджуваних економіко-математичних ДСМ для дисперсного й глибшого, кореляційного аналізу. Варіанти експериментальних розрахунків за моделлю СФЕС із варіацією 23-х параметрів, випадкові значення яких змінюються незалежно (є некорельованими), описані у таблиці 3. Дані для методу Монте-Карло *MCSim* наведено для випадку 10 тис. ітерацій стохастичного процесу. Проміжний розрахунок за детермінованою моделлю виконано для фіксованих центральних значень обраних інтервалів варіації мінливих параметрів ДСМ, що дає змогу обчислити і співставити розрахункові оцінки стохастичних змінних відносно цієї детермінованої точки у першому наближенні: адже параметри з «керованим» розподілом враховані шляхом обчислення старших моментів несиметричних *PDF*-функцій «трикутної» форми за виразами, записаними у табл. 1 (значення інших 19 параметрів розподілені нормально або рівномірно).

Числові результати моделювання різними методами за умови врахування статистичних даних лише для декількох (чотирьох) мінливих параметрів моделі, що задаються несиметричними формами їх *PDF*-функцій, демонструють достатню точність застосування простішого (неітераційного) методу *PEsM* для розв'язування техніко-економічної задачі; інші параметри бажано задавати нормально розподіленими. Відповідно до даних табл. 3, у такому випадку можливо суттєве скорочення витрат часу, порівняно з такими витратами для реалізації імітаційного моделювання за методом *MCSim*.

Отримані результати імітаційного моделювання свідчать про принципову можливість отримувати вірогідні середньозважені цінові показники проєктованих електрогенерувальних устав з ВДЕ за методами *MCSim* та *PEsM* на основі детерміновано-стохастичних моделей у разі застосування аналітичних записів функцій щільності *PDF* для будь-яких розподілів мінливих технологічних і економічних параметрів ДСМ. Застосування таких економіко-математичних ДСМ у поєднанні з бажаними методами амортизації основних засобів суттєво підвищує точність розрахункових цінових оцінок енергетичних об'єктів порівняно з записами моделей детермінованого типу. Коригування цінових показників для випадку моделі гіпотетичної СФЕС середньої потужності сягає 10%; похибки оцінювання суттєво зменшуються за умови визначення і врахування характеристик розподілу (*PDF*) вхідних параметрів розрахункової моделі.

Таблиця 3.

Детерміновано-стохастична модель СФЕС змонтованої на даху 1,1 ÷ 2 МВт_{пик}: співставні результати розрахункових експериментів за методами Монте-Карло (*MCSim*, 10 тис. ітерацій) та точкового оцінювання (*PEsM*, $n = 23$)

Варіанти організації розрахункового експерименту показників СФЕУ		Розрахункові значення змінних моделі СФЕС 1,1 – 2,0 МВт _{пик} , змонтованої на даху							
		Собівартість виробленої електроенергії: очікуване середнє $M(y)$, EUR/МВт год; середньоквадратичне відхилення $\sigma(y)$						Середня ціна електро-енергії, EUR/МВт год	
		Середня MODEL		Середня UNIFORM		Середньозважена ANNUITY		збут за «зеленим тарифом»	
		$M(y_1)$	$\sigma(y_1)$	$M(y_2)$	$\sigma(y_2)$	$M(y_3)$	$\sigma(y_3)$	$M(y_4)$	$\sigma(y_4)$
За схемою Прикладу 2 методом <i>MCSim</i>		100,33	16,67	105,46	18,33	159,46	22,02	225,12	24,69
Для центральних значень вхідних параметрів (детермінована модель): $\mu_{x_\zeta}, \zeta = 1, 2, \dots, 23$		106,06	0,0	110,67	0,0	161,69	0,0	229,16	0,0
Для рівномірно розподілених параметрів моделі, $n = 23$	<i>MCSim</i>	105,99	21,12	110,83	22,86	169,07	27,32	228,38	34,52
	<i>PEsM</i>	107,37	22,51	112,60	23,96	161,22	29,56	231,90	32,17
Для нормально розподілених параметрів моделі, $n = 23$	<i>MCSim</i>	104,70	20,08	110,34	21,23	167,43	19,95	228,11	34,46
	<i>PEsM</i>	106,81	20,08	112,02	21,23	161,11	26,33	231,22	29,77

Висновки

1. В роботі виявлено відмінності вживаних схем моделі відповідно до визначення нормованої ціни (*LCOE*) і запропоновано інтерпретацію аналітичних записів *LCOE*, які використані для побудови детермінованих і детерміновано-стохастичних моделей (ДСМ) життєвого циклу електрогенерувальних установ з ВДЕ; зазначено на особливостях використання моделей відповідно до змісту техніко-економічної задачі, сформульованої з урахуванням умов, визначених українським законодавством.

2. З метою підвищення точності розв'язків техніко-економічних задач ймовірнісними методами для ДСМ СФЕС запропонована модифікація розрахункової схеми *LCOE*, котра в структурі детерміновано-стохастичної моделі СФЕС дозволяє врахувати довільне число мінливих параметрів з керованими функціями їх щільності розподілу. Функційні можливості такої ДСМ для фотоелектричної станції (СФЕС) продемонстровано прикладами, де отримано уточнені значення обсягових і цінних оцінок за методом Монте-Карло – їх математичних очікувань та значень середньоквадратичного відхилення, обчислених на основі дійсних функцій щільності розподілу їх прогнозних значень.

3. Підтверджено ефективність застосування методу точкового оцінювання (*PEsM*) для отримання швидких результатів – шляхом серій розрахункових експериментів з використанням алгоритму неітераційного типу досягнуто суттєвого скорочення обсягів обчислень за збереження точності.

4. Остаточні висновки щодо адекватності досліджених ДСМ слід сформулювати на підставі глибших результатів кореляційного аналізу – врахування взаємозалежностей технологічних та економічних параметрів детерміновано-стохастичної моделі.

Список літератури

1. Костюк В.О., Охріменко І.А., Ханицька О.О. Оцінка ефективності інтегрованої геліоколекторної системи гарячого водопостачання на основі моделі життєвого циклу // Наукові праці ДонНТУ. Серія "Електротехніка і енергетика". – 2014р. – №1(16). – с.95-100.
2. Костюк В.О. Техніко-економічні оцінки виробництва електроенергії фотоелектричними станціями і проблема валоризації відновлюваних джерел енергії в Україні / Костюк В.О., Шульженко С.В., Охріменко І.А. // Техн. електродинаміка. – 2014. – №5. – С.59-61.
3. Костюк В.О. Детерміновано-стохастичні моделі з керованим розподілом випадкових значень параметрів енергоустановок на основі ВДЕ / Костюк В.О., Ханицька О.О., Лукінов М.О. // Збірник тез

доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Сталий енергетичний розвиток: сучасні тенденції технології та рішення – 2014». К.: НТУУ КПІ, 2014. – с.35.

4. Мелкумов Я.С. Теоретическое и практическое пособие по финансовым вычислениям. – М.: ИНФРА-М, 1996. – 336 с.

5. Salvatore J. et al. World Energy Perspective. Cost of Energy Technologies /Bloomberg New Energy Finance. – London: World Energy Council, 2013. – 48p.

6. Cost and performance data for power generation technologies. Black & Veatch Holding Company, prepared for National Renewable Energy Laboratory, US. – 2012. –105 p.

7. Cost and Performance Assumptions for Modeling Electricity Generation Technologies. Subcontract Report NREL/SR-6A20-8595, U.S. Department of Energy, November 2010. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.osti.gov/bridge>.

8. Schroder A. et al. Current and Prospective Cost of Electricity Generation until 2050 / Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, – Berlin: DIW, 2013. – 94p.

9. Добровольський В.К. Економіко-математичне моделювання енергетичних систем / В.К. Добровольський, О.В. Стогній, В.О. Костюк, М.І. Каплін / Інститут загальної енергетики НАН України. – Київ, Наукова Думка. – 2013. – 250 с.

10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. — 6-е изд. стер. — М.: Высш. шк., 1999.— 576 с.

11. Гихман И.И. Теория вероятностей и математическая статистика / Гихман И.И., Скороход А.В., Ядренко М.И. – К.: Вища школа. –1979. – 408с.

12. Pert distribution. EPIX Analytics – ModelAssist for Crystal Ball. [Електронний ресурс].– Режим доступу: http://www.epixanalytics.com/modelassist/CrystalBall/Model_Assist.htm#Distributions/Continuous_distributions/PERT_%28Beta%29.htm . – Назва з титул. екрану.

13. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 648с.

14. How To Depreciate Property. Publication 946, for use in preparing 2013 returns / Department of the Treasury, January, 2014.–116p. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.irs.gov/>.

15. Податковий Кодекс України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2755-17>.

V.O. Kostiuk

Institute of General Energy of NAS of Ukraine

THE MODIFIED TECHNIQUE FOR LEVELIZED ENERGY COST COMPUTING TO PROVIDE DETERMINISTIC AND STOCHASTIC MODELING OF NEW GENERATING FACILITIES

Practical aspects of feasibility assessment problem are considered, basing on the levelized energy cost concept (LCOE) for newly commissioned renewable power plants to be operated under Ukrainian law. An uncertain modeling data, either technical or cost estimates, relevant for the site with solar-photovoltaic plant (PVPP) in Ukraine will essentially influence the decision making process when classical deterministic approach is applied traditionally. To deal with uncertainties the use of value's distribution control for certain technical and economic parameters is proposed as to be introduced seamlessly within the structure of deterministic and stochastic mathematical model. Computed problem solutions by means of Monte Carlo Simulation (MCSim) and Point Estimation Method (PEsM) are presented for the typical PVPP cases. Obtained numerical results are applicable for variance analysis whilst the stochastic models should be enhanced and deployed to find feasible and optimal solutions for complex distributed generation systems (DGS).

Keywords: renewable energy, levelized energy cost computation, life cycle, deterministic and stochastic model, probabilistic methods, variance analysis.

1. Kostiuk V.O. Evaluating the Effectiveness of Integrated Solar and Collector Hot Water System Based on the Life Cycle Model / V.O. Kostiuk, I.A. Okhrimenko, O.O. Khanytska // Donetskiy NTU, Collected volume of science papers: "Electrical Engineering and Energy". –2014p. – №1(16). – Pp.95-100.

2. Kostiuk V.O. Feasibility assessment of photovoltaic electricity generation plant and valorization problem of renewable energy sources in Ukraine / V.O. Kostiuk, S.V. Shulzhenko, I.A. Okhrimenko // Tekhnichna elektrodynamika. – 2014. –№5. – P.59-61.

3. Kostiuk V.O., Khanytska O.O. Combined requirements for control and reliability implementation for rationally designed hybrid power-supply system based on renewables // XII International Conference “Monitoring and Control in Complex Systems” («KUSS-2014»), Collection volume of theses – Vinnytsya, VNTU. – 2014. – P.145.

4. Melkumov Y.S. Theoretical and practical handbook for financial computations. – Moscow: INFRA-M, 1996. – 336 p.

5. Salvatore J. et al. World Energy Perspective. Cost of Energy Technologies /Bloomberg New Energy Finance. – London: World Energy Council, 2013. – 48 p.
6. Cost and performance data for power generation technologies. Black & Veatch Holding Company, prepared for National Renewable Energy Laboratory, US. – 2012. –105 p.
7. Cost and Performance Assumptions for Modeling Electricity Generation Technologies. Subcontract Report NREL/SR-6A20-8595, U.S. Department of Energy, November 2010. [Electronic resource].– Access mode: <http://www.osti.gov/bridge>.
8. Schroder A. et al. Current and Prospective Cost of Electricity Generation until 2050 / Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, – Berlin: DIW, 2013. – 94p.
9. Dobrovolsky V.K., Stogniy O.V., Kostiuk V.O., Kaplin M.I. Economic and mathematical Modeling of Power Systems. – Kyiv: Naukova dumka, 2013. – 250 p.
10. Ventsel E.S. Probability theory: Textbook for universities. — 6-th edition. — Moscow: Vysshaya shkola, 1999.— 576 p.
11. 17. Gikhman I.I. Probability theory and mathematical statistics / I.I. Gikhman, A.V.Skorokhod, M.I. Yadrenko. – Kyiv: «Вища школа». –1979. – 408p.
12. Pert distribution. EPIX Analytics – ModelAssist for Crystal Ball. [Electronic resource].– Access mode: http://www.epixanalytics.com/modelassist/CrystalBall/Model_Assist.htm#Distributions/Continuous_distributions/PERT_%28Beta%29.htm.
13. Cramer H. Mathematical Methods of Statistics /University of Stockholm, 1946 / Translated into Russian. – Moscow: Mir, 1975. – 648p.
14. How To Depreciate Property. Publication 946, for use in preparing 2013 returns / Department of the Treasury, January, 2014.–116p. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.irs.gov/>.
15. Podatkovyy Kodeks Ukrainy. [Electronic resource].– Access mode: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2755-17>.

УДК 620.92+621.31:519.24

В.О. Костюк, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
Институт общей энергетики НАН Украины

**МОДИФИЦИРОВАННЫЕ СХЕМЫ РАСЧЕТА НОРМИРОВАННОЙ ЦЕНЫ
ПРОИЗВОДСТВА В ЗАДАЧАХ ДЕТЕРМИНИРОВАННО-СТОХАСТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ НОВЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ**

Рассматриваются практические аспекты применения схем расчета оценок технико-экономических показателей новых электрогенерирующих установок с возобновляемыми источниками энергии на основе принципа средневзвешенной (нормированной) цены производства – для условий их функционирования, предусмотренных законодательством Украины. Неопределенность прогнозных стоимостных оценок проектных показателей сооружаемой солнечно-фотоэлектрической станции (СФЭС) в Украине, которую связывают с использованием классического детерминированного подхода, предложено снизить путем программно-аналитического учета изменяющихся технологических и экономических показателей посредством параметров управляемого распределения их случайных значений в структуре детерминировано-стохастических экономико-математических расчетных моделей. Даны примеры решения задач для СФЭС методами Монте-Карло (MCSim) и точечного оценивания (PEsM). Численные результаты моделирования пригодны для сопоставления и использования в дальнейшем для решения более сложных оптимизационных задач.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, расчет нормированной цены, жизненный цикл, фотоэлектрическая станция, детерминированно-стохастическая модель, вероятностные методы, дисперсионный анализ.

Надійшла 02.04.2015
Received 02.04.2015

ВИРОБНИЦТВО ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ: СВІТОВІ ТЕНДЕНЦІЇ І СТАН В УКРАЇНІ

У роботі наведено оцінку сучасного стану сонячної енергетики у країнах ЄС і Україні шляхом порівняльного аналізу за критеріями фактичних встановлених потужностей сонячних фотоелектростанцій і виробленої ними електроенергії; досліджено відповідність фактичної динаміки сонячної генерації розрахунковим показникам індикативних проміжних траєкторій Національних планів дій з відновлюваної енергетики країн ЄС та України; виявлено закономірності розвитку сонячної генерації країн ЄС за період 2002-2013 рр. за допомогою статистичного аналізу одномірних інтервальних рядів динаміки обсягів виробництва електроенергії сонячними фотоелектростанціями та розрахунку ланцюгових характеристик ряду динаміки – абсолютного приросту, коефіцієнту зростання, темпу приросту; наведено світові тенденції розвитку ринку сонячних фотоелектростанцій як за регіонами світу, так і між країнами одного регіону; виділено основні чинники, що впливають на розвиток сонячної енергетики в Україні та світі.

Ключові слова: сонячна енергетика, встановлена потужність, виробництво електроенергії, темпи приросту, індикативні цілі.

Вступ. Для зміцнення енергетичної незалежності будь-якої держави необхідно підвищувати рівень диверсифікації джерел енергоносіїв і збільшувати частку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергетичному балансі країни. Для країн ЄС на законодавчому рівні впровадження відновлюваної енергетики було закріплено у Директиві Європейського Парламенту та Ради ЄС 2009/28/ЄС про заохочення використання енергії, виробленої з ВДЕ, яка передбачає досягнення до 2020 р. обов'язкової мети - 20% від кінцевого споживання енергії за рахунок ВДЕ. На виконання вимог Директиви 2009/28/ЄС країнами ЄС наприкінці 2010 р. та початку 2011 р. було прийнято Національні плани дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року (НПДВЕ). Ці плани визначають зростання частки енергії з відновлюваних джерел у валовому кінцевому обсязі споживання енергії і, зокрема, надають показники індикативної проміжної траєкторії (ПТ) щодо річного прогнозного зростання встановлених потужностей і обсягів виробництва електроенергії сонячною генерацією. Приєднання України до Енергетичного співтовариства зобов'язує Україну до ратифікації відповідних норм законодавства ЄС, зокрема, - імплементації Директиви 2009/28/ЄС, тому у жовтні 2014 р. розпорядженням Кабінету Міністрів України затверджено НПДВЕ. Визначені Україною національні індикативні цілі у відновлюваній енергетиці, зокрема, передбачають введення у 2020 р. в експлуатацію об'єктів сонячної генерації із загальною встановленою потужністю 2300 МВт та забезпечення обсягів виробництва електроенергії 2420 млн.кВт год [1-2].

Сьогодні сонячна енергетика стає важливим напрямом реалізації державної політики у сфері ВДЕ для багатьох країн світу. Це пов'язано з тим, що за останні роки сегмент технологій сонячної генерації став одним з найбільш швидкозростаючих на світовому ринку енергоефективних технологій. Заплановане у НПДВЕ для 2020 р. досягнення частки енергії, виробленої сонячними фотоелектричними станціями (ФЕС), в електрогенерації залежить від рівня виконання показників ПТ, що визначають річні показники для встановлених потужностей та обсягів електроенергії, виробленої ФЕС, для періоду 2014-2020 рр. Оскільки кількісні значення, надані у ПТ, є розрахунковими, для успішного досягнення національних індикативних цілей необхідно досліджувати рівень їх виконання та аналізувати наслідки впливу нових факторів, виникнення яких не передбачалось у прогнозних оцінках.

Мета та завдання: визначення стану та інтенсивності змін у сегменті сонячної генерації за показниками фактичних встановлених потужностей, обсягів і темпів приросту обсягів виробництва електроенергії ФЕС та їх поширеності за регіонами світу для оцінки відповідності фактичного стану розрахунковим показникам ПТ у НПДВЕ країн ЄС і України та характеристики світових тенденцій розвитку сонячної енергетики.

Аналіз фактичного стану та показників НПДВЕ для сонячної енергетики в країнах ЄС та Україні. Національні цілі та розрахункові показники ПТ для сонячної енергетики кількісно суттєво розрізняються серед країн ЄС. Для виявлення стану розвитку сонячної енергетики в країнах ЄС та Україні було проведено порівняльний аналіз фактичних значень та розрахункових показників НПДВЕ за критеріями встановленої фактичної потужності ФЕС, під'єднаних до мережі, та виробництва ними

електроенергії. Оцінка була проведена для 28 країн ЄС на підставі показників звітного 2013 р., опублікованих на цей час статистичною організацією Європейської Комісії (Eurostat) [3] та даних [4]. Для аналізу стану сонячної енергетики в Україні використовувались дані Державної служби статистики України (Держстат) та енергетичної статистики Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективності) [5-6].

Результати статистичного аналізу показників фактичної встановленої потужності сонячних ФЕС, під'єднаних до мережі, в країнах ЄС-28 та Україні у 2013 р. приведені на рис.1.

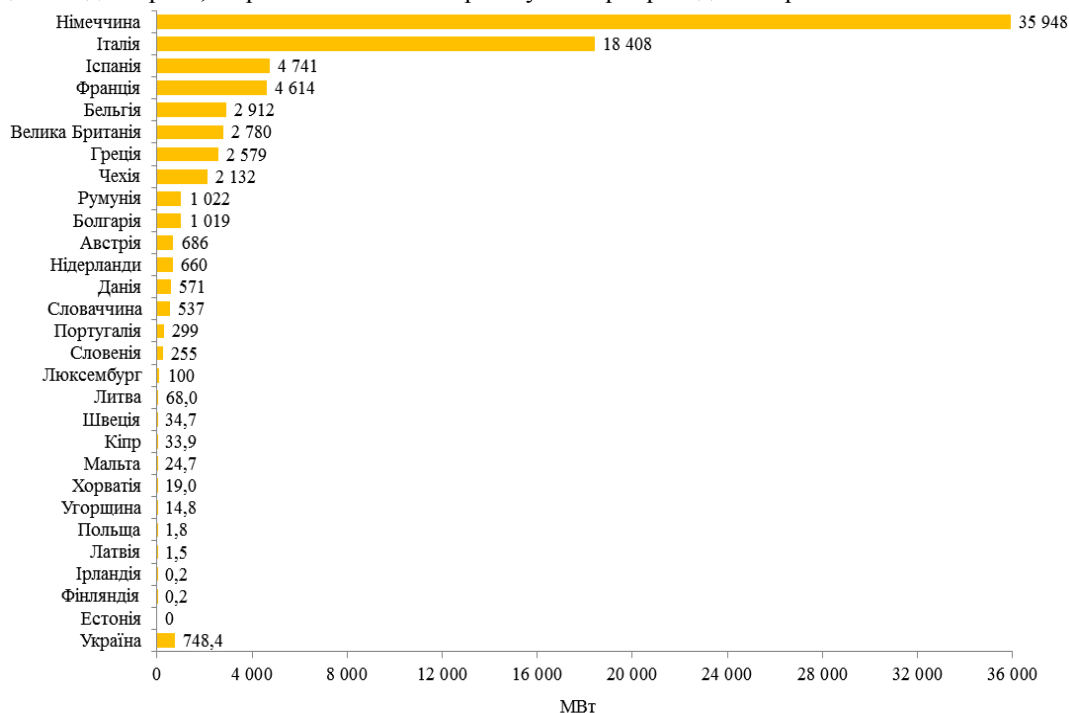


Рис.1. Фактична встановлена потужність ФЕС, під'єднаних до мережі; країни ЄС-28 та Україна, 2013 р.

Порівняння розрахункових показників ІПТ для встановлених потужностей ФЕС в країнах ЄС-28 [7] з фактичними показниками 2013 р. наведено на рис. 2. Відсутність на діаграмі Естонії та Ірландії на діаграмі пов'язана з тим, що сонячна енергетика не включена цими країнами до НПДВЕ.

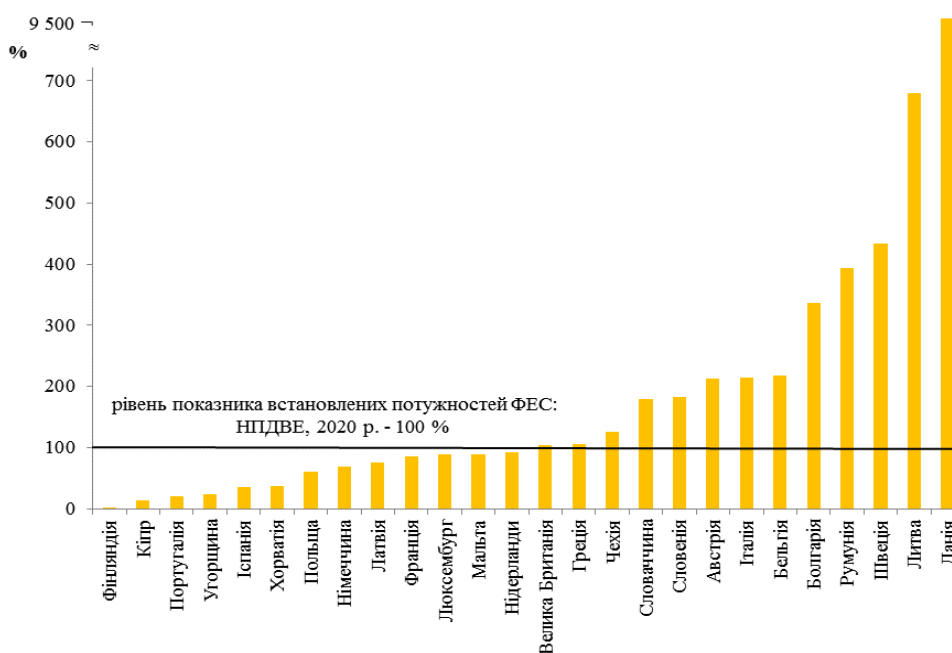


Рис.2. Рівень виконання НПДВЕ за показником встановлених потужностей ФЕС; країни ЄС-28, 2013 р.

Для Данії спостерігаються надмірні значення рівня виконання показника встановлені потужності згідно з її НПДВЕ (9 517 %). Це пов'язане з тим, що країною було закладено у НПДВЕ встановлення лише 6 МВт, а фактичні встановлені потужності ФЕС у 2013 р. значно перевищили цей розрахунковий показник, сягнув 571 МВт.

Загальна потужність, яка мала бути встановлена в ЄС-28 за розрахунковими показниками НПДВЕ [7], мала дорівнювати 47 792 МВт у 2013 р. та 93 485 МВт у 2020 р. Однак, за підсумком 2013 р. було встановлено 78 890 МВт, і показники ППТ для встановлених потужностей ФЕС були виконані у 24 країнах ЄС. Причому, як можна побачити з рис.2, за рівнем виконання за цей рік у 13 країнах даний показник досягнув або перевищив цілі 2020 р., а за попередніми оцінками результатів 2014 р. [8] він був виконаний на рівні 2020 р. вже у 15 країнах.

Результати статистичного аналізу показників обсягів виробництва електроенергії ФЕС в країнах ЄС-28 та Україні у 2013 р. наведено на рис.3.

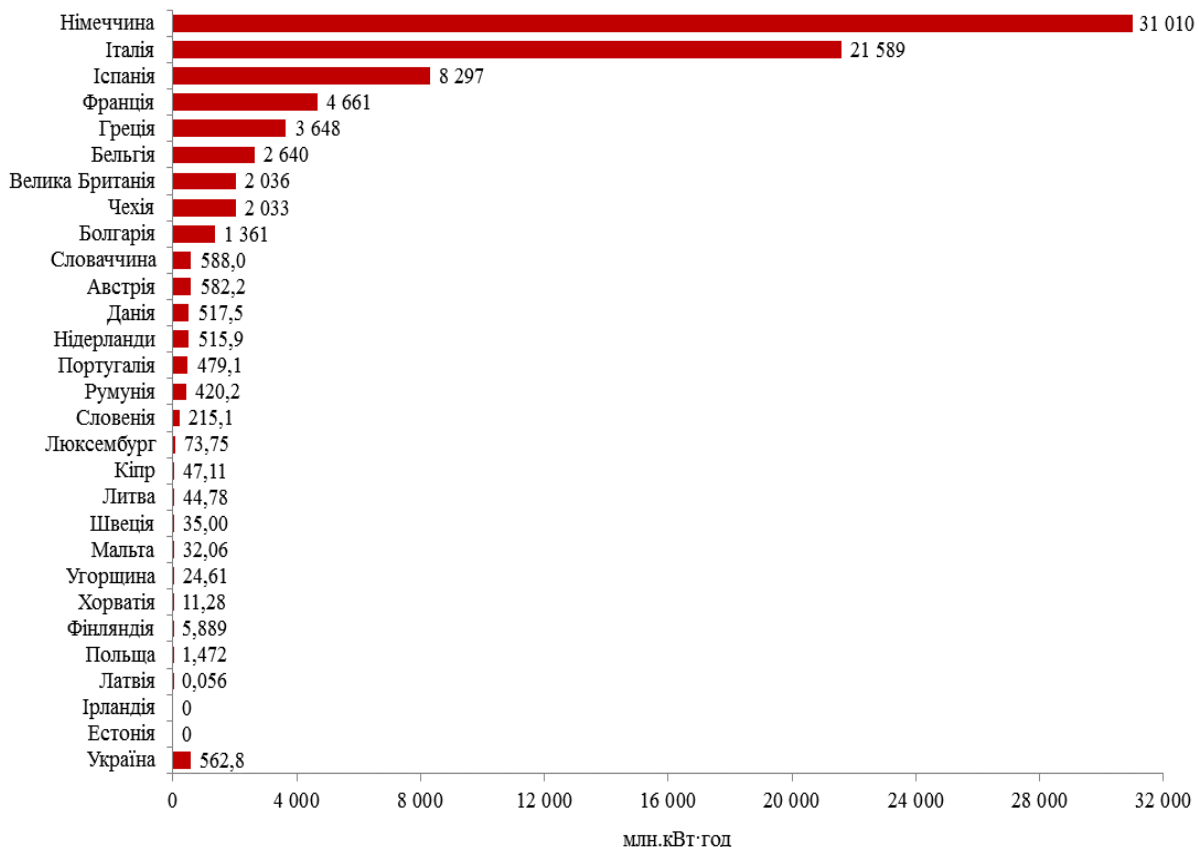


Рис.3. Обсяги виробництва електроенергії ФЕС; країни ЄС-28 та Україна, 2013 р.

Сукупний річний обсяг виробництва електроенергії сонячною енергетикою в країнах ЄС-28 у 2013 р. сягає дуже високого рівня – 80 867 млн.кВт·год, що майже дорівнює кінцевому споживанню енергії за цей рік у таких країнах як Фінляндія (79 828 млн.кВт·год) чи Бельгія (81 896 млн.кВт·год). У загальному кінцевому споживанні енергії в країнах ЄС-28 (2 769 885 млн.кВт·год) частка сонячної енергетики дорівнювала 2,92%. Але, як можна побачити, вклад окремих країн ЄС у показник сукупного річного обсягу виробництва електроенергії сонячними ФЕС дуже сильно розрізняється, причому на Німеччину, Італію та Іспанію припадає близько двох третин (рис.3).

Порівняння розрахункових показників ППТ для сонячної енергетики, які визначені країнами ЄС-28 у НПДВЕ [7], та їх фактичного рівня виробництва електроенергії сонячними ФЕС у 2013 р. наведено на рис.4. Відсутність на діаграмі Фінляндії пов'язана з тим, що в її НПДВЕ не були визначені обсяги виробництва електроенергії для зазначених в плані показників встановлених потужностей. Для Данії перевищення розрахункового показника до надмірних значень - майже у 130 разів (або 12 938 %) - пов'язане з тим, що відповідно до її НПДВЕ мало бути вироблено лише 4 млн.кВт год, а вже у 2013 р. фактичні обсяги виробництва електроенергії в цій країні склали 517,5 млн.кВт год. Як можна побачити, показники ППТ для сонячної енергетики щодо обсягів виробництва електроенергії були виконані у 22 країнах ЄС. Причому за рівнем виконання цей показник у 12 країнах перевищив цілі НПДВЕ для 2020 р.

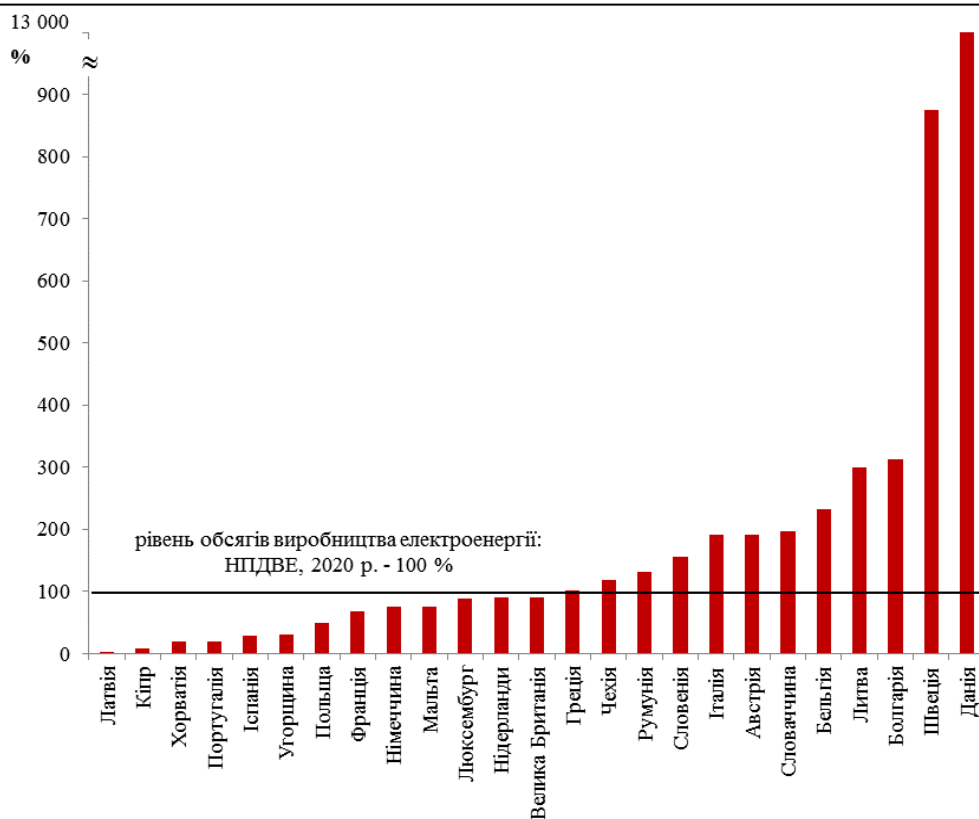


Рис.4. Рівень виконання показників НПДВЕ за обсягами виробництва електроенергії ФЕС; країни ЄС-28, 2013 р.

За результатами порівняльного аналізу по країнам ЄС-28 можна зазначити наступні розбіжності фактичних та розрахункових показників: фактичний сукупний річний обсяг склав 80 867 млн.кВт год, а сукупні розрахункові показники ППТ дорівнювали у 2013 р. - 46 679 млн.кВт год; у 2020 р. - 103 378 млн.кВт год; загальна фактична встановлена потужність сонячних ФЕС у 2013 р. склала 79 461 МВт, а сукупні розрахункові показники ППТ дорівнювали у 2013 р. - 45 782 МВт; у 2020 р. – 91 471 МВт.

Проведений аналіз свідчить, що сьогодні розрахункові показники НПДВЕ починають втрачати своє прогнозне значення. Це відбувається у зв'язку з тим, що з часу прийняття та оприлюднення країнами ЄС їх НПДВЕ спостерігається значна зміна факторів впливу, які формують нові тенденції. До таких факторів, на думку експертів [8-11], в першу чергу слід віднести ситуацію на ринку сонячних ФЕС. Показники для сонячної генерації, що закладені у НПДВЕ, були розраховані за прогнозом, який не передбачав таке суттєве скорочення витрат на виробництво електроенергії ФЕС, яке відбулось з часу публікації НПДВЕ у 2010-2011 рр. Однією з перешкод у поширенні сонячної енергетики була висока вартість фотоелектричних модулів, але за останні шість років вартість модулів зменшилась у п'ять разів, а вартість ФЕС - майже у три рази. Середня розрахункова собівартість виробництва електроенергії ФЕС протягом усього життєвого циклу з урахуванням усіх інвестицій, витрат і доходів для децентралізованих систем сонячної енергетики наближається, а у деяких випадках навіть є нижчою, роздрібних цін на ринках електроенергії. Сонячна генерація вже може бути конкурентоспроможною в часи пікового попиту, особливо в районах, де він покривається за рахунок ТЕС, що призводить до додаткових витрат традиційних видів палива. Зменшення вартості у поєднанні із змінами у світовому енергетичному секторі змінюють роль сонячної енергетики. Ця ситуація вплинула на зміни у дорожній карті розвитку сонячної генерації МЕА: у новій редакції 2014 р. сонячна енергетика у світовому виробництві електроенергії до 2050 р. має забезпечити вже 16 %, що на 5% більше ніж це було зазначено раніше.

За показниками ППТ, визначеними у НПДВЕ України для сонячної енергетики, загальна встановлена потужність сонячних ФЕС у 2014 р. мала дорівнювати 860 МВт, а виробництво електроенергії – 900 млн.кВт год. У дійсності фактична встановлена електрична потужність сонячних ФЕС в 2014 р. була меншою - 819 МВт, і обсяги виробленої електроенергії також - 485 млн.кВт год. Таке суттєве скорочення обсягів виробництва електроенергії у порівнянні з 2013 р. (див. рис.3) пов'язано з тим, що ці дані є неповними. Згідно з повідомленням Держенергоєфективності [6] постачання електроенергії сонячними електростанціями, що знаходяться на тимчасово окупованій території АР Крим, до об'єднаної

енергетичної системи України припинено з квітня 2014 року, а на цей території знаходиться 28 сонячних ФЕС із сукупною встановленою потужністю близько 407 МВт. Для визначення частки сонячної електроенергетики у загальному виробництві електроенергії використовувались дані Держстату [5]. Відповідно до них загальний обсяг виробництва електроенергії склав 181,9 млрд.кВт год, причому частка теплових електростанцій дорівнювала 45,52 % (82,8 млрд.кВт год), а атомних – 48,60 % (88,4 млрд.кВт год). За таких показників у 2014 р. частка сонячної електроенергетики у загальному виробництві електроенергії в Україні склала лише 0,27 %.

Абсолютні та відносні показники динаміки обсягів виробництва електроенергії сонячними ФЕС в країнах ЄС. Для прогнозування рівня виробництва електроенергії ФЕС, прийняття можливих коригуючих управлінських рішень необхідно оцінювати динаміку й інтенсивність змін; аналізувати вплив факторів, що з'явилися останнім часом і не були враховані при формуванні прогнозних оцінок. Швидкість та інтенсивність змін в секторі сонячної енергетики, які відбувалися на різних етапах розвитку, були визначені шляхом розрахунку низки абсолютних і відносних характеристик ряду динаміки обсягів виробництва електроенергії сонячними ФЕС за період 2002–2013 рр. Для побудови ряду динаміки використовувались статистичні дані Eurostat [3], що забезпечило виконання вимоги порівнянності значень всіх рівнів ряду динаміки (зокрема, за методикою розрахунку, періодом і об'єктами спостереження, одиницями спостереження і вимірювання).

Для визначення абсолютної швидкості зміни рівнів ряду динаміки було розраховано ланцюговий абсолютний приріст Δ_t^n (млн.кВт год) поточного t -го рівня ряду динаміки y_t :

$$\Delta_t^n = y_t - y_{t-1}. \quad (1)$$

Відносна швидкість зміни рівнів характеризується ланцюговим коефіцієнтом зростання k_t^n :

$$k_t^n = \frac{y_t}{y_{t-1}} = \frac{\Delta_t^n}{y_{t-1}} + 1. \quad (2)$$

Інтенсивність змін рівнів обсягів виробництва електроенергії сонячними ФЕС визначається значеннями ланцюгового темпу приросту $T_{np_t}^n$:

$$T_{np_t}^n = \frac{\Delta_t^n}{y_{t-1}} = k_t^n - 1. \quad (3)$$

Якщо швидкість розвитку в межах завданого періоду є неоднаковою, тоді необхідно розрахувати абсолютне δ_{abc} (млн.кВт год) та відносне δ_{aid} прискорення або уповільнення динаміки:

$$\delta_{abc} = \Delta_t^n - \Delta_{t-1}^n; \quad \delta_{aid} = T_{np_t}^n - T_{np_{t-1}}^n. \quad (4)$$

Результати розрахунків абсолютних і відносних показників ряду динаміки сукупного обсягу виробництва електроенергії сонячними ФЕС країн ЄС за період 2002-2013 рр., одержаних за формулами (1)-(4), наведено у табл. 1.

Таблиця 1.

Показники динаміки виробництва електроенергії ФЕС; країни ЄС-28, 2002-2013 рр.

Рік	y_t , млн. кВт год	Δ_t^n , млн. кВт год	k_t^n	$T_{np_t}^n$	δ_{abc} , млн. кВт год	δ_{aid}
2002	282	---	---	---	---	---
2003	444	162	1,58	0,58	162	---
2004	726	282	1,63	0,63	119	0,06
2005	1459	733	2,01	1,01	451	0,38
2006	2493	1034	1,71	0,71	301	-0,30
2007	3772	1280	1,51	0,51	246	-0,20
2008	7434	3662	1,97	0,97	2382	0,46
2009	14021	6587	1,89	0,89	2926	-0,08
2010	22505	8484	1,61	0,61	1897	-0,28
2011	45312	22806	2,01	1,01	14322	0,41
2012	67403	22091	1,49	0,49	-715	-0,53
2013	80867	13464	1,20	0,20	-8628	-0,29

Як можна побачити, впродовж всього періоду обсяги виробництва електроенергії сонячними ФЕС зростають і сягають максимального значення у 2013 р. Додатними також є значення абсолютного приросту (1), які відображують абсолютну швидкість зміни рівнів ряду динаміки за рік. Відповідно до

показника відносної швидкості зміни рівня (2) для всіх років спостерігається зміна рівнів ряду, оскільки ланцюговий коефіцієнт зростання $k_t^n \neq 1$, причому ця зміна відбувається з підвищенням рівнів ($k_t^n > 1$). Однак, зміни відбуваються дуже нерівномірно: максимальне значення $k_t^n = 2,01$ відповідає 2005 р. і 2011 р., а мінімальне $k_t^n = 1,20$ фіксується для 2013 р. Причому порівняння значень Δ_t^n і k_t^n для однакових років показує, що уповільнення відносної швидкості зміни рівня за деякими роками не завжди супроводжується зменшенням абсолютних приростів. Максимальна інтенсивність змін рівня обсягів виробництва електроенергії сонячними ФЕС в країнах ЄС припадає на 2005 р. та 2011 р. $-T_{np_t}^n = 1,01$, а 2013 р. характеризується мінімальною інтенсивністю змін $-T_{np_t}^n = 0,20$. Додатне значення показника динаміки $\delta_{abc} > 0$ характеризує абсолютне прискорення динаміки обсягів виробництва електроенергії сонячними ФЕС до 2011 р., а з 2012 р. цей показник є від'ємним ($\delta_{abc} < 0$), що свідчить про абсолютне уповільнення. Показник δ_{vid} показує коливання від додатного до від'ємного значення впродовж всього періоду: відносне прискорення динаміки спостерігається для 2004 р., 2005 р., 2008 р. та 2011 р. ($\delta_{vid} > 0$), а для всіх інших років цей показник є від'ємним ($\delta_{vid} < 0$), що свідчить про відносне уповільнення динаміки. Таким чином, незважаючи на те, що впродовж всього періоду обсяги виробництва електроенергії сонячними ФЕС в країнах ЄС-28 зростають, починаючи з 2011 р., зменшуються ланцюговий коефіцієнт зростання і темп приросту, спостерігається абсолютне та відносне уповільнення динаміки виробництва електроенергії сонячними ФЕС.

Світові тенденції розвитку сонячної енергетики. На початку 2002 р. ініціаторами впровадження технологій сонячної енергетики було декілька європейських країн, зокрема, Німеччина та Італія, які і залишалися лідерами впродовж наступних 10 років. Однак, починаючи з 2013 р. відбулась зміна глобальних тенденцій, і основний щорічний вклад у розвиток світового ринку сонячних ФЕС почали вносити Китай, Японія і США [9-10]. На даний момент існують лише попередні дані про рівень розвитку сонячної енергетики в 2014 р. у різних регіонах світу [8], за якими у світі було встановлено та підключені до мережі близько 38,7 ГВт сонячних ФЕС, однак зростання ринку було нижче очікуваного. За висновками [8] світовий ринок сонячних ФЕС у 2014 р. характеризувався як рік неоднорідного зростання. Про це також свідчить аналіз показників динаміки ринку сонячних ФЕС, оцінених за (1)-(3). Відповідно до нього показники динаміки у 2014 р. мають з одного боку різні тенденції за регіонами світу, а з іншого - суттєво розрізняються та мають протилежну тенденцію між країнами одного регіону. Оскільки офіційно підтвердженої статистики для 2014 р. ще не опубліковано, далі розглянуто порівняльний аналіз країн світу на підставі попередніх даних за встановленими потужностями та теоретичних оцінок можливих обсягів виробництва, представлених у [8]. Загальна встановлена потужність у світі на кінець 2014 р. склала близько 177 ГВт. Порівняння 20 країн світу, у яких у 2014 р. значення фактичної встановленої потужності сонячних ФЕС перевищило 1 ГВт, надано на рис.5.

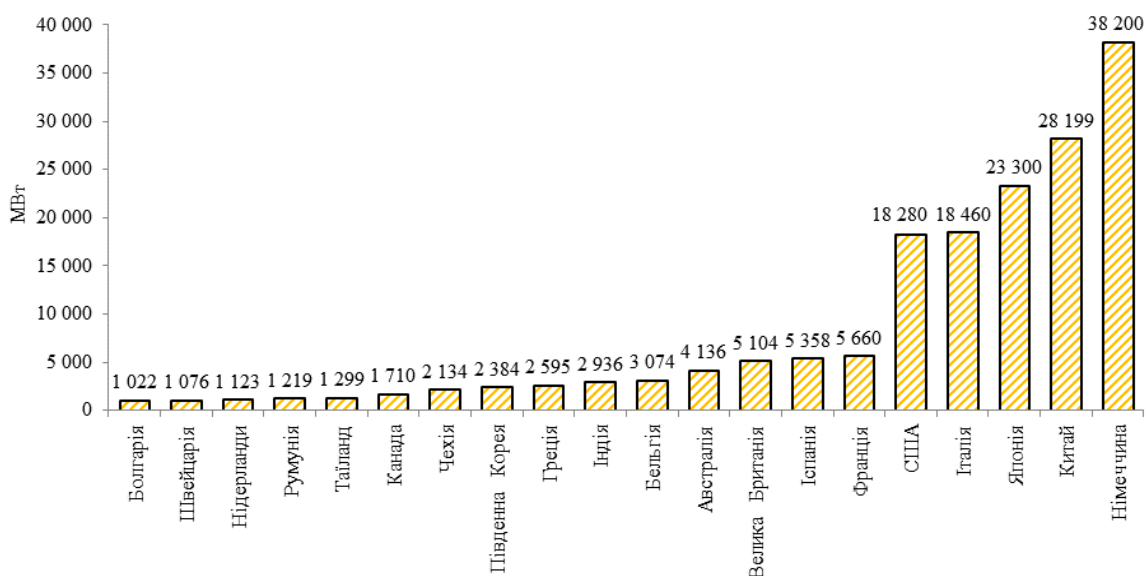


Рис.5. Країни світу з фактичною встановленою потужністю ФЕС більше 1 ГВт; 2014 р.

За підсумками розвитку ринку сонячних ФЕС у 2014 р. можна визначити наступні п'ять країн-лідерів за регіонами світу: 2 європейські країни – Німеччина та Італія; 2 країни Азіатсько-Тихоокеанського регіону – Китай та Японія; 1 країна в регіоні Північної Америки – США. Але тенденції на ринку сонячних ФЕС для цих країн були різні: якщо у Японії та США спостерігалось зростання щорічно встановлюваних потужностей, в Китаї - стабілізація, то в Європі продовжувалось падіння ринку, яке почалося у 2013 р. Зокрема, спад щорічної встановленої потужності і зменшення інтенсивності змін у динаміці ринку показав ланцюговий темп приросту $T_{np_t}^n$: для Німеччини - 0,06; Данії - 0,06; Бельгії - 0,06; Австрії - 0,12; Румунії - 0,19; Іспанії - 0,13. Він майже не змінювався в Чехії - 0,001; Італії - до 0,003; Греції - 0,006; Болгарії - 0,003.

З іншого боку, серед країн ЄС-28 ринок Великої Британії у порівнянні з минулим роком характеризувався значним зростанням за показником щорічної встановленої потужності - $T_{np_t}^n = 0,84$, також відмічались позитивні тенденції для ринку Франції - $T_{np_t}^n = 0,23$, та Нідерландів - $T_{np_t}^n = 0,70$. Серед інших європейських країн відмічається суттєве зростання у Швеції - $T_{np_t}^n = 1,28$ (79 МВт), та позитивна динаміка у Португалії - $T_{np_t}^n = 0,31$ (391 МВт).

Серед інших країн, де значення встановленої потужності на кінець 2014 р. досягли порівняно високих показників, слід відмітити ПАР - 922 МВт, Україну - 819 МВт, Тайвань - 776 МВт, Австрію - 766 МВт та Ізраїль - 731 МВт, але вони ще не змогли подолати відмітки 1 ГВт.

Проте, незважаючи на спад, як і раніше, лідером за значенням загальної фактичної встановленої потужності серед країн Європи та світу в 2014 р. залишалась Німеччина (див. рис.5).

Оцінка виробництва електроенергії сонячною енергетикою у 2014 р., наведена у [8], носить приблизний характер, оскільки повних статистичних даних для цього року ще немає. Обсяги електроенергії, які можуть бути вироблені сонячною генерацією за показниками встановлених потужностей, легко розрахувати для окремої ФЕС, але набагато складніше для всієї країни або регіонів світу. Складнощі у розрахункових оцінках пов'язані з декількома факторами: часом встановлення ФЕС (наприклад, якщо встановлення відбуватися в грудні, то цією ФЕС буде вироблено лише малу частку від прогнозного річного виробництва електроенергії); кліматичними умовами та регуляторними змінами, що відбулись у країнах за рік. З цих причин, якщо виробництво електроенергії сонячними ФЕС в країні оцінюється за сукупною потужністю, встановленою у 2014 р., то розрахунки виконуються для близького до оптимального розміщення ФЕС та їх орієнтації до сонячного випромінювання за середніх погодних умов досліджуемого регіону при незмінних регуляторних чинниках впливу. Тому, приймаючи до уваги певну неточність попередніх розрахунків для 2014 р., за обсягами виробництва електроенергії сонячної генерації принаймні 19 країн у світі мають достатньо можливостей для виробництва 1% від їх попиту на електроенергію за рахунок сонячної енергетики: Італія, Греція, Німеччина, Болгарія, Чехія, Бельгія, Іспанія, Румунія, Японія, Австралія, Ізраїль, Данія, Словаччина, Швейцарія, Австрія, Велика Британія, Франція, Португалія, Таїланд. У Європі загалом цей показник у 2014 р. склав близько 3,5%. Фактичні встановлені потужності Італії, Греції та Німеччини мають зараз можливості забезпечити відповідно 7,9%, 7,6% та 7,0% від їх річного попиту на електроенергію за рахунок сонячної енергетики.

За результатами проведеного дослідження можна виділити наступне. На ринках ФЕС, які існують вже довгий час, на даний момент присутня тільки незначна кількість країн. В 2014 р. розвиток ринків ФЕС, як і раніше, відбувався менш ніж в 40 країнах світу. У Європі найбільший розвиток сонячної генерації спостерігався до 2012 р., а впродовж останніх двох років відбувається спад. Поширення ФЕС в Україні стикається сьогодні з низкою перешкод як економічного, так і законодавчого характеру. Для їх подолання необхідно зменшення капіталоемності сонячної генерації, її інтеграція до ринку електроенергії, а також вирішення пов'язаних з цим законодавчих та нормативних питань з урахуванням досвіду країн, які є лідерами в даному секторі. Оскільки сонячна енергетика стає все більш конкурентоспроможною на ринках електроенергії, зміни в законодавчій базі й енергетичній політиці щодо підтримки її розвитку повинні бути максимально прозорими і передбачуваними. Неузгодженість у політиці призводить до збільшення необґрунтованих витрат як для інвесторів, так і для споживачів.

Висновки.

Порівняльний статистичний аналіз стану сонячної енергетики в країнах ЄС та Україні за показниками фактичної встановленої потужності сонячних ФЕС та обсягів виробленої ними електроенергії довів, що сьогодні розрахункові показники ППТ, визначені у НПДВЕ для сонячної генерації, втрачають прогнозне значення, оскільки у більшості країн ЄС впровадження сонячної генерації виконано на рівні цілей 2020 р. Це відбулось внаслідок зміни факторів впливу, де одним з

головних є зменшення вартості виробництва електроенергії сонячною генерацією, що підвищує її конкурентоспроможність і формує нові ринкові тенденції. В Україні, показники ІПТ для 2014 р. невиконані; окрім економічних факторів це пов'язано з припиненням постачання до об'єднаної енергетичної системи України електроенергії, виробленої сонячними ФЕС у АР Крим. За допомогою статистичного аналізу одномірних інтервальних рядів динаміки обсягів виробництва електроенергії сонячними ФЕС країн ЄС за період 2002-2013 рр. визначено, що, незважаючи на абсолютний приріст обсягів виробництва, вже з 2011 р. спостерігається зменшення ланцюгового коефіцієнту зростання і темпу приросту, а також абсолютне та відносне уповільнення динаміки. Порівняння розвитку ринку сонячних ФЕС за регіонами світу показав, що у 2014 р. відбувалось неоднорідне зростання, показники динаміки мали різні тенденції як за регіонами світу, так і між країнами одного регіону.

Список літератури

1. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC (Text with EEA relevance): [Електрон. ресурс]. - Режим доступ: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0028>
2. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року: [Електрон. ресурс]. - Режим доступ: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-p>
3. Eurostat Statistics Explained. Renewable energy statistics: [Електрон. ресурс]. - Режим доступ: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics
4. EUROBSERV'ER – the State of Renewable Energies in Europe. 2014 Edition / Editors: Observ'ER (FR), Renac (DE), Institute for Renewable Energy (IEO/EC BRECS, PL), Jožef Stefan Institute (SI), ECN (NL), Frankfurt School of Finance & Management (DE). - Printed by Imprimerie Graphius, 2014. - 212 pp.
5. Доповідь "Про соціально-економічне становище України за 2014 рік": [Електрон. ресурс]. - Режим доступ: http://ukrstat.org/uk/operativ/operativ2014/mp/dopovidx/arh_dop2014.html
6. Держенергоефективності України. Сучасний стан. Інформація щодо виробництва альтернативних видів палива та енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії: [Електрон. ресурс]. - Режим доступ: <http://sae.gov.ua/uk/activity/vidnovlyuvana-enerhetyka/suchasny-stan>
7. European Commission: Energy: Topics: Renewable energy: National action plans: [Електрон. ресурс]. - Режим доступ: <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/national-action-plans>
8. A Snapshot of Global PV (1992-2014) / Report IEA PVPS T1-26:2015. - IEA International Energy Agency, 2015. – 15 pp.
9. PV Status Report 2014 / Arnulf Jager-Waldau. – Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2014. – 50 pp.
10. Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018 (2014) /European Photovoltaic Industry Association: [Електрон. ресурс]. - Режим доступ: <http://www.epia.org/news/publications/global-market-outlook-for-photovoltaics-2014-2018/>
11. International Energy Agency. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy - 2014 edition. Release date: September 2014, 60 pages: [Електрон. ресурс]. - Режим доступ: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-solar-photovoltaic-energy---2014-edition.html>

G.G. Strelkova

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

ELECTRICITY GENERATION BY SOLAR PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS:

GLOBAL TRENDS AND STATE IN UKRAINE

The paper is devoted to assessment of the state of solar electricity generation in EU-28 and Ukraine through a comparative analysis by criteria of actual installed power capacity of solar photovoltaic systems and electricity produced by them; correspondence between the actual dynamics of solar electricity generation and calculated parameters of the indicative interim trajectory for the share of solar energy of National Action Plans for Renewable Energy is investigated for EU and Ukraine; the patterns of development are revealed by one-dimensional interval time series analysis for solar electricity generation through calculation of characteristics of time series – absolute increment, coefficient of growth and rate of increment; the global trends of solar photovoltaic market both for the world regions and between the countries in the region are given; the main factors impacting the solar energy development in Ukraine and in the world are considered.

Keywords: solar energy, installed power capacity, electricity production, rate of growth, indicative targets.

1. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC

- and 2003/30/EC (Text with EEA relevance): [Electronic resource]. – Access mode: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0028>
2. National Action Plan on Renewable Energy for the period to 2020: [Electronic resource]. – Access mode: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-p>
3. Eurostat Statistics Explained. Renewable energy statistics: [Electronic resource]. – Access mode: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics
4. EUROBSERV'ER – the State of Renewable Energies in Europe. 2014 Edition / Editors: Observ'ER (FR), Renac (DE), Institute for Renewable Energy (IEO/EC BREC, PL), Jožef Stefan Institute (SI), ECN (NL), Frankfurt School of Finance & Management (DE). - Printed by Imprimerie Graphius, 2014. - 212 pp.
5. Report on "Socio-economic situation of Ukraine for 2014": [Electronic resource]. – Access mode: http://ukrstat.org/uk/operativ/operativ2014/mp/dopovidx/arh_dop2014.html
6. Derzhenerhoefektyvnosti of Ukraine. Current state. Information on the production of alternative fuels and energy from renewable energy sources: [Electronic resource]. – Access mode: <http://sae.gov.ua/uk/activity/vidnovlyuvana-enerhetyka/suchasny-stan>
7. European Commission: Energy: Topics: Renewable energy: National action plans: [Electronic resource]. – Access mode: <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/national-action-plans>
8. A Snapshot of Global PV (1992-2014) / Report IEA PVPS T1-26:2015. - IEA International Energy Agency, 2015. – 15 pp.
9. PV Status Report 2014 / Arnulf Jager-Waldau. – Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2014. – 50 pp.
10. Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018 (2014) /European Photovoltaic Industry Association: [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.epia.org/news/publications/global-market-outlook-for-photovoltaics-2014-2018/>
11. International Energy Agency. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy - 2014 edition. Release date: September 2014, 60 pages: [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-solar-photovoltaic-energy---2014-edition.html>

УДК 620.91+ 621.31

Г.Г. Стрелкова, канд. физ.-мат наук, доцент

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ:
ГЛОБАЛЬНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И СОСТОЯНИЕ В УКРАИНЕ**

В работе дана оценка современного состояния солнечной энергетики в странах ЕС и Украине путем сравнительного анализа по критериям фактических установленных мощностей солнечных фотоэлектростанций и производимой ими электроэнергии; исследовано соответствие фактической динамики солнечной генерации расчетным показателям индикативных промежуточных траекторий Национальных планов действий по возобновляемой энергетике стран ЕС и Украины; выявлены закономерности развития с помощью статистического анализа одномерных интервальных рядов динамики объемов производства электроэнергии солнечными электростанциями и расчета цепных характеристик ряда динамики - абсолютного прироста, коэффициента роста, темпа прироста; приведены глобальные тенденции развития рынка солнечных фотоэлектростанций как по регионам мира, так и между странами одного региона; выделены основные факторы, влияющие на развитие солнечной энергетики в Украине и мире.

Ключевые слова: солнечная энергетика, установленная мощность, производство электроэнергии, темпы прироста, индикативные цели.

Надійшла 22.05.2015

Received 22.05.2015

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СРЕДСТВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ (ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ И ТРАДИЦИОННЫХ) ДЛЯ УСЛОВИЙ РЕСПУБЛИКИ ИРАК

В статье предпринята попытка использовать метод анализа иерархий для определения наиболее перспективных энерготехнологий генерации тепловой и электрической энергии для условий республики Ирак. Для анализа взяты восемь основных энерготехнологий и комплекс из семи критериев. Математический аппарат метода дает возможность определить уровень перспективности опираясь на паспортные данные энерготехнологии и экспертные оценки специалистов.

Ключевые слова: метод анализа иерархий; распределенная генерация; приоритет энерготехнологии.

Актуальность

Использование возобновляемых источников энергии – один из наиболее важных путей решения проблем глобального потепления, загрязнения окружающей среды, сохранения природных ресурсов, устойчивого развития регионов. Выбор наиболее эффективных технологий использования и альтернативных возобновляемых и традиционных источников энергии – очень важный шаг к формированию энергоэффективной инфраструктуры энергообеспечения различных потребителей - от единичного здания до общей энергосистемы государства.

Объект исследования – энергетическая инфраструктура республики Ирак.

Предмет исследования – процесс формирования эффективной энергетической инфраструктуры с комплексным использованием средств распределенной генерации (возобновляемых и традиционных).

Постановка задачи

В работе проведена оценка различных технологий производства электрической и тепловой энергии по множеству критериев с учетом метеорологических характеристик региона и потенциала местных видов топлива. Для расчета относительных приоритетов технологий на базе количественной информации, приведенной в паспортах, потенциала источника энергии в пределах выбранной территории, экономических, экологических показателей и экспертных оценок, касаемых важности критериев оценивания технологий, используется метод анализа иерархий (МАИ).

Метод анализа иерархий представляет собой систематическую процедуру для иерархического представления элементов, которые определяют суть задачи принятия решений, и состоит из нескольких этапов.

Первый этап предусматривает представление проблемы в виде иерархии или сети. В простейшем случае иерархия строится, начиная с цели, которая помещается в вершину иерархии, через промежуточные уровни, на которых располагаются критерии, и от которых зависят последующие уровни, к самому низкому уровню, который содержит перечень альтернатив.

В нашем случае имеем полную доминантную иерархию

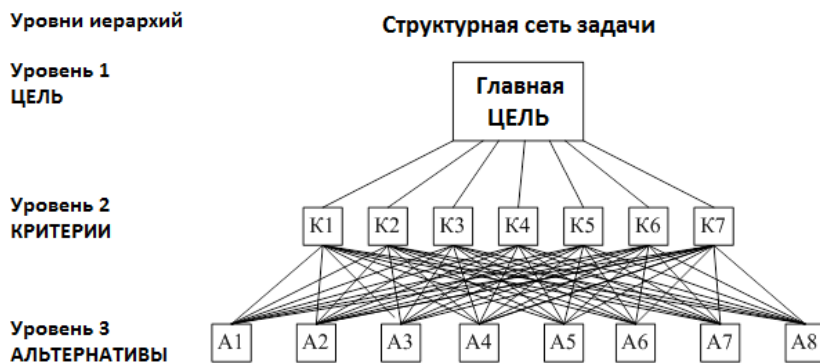


Рис. 1 Схематический вид доминантной иерархии

Цель – выбор наиболее эффективных энерготехнологий, которые используют альтернативные и возобновляемые источники, для генерации тепловой энергии – цель А и для генерации электрической энергии – цель Б.

Определим критерии, по которым производится оценка энерготехнологий:

K1 – мощность, вырабатываемая установкой, [кВт];

K2 – потенциал источника энергии для определенной технологии на заданной территории, [млн.т.у.т.];

K3 – уровень эффективности установки, [%];

K4 – уровень выбросов во время работы установки, [кг/МВт*час];

K5 – капитальные и начальные затраты при инсталляции установки, [€/кВт];

K6 – эксплуатационные затраты при работе установки, [€/МВт*час];

K7 – стоимость произведенной электрической и/или тепловой энергии при работе установки, [€/МВт].

Рассмотрим восемь технологий, которые используют ВИЭ для производства тепловой и/или электрической энергии.

Введем следующие обозначения:

A1 – солнечная энергетика;

A2 – ветровые турбины;

A3 – установки на биомассе;

A4 – установки, использующие природный газ;

A5 – установки, использующие рекуперацию тепловой энергии;

A6 – микро-/малые гидроэлектрические установки;

A7 – установки, использующие энергию сточных вод;

A8 – геотермальная энергетика.

Метод анализа иерархий требует от лица, принимающего решение (ЛПР), структурирования задачи принятия решения, то есть, составления иерархии в соответствии с целью, пониманием критериев и возможными альтернативами.

Второй этап. После иерархического представления задачи устанавливаются приоритеты критериев, после чего по этим критериям оценивается каждая альтернатива, и определяется наиболее весомая из них.

В методе анализа иерархий элементы сравниваются попарно, относительно влияния на общую для них характеристику. Результатом этой процедуры является обратно симметричная матрица.

Для проведения субъективных парных сравнений в методе анализа иерархий разработана шкала, представленная в табл. 1.

При проведении попарных сравнений ЛПР ставит перед собой следующие вопросы:

- при сравнении критериев – «Какой из критериев важнее?»;
- при сравнении альтернатив по отношению к критерию – «Какая из альтернатив наиболее желаемая?».
- Фундаментальная шкала относительной важности необходима, поскольку с ее помощью определяется численное выражение относительной взаимосвязи преимуществ.
- Матрица парных суждений критериев относительно цели приведена в табл.2 и табл.3.

Таблица 1

Фундаментальная шкала относительной важности

Интенсивность относительной важности	Качественная оценка	Объяснение
1	Равное значение	Элементы равные по своим значениям
3	Ненамного важнее	Опыт и суждения немного в пользу одного элемента по сравнению с другим
5	Существенно важнее	Опыт и суждения решительно выступают за один элемент относительно другого
7	Значительно важнее	Есть убедительные доказательства большей значимости одного элемента относительно другого
9	Абсолютно важнее	Приоритет одного элемента перед другим максимально подтверждается
2,4,6,8	Промежуточные оценки	Необходим компромис

Синтез приоритетов

После построения иерархии и определения величин парных субъективных суждений следует этап, на котором иерархическая декомпозиция и относительные суждения объединяются для получения осмысленного решения многокритериальной задачи принятия решений.

Из групп парных сравнений формируется набор локальных критериев, которые выражают относительное влияние элементов на элемент, расположенный на уровне выше.

После определения относительной ценности каждого элемента и нормализации численных результатов, получаем вектор приоритетов $q_2 = (q_{21}, q_{22}, q_{23}, \dots, q_{2n})$ (см. табл. 2, табл. 3).

Согласованность локальных приоритетов

Индекс согласованности ИС

Вместе с матрицей парных сравнений мы имеем меру оценки степени отклонения от согласованности. Когда такие отклонения превышают установленные пределы, тем, кто производит решение задачи, необходимо их пересмотреть.

С этой целью необходимо определить индекс согласованности и отношение согласованности.

Индекс согласованности:

$$ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0,1333.$$

Отношение согласованности ОС

Для определения того, насколько точно индекс согласованности ИС отражает согласованность суждений его необходимо сравнить со случайным индексом (СИ) согласованности, который соответствует матрице со случайными суждениями, выбранными из шкалы 1/9, 1/8, 1/7, 1/6, 1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, при условии равной вероятности выбора любого из приведённых чисел.

Значение ОС меньше или равно 0,10 считается приемлемым.

Отношение согласованности:

$$ОС = \frac{ИС}{СИ} = \frac{0,1333}{1,32} = 0,101.$$

Полученные экспертные оценки не имеют противоречий и есть согласованными, что позволяет доверять количественным оценкам, полученным на их основании.

Таблица 2

Матрица парных сравнений 7 критериев относительно цели А (генерация тепловой энергии)

ЦЕЛЬ А	К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7	ΣK_i	%	ω_i	q_{2i}	p_j
К1	1	1/4	3	1/3	1/2	1/2	1/3	5.92	7	0,575	0,0645	0,988
К2	4	1	6	3	4	5	4	27.0	33	3,45	0,386	0,946
К3	1/3	1/6	1	1/3	3	3	2	9.83	12	0,855	0,0958	1,357
К4	3	1/3	3	1	3	4	3	17.33	21	1,952	0,219	1,221
К5	2	1/4	1/3	1/3	1	3	1/3	7.25	9	0,662	0,0741	1,100
К6	2	1/5	1/3	1/4	1/3	1	1/2	4.62	6	0,476	0,0534	0,987
К7	3	1/4	1/2	1/3	3	2	1	10.08	12	0,960	0,1075	1,201
Total	15,33	2,45	14,17	5,58	14,83	18,50	11,17	82,0	100	$r=8,92$		$\lambda_{\max}=7,80$

Таблица 3

Матрица парных сравнений 7 критериев относительно цели Б (генерация электроэнергии)

ЦЕЛЬ Б	К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7	ΣK_i	%	ω_i	q_{2i}	p_j
К1	1	1/6	3	1/4	1/5	1/3	1/4	5,20	6	0,41	0,04	1,04
К2	6	1	6	3	4	4	3	27,00	29	3,39	0,36	0,91
К3	1/3	1/6	1	1/4	3	3	1/3	8,08	9	0,64	0,07	1,21
К4	4	1/3	4	1	2	4	2	17,33	19	1,89	0,20	1,17
К5	5	1/4	1/3	1/2	1	3	1/6	10,25	11	0,72	0,08	1,29
К6	3	1/4	1/3	1/4	1/3	1	1/5	5,37	6	0,46	0,05	1,00
К7	4	1/3	3	1/2	6	5	1	19,83	21	1,79	0,19	1,34
Total	23,3	2,5	17,67	5,75	16,53	20,3	6,95	93,07	100	$r=9,31$		$\lambda_{\max}=7,95$

Расчитываем матрицы парных сравнений альтернатив относительно критериев и приоритеты альтернатив (табл. 4 – 11).

Таблица 4

Матрицы парных сравнений альтернатив относительно критерия K1 и приоритеты альтернатив

K1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	ΣK_i	%	ω_i	q_{2i}	p_j
A1	1	2	1/5	1/9	1/9	1/3	1/3	1/3	4,42	3	0,34	0,03	0,92
A2	1/2	1	1/8	1/8	1/9	1/4	1/2	1/2	3,11	2	0,29	0,02	0,85
A3	5	8	1	1/3	1/2	3	4	3	24,83	17	1,98	0,16	1,16
A4	9	8	3	1	1	4	7	8	41,00	28	3,85	0,31	0,96
A5	9	9	2	1	1	4	8	7	41,00	28	3,72	0,30	0,97
A6	3	4	1/3	1/4	1/4	1	2	3	13,83	9	1,05	0,08	1,14
A7	3	2	1/4	1/7	1/8	1/2	1	1/4	7,27	5	0,49	0,04	1,06
A8	3	2	1/3	1/8	1/7	1/3	4	1	10,93	7	0,68	0,06	1,27
									146,40	100	$r=12,41$		$\lambda_{\max}=8,33$

Таблица 5

Матрицы парных сравнений альтернатив относительно критерия K2 и приоритеты альтернатив

K2	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	ΣK_i	%	ω_i	q_{2i}	p_j
A1	1	1	1/6	2	1/2	3	2	1/4	9,92	7	0,84	0,07	1,05
A2	1	1	1/6	5	1/4	3	3	1/5	13,62	9	0,88	0,07	1,28
A3	6	6	1	8	2	9	8	2	42,00	29	4,12	0,33	0,90
A4	1/2	1/5	1/8	1	1/5	2	1/3	1/9	4,47	3	0,34	0,03	0,93
A5	2	4	1/2	5	1	6	7	1/3	25,83	18	2,02	0,16	1,19
A6	1/3	1/3	1/9	1/2	1/6	1	1/4	1/8	2,82	2	0,27	0,02	0,80
A7	1/2	1/3	1/8	3	1/7	4	1	1/7	9,24	6	0,52	0,04	1,20
A8	4	5	1/2	9	3	8	7	1	37,50	26	3,33	0,27	1,12
									145,40	100	$r=12,33$		$\lambda_{\max}=8,47$

Таблица 6

Матрицы парных сравнений альтернатив относительно критерия K3 и приоритеты альтернатив

K3	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	ΣK_i	%	ω_i	q_{2i}	p_j
A1	1	1/2	1/4	1/2	1/2	1/3	1	1/9	4,19	3	0,43	0,03	0,82
A2	2	1	1/2	1/2	1/2	2	3	1/9	9,61	7	0,80	0,06	1,10
A3	4	2	1	1	3	5	5	1/7	21,14	16	1,74	0,14	1,45
A4	2	2	1	1	2	3	3	1/8	14,13	11	1,32	0,10	1,27
A5	2	2	1/3	1/2	1	3	3	1/8	11,96	9	0,96	0,08	1,20
A6	3	1/2	1/5	1/3	1/3	1	2	1/9	7,48	6	0,54	0,04	1,02
A7	1	1/3	1/5	1/3	1/3	1/2	1	1/9	3,81	3	0,38	0,03	0,81
A8	9	9	7	8	8	9	9	1	60,00	45	6,43	0,51	0,94
									132,32	100	$r=12,61$		$\lambda_{\max}=8,61$

Таблица 7

Матрицы парных сравнений альтернатив относительно критерия К4 и приоритеты альтернатив

К4	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	ΣK_i	%	ω_i	q_{2i}	p_j
A1	1	1	2	1	2	6	9	6	28,00	22	2,45	0,22	0,99
A2	1	1	3	2	2	8	9	4	30,00	23	2,77	0,25	0,96
A3	1/2	1/3	1	1/2	1	4	5	3	15,33	12	1,22	0,11	1,09
A4	1	1/2	2	1	2	7	8	5	26,50	21	2,21	0,20	1,10
A5	1/2	1/2	1	1/2	1	4	5	3	15,50	12	1,29	0,12	1,03
A6	1/6	1/8	1/4	1/7	1/4	1	1	1	3,93	3	0,34	0,03	0,99
A7	1/9	1/9	1/5	1/8	1/5	1	1	1/2	3,25	3	0,27	0,02	0,99
A8	1/6	1/4	1/3	1/5	1/3	1	2	1	5,28	4	0,46	0,04	0,97
									127,80	100	$r=11,00$		$\lambda_{\max}=8,12$

Таблица 8

Матрицы парных сравнений альтернатив относительно критерия К5 и приоритеты альтернатив

К5	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	ΣK_i	%	ω_i	q_{2i}	p_j
A1	1	1/2	1/8	1/9	1/5	1/7	1/8	1/6	2,37	2	0,21	0,02	0,76
A2	2	1	1/8	1/7	2	1/4	1/2	1/3	6,35	4	0,48	0,04	0,98
A3	8	8	1	1/2	7	6	5	5	40,50	27	3,68	0,29	1,14
A4	9	7	2	1	9	5	5	4	42,00	28	4,28	0,33	0,84
A5	5	1/2	1/7	1/9	1	1/4	1/3	1/5	7,54	5	0,40	0,03	0,98
A6	7	4	1/6	1/5	4	1	1	1/2	17,87	12	1,08	0,08	1,32
A7	8	2	1/5	1/5	3	1	1	1/2	15,90	10	0,99	0,08	1,16
A8	6	3	1/5	1/4	5	2	2	1	19,45	13	1,67	0,13	1,52
									151,98	100	$r=12,80$		$\lambda_{\max}=8,71$

Таблица 9

Матрицы парных сравнений альтернатив относительно критерия К6 и приоритеты альтернатив

К6	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	ΣK_i	%	ω_i	q_{2i}	p_j
A1	1	5	2	3	9	2	4	9	35,00	26	3,44	0,31	0,92
A2	1/5	1	1/3	1/2	6	1/3	1	3	12,37	9	0,82	0,07	1,13
A3	1/2	3	1	2	9	1	3	5	24,50	18	2,12	0,19	1,04
A4	1/3	2	1/2	1	9	1/2	2	4	19,33	14	1,36	0,12	1,14
A5	1/9	1/6	1/9	1/9	1	1/9	1/9	1/2	2,22	2	0,19	0,02	0,90
A6	1/2	3	1	2	9	1	2	5	23,50	17	2,01	0,18	1,02
A7	1/4	1	1/3	1/2	9	1/2	1	2	14,58	11	0,88	0,08	1,08
A8	1/9	1/3	1/5	1/4	2	1/5	1/2	1	4,59	3	0,37	0,03	0,98
									136,10	100	$r=11,19$		$\lambda_{\max}=8,20$

Таблица 10

Матрицы парных сравнений альтернатив относительно критерия К7 и приоритеты альтернатив

К7	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	ΣK_i	%	ω_i	q_{2i}	p_j
A1	1	1/2	1/6	1/8	1/3	1/2	2	1/9	4,74	4	0,37	0,03	1,02
A2	2	1	1/3	1/3	1	2	2	1/5	8,87	7	0,81	0,07	1,01
A3	6	3	1	1	3	5	6	1/2	25,50	20	2,31	0,20	1,04
A4	8	3	1	1	3	5	5	1/2	26,50	21	2,34	0,20	1,05
A5	3	1	1/3	1/3	1	2	3	1/5	10,87	9	0,89	0,08	1,09
A6	2	1/2	1/5	1/5	1/2	1	1	1/8	5,53	4	0,47	0,04	1,00
A7	1/2	1/2	1/6	1/5	1/3	1	1	1/9	3,81	3	0,36	0,03	0,91
A8	9	5	2	2	5	8	9	1	41,00	32	3,99	0,35	0,95
									126,81	100	$I^* = 11,55$		$\lambda_{\max} = 8,08$

Таблица 11

Матрицы парных сравнений альтернатив относительно критерия К8 и приоритеты альтернатив

К8	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	ΣK_i	%	ω_i	q_{2i}	p_j
A1	1	4	2	3	9	9	9	9	46,00	37	4,46	0,38	0,96
A2	1/4	1	1/2	1	3	3	3	3	14,75	12	1,34	0,11	1,06
A3	1/2	2	1	2	6	6	6	7	30,50	24	2,72	0,23	1,08
A4	1/3	1	1/2	1	3	3	3	3	14,83	12	1,38	0,12	0,98
A5	1/9	1/3	1/6	1/3	1	1	1	1	4,94	4	0,46	0,04	0,98
A6	1/9	1/3	1/6	1/3	1	1	1	1	4,94	4	0,46	0,04	0,98
A7	1/9	1/3	1/6	1/3	1	1	1	1	4,94	4	0,46	0,04	0,98
A8	1/9	1/3	1/7	1/3	1	1	1	1	4,92	4	0,45	0,04	1,00
									125,84	100	$I^* = 11,74$		$\lambda_{\max} = 8,03$

Синтез альтернатив

Приоритет j -го элемента третьего уровня определяется как

$$q_1 = q_{311} \cdot q_{21} + q_{321} \cdot q_{22} + q_{331} \cdot q_{23} + \dots + q_{3n1} \cdot q_{2n},$$

$$q_2 = q_{312} \cdot q_{21} + q_{322} \cdot q_{22} + q_{332} \cdot q_{23} + \dots + q_{3n2} \cdot q_{2n},$$

$$q_3 = q_{313} \cdot q_{21} + q_{323} \cdot q_{22} + q_{333} \cdot q_{23} + \dots + q_{3n3} \cdot q_{2n},$$

...

$$q_n = q_{31n} \cdot q_{21} + q_{32n} \cdot q_{22} + q_{33n} \cdot q_{23} + \dots + q_{3nn} \cdot q_{2n}$$

где q_{3k} – вектор приоритетов k -й матрицы, размещенной на третьем уровне;

q_{3ki} – i -й элемент вектора приоритетов k -й матрицы суждений, размещенной на третьем уровне;

q_{2k} – k -й элемент вектора приоритетов матрицы суждений, размещенной на третьем уровне;

q_j – приоритет j -го элемента третьего уровня.

Результаты анализа технологий по группе критериев для цели А (генерация тепловой энергии) приведены в таблице 12 и на рис. 2, а для цели Б (генерация электроэнергии) – в таблице 13, рис. 3.

Таблица 12

Рейтинг энерготехнологий для цели А

q_j	%	Рейтинг
0,10	10	6
0,10	10	5
0,23	22	2
0,11	10	4
0,13	12	3
0,05	4	7
0,04	4	8
0,27	26	1

1,03 100

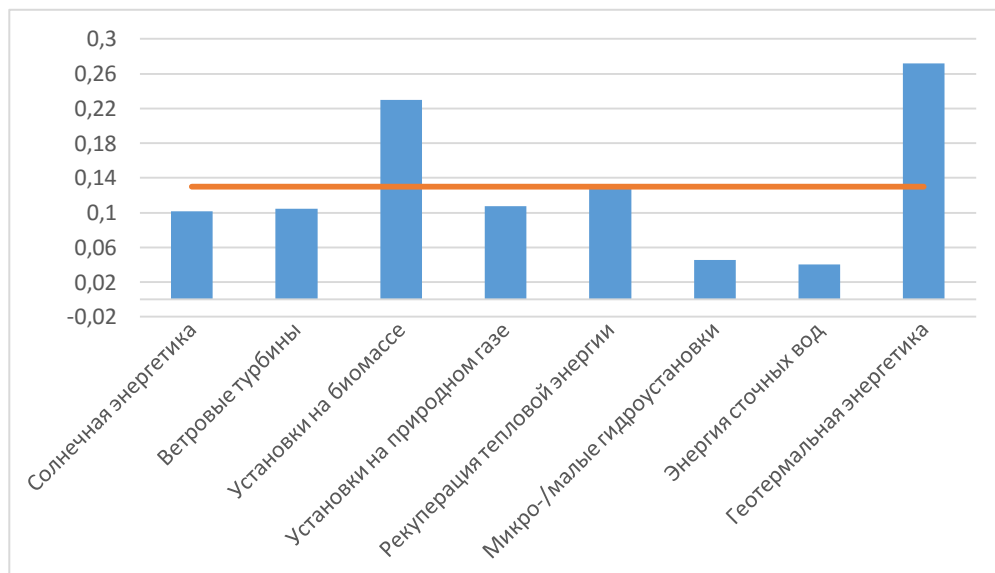


Рис. 2 Рейтинг энерготехнологий для цели А

Таблица 13

Рейтинг энерготехнологий для цели Б

q_j	%	Рейтинг
0,16	16	2
0,11	11	6
0,24	24	1
0,13	13	4
0,11	11	5
0,04	4	8
0,04	4	7
0,16	16	3

1,00 100

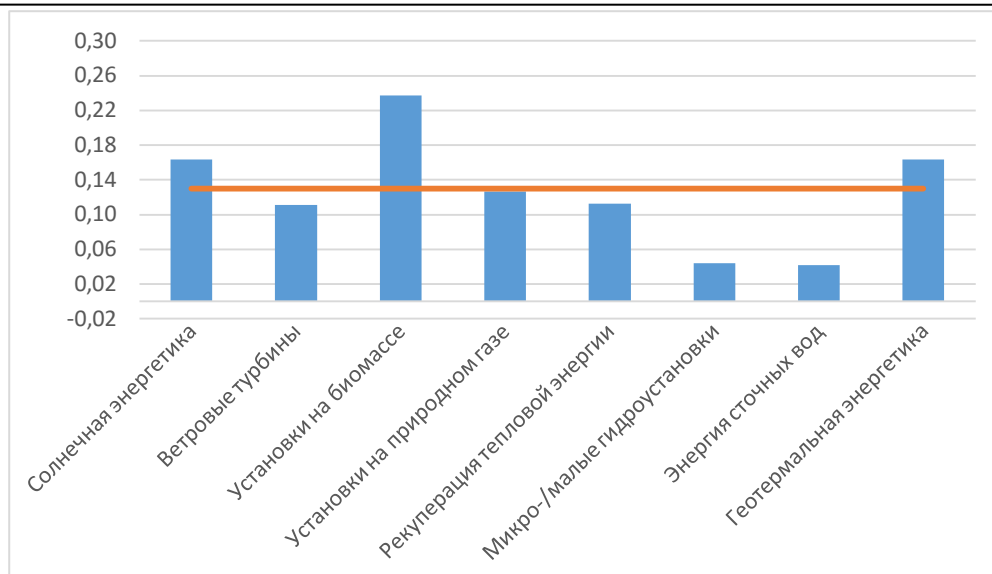


Рис. 3 Рейтинг энерготехнологий для цели Б

Выводы

Таким образом, используя количественную информацию, приведенную в паспортах энерготехнологий, а также оценки важности критериев и оценки технологий по комплексу критериев для условий республики Ирак получены следующие результаты – наиболее перспективными энерготехнологиями следует считать:

- установки на биомассе;
- геотермальную энергетику;
- солнечную энергетику;
- установки на природном газе.

Эти технологии эффективны и для цели генерации тепловой энергии, и для цели генерации электрической энергии.

Список литературы

1. Saaty T.L. Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary European Journal of Operational Research. 2003. Vol. 145, №1. P. 85 – 91.
2. Saaty Thomas L. Theory of the Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes- Examples, Part 2.2. System research and information technologies. 2003. - №2. С. 7-34.
3. Saaty Thomas L. The Analytic Network Process, Examples, Part 2.3. Системні research and information technology. 2003. №4. С. 7 – 23.
4. Analytic Hierarchy Process Approach for Criteria Ранкінг of Sustainable Building Assessment: A Case Study Mathematical and Computer Modelling 46 (2007) 1071–1080
5. Applying the Analytic Hierarchy Process (AHP) to build a strategic
6. framework for technology road mapping Mathematical and Computer Modelling 46 (2007) 1071–1080
7. An Analytic Hierarchy Process for the Evaluation of Transport Policies to Reduce Climate Change Impacts M. Berritella, A. Certain. Mena

УДК 621.311

А. М. Ковальчук канд. техн. наук, доцент
Ш. Ф. Абдул Разак

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» ЭФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ (ВІДНОВЛЮВАНИХ ТА ТРАДИЦІЙНИХ) ДЛЯ УМОВ РЕСПУБЛІКИ ІРАК

У статті зроблено спробу застосувати метод аналізу ієрархії для виявлення найбільш перспективних енерготехнологій генерування теплової та електричної енергії для умов республіки Ірак. Для аналізу взяті всі основні енерготехнології і комплекс із семи критеріїв. Математичний апарат методу дає можливість визначити рівень перспективності, опираючись на паспортні дані енерготехнології та експертні оцінки фахівців.

Ключові слова: метод аналізу ієрархії; розосереджена генерація; пріоритет енерготехнологій.

A. Kovalchuk, Shafeek F. Abdul Razak

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

**EFFICIENT USE OF THE DISTRIBUTED GENERATION (RENEWABLE AND TRADITIONAL)
FOR THE CONDITIONS OF THE REPUBLIC OF IRAQ**

The article attempts to use the method of analytic hierarchy process to determine the most promising energy technologies generate heat and electricity for the conditions of the Republic of Iraq. For the analysis taken eight major energy technologies and a complex of seven criteria. The mathematical apparatus of the method makes it possible to determine the level of prospects based on the passport data of energy technologies and expert judgments.

Keywords: method of analysis ierarhy; distributed generation; priority energy technologies

1. Saaty T.L. Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary European Journal of Operational Research.2003. Vol.145, №1. P.85 – 91.
2. Saaty Thomas L. Theory of the Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes- Examples, Part 2.2. System research and information technologies. 2003. - №2. С.7 34.
3. Saaty Thomas L. The Analytic Network Process, Examples, Part 2.3. Системні research and information technology. 2003. №4. С.7 – 23.
4. Analytic Hierarchy Process Approach for Criteria Ранкінг of Sustainable Building Assessment: A Case Study Mathematical and Computer Modelling 46 (2007) 1071–1080
5. Applying the Analytic Hierarchy Process (AHP) to build a strategic
6. framework for technology road mapping Mathematical and Computer Modelling 46 (2007) 1071–1080
7. An Analytic Hierarchy Process for the Evaluation of Transport Policies to Reduce Climate Change Impacts M.Berritella, A. Certain. Mena

Надійшла 23.04.2015

Received 23.04.2015

УДК 621.331.3.025.1

Д. О. Босий, канд. техн. наук, доцент

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ ТЯГОВИХ
ПІДСТАНЦІЙ ЗМІННОГО СТРУМУ В УМОВАХ ТРАНЗИТНИХ
ПЕРЕТІКАНЬ ПОТУЖНОСТІ**

В статті розглядається явище виникнення вирівнювальних струмів в тяговій мережі змінного струму при відхиленнях кута зсуву фаз однойменних напруг суміжних тягових підстанцій, що паралельно живлять міжпідстанційну зону. На підставі результатів експериментальних досліджень тягової підстанції Одеської залізниці досліджується вплив пристроїв поздовжньої та поперечної компенсації реактивної потужності на характеристики вирівнювальних струмів. Запропонована методика визначення параметрів поздовжньої компенсації реактивної потужності у відсмоктуючому фідері для переведення проблеми транзитних перетікань у реактивну площину з подальшим застосуванням пристроїв поперечної компенсації.

Ключові слова: електрична тяга, змінний струм, тягова підстанція, паралельна робота, транзит потужності, вирівнювальний струм.

Вступ

Електрифіковані залізниці змінного струму є досить специфічним споживачем електричної енергії. Окрім того, що електротягове навантаження є несиметричним та нелінійним споживачем зі змінним у часі та просторі навантаженням, мають місце істотні відмінності від інших споживачів. Ці відмінності полягають у тому, що електрифікована залізниця є розосередженим приймачем електроенергії та її живлення апіорі неможливе від одного вузла енергосистеми.

У загальному випадку тягові підстанції отримують живлення від різних вузлів однієї або навіть декількох енергосистем. Це призводить до того, що тягові підстанції мають різні приведені зовнішні характеристики та замикаючись через тягову мережу спостерігається відмінність у модулях та кутах зсуву фаз напруг в точках приєднання до вузлів енергосистем. Наявність вказаних чинників призводить до виникнення транзитних перетікань потужності між вузлами живлення, які більш за все проявляються при відсутності чи відносно низьких навантаженнях в тяговій мережі.

В умовах лібералізації ринкових відносин, коли залізниці України стали ліцензіатами оптового ринку, разом з іншими суб'єктами ринку формуються відносини, які не передбачають оплати послуг за будь-які транзитні перетікання активної та реактивної потужностей.

Системі тягового електропостачання змінного струму для забезпечення заданих розмірів руху та пропускної спроможності технологічно необхідне одночасне живлення ділянок тягової мережі від двох суміжних тягових підстанцій, бо інакше спроектовані параметри ділянок електрифікованих залізниць не забезпечать нормований рівень на лімітуючих блок-ділянках. В нормальному режимі роботи пристроїв електропостачання для системи змінного струму не характерні проблеми з рівнем напруги в контактній мережі, навіть при впровадженні швидкісного та великовантажного руху.

Методика вимірювань

У випадках порушення нормальної схеми живлення в системі зовнішнього електропостачання між векторами однойменних первинних напруг виникає кут зсуву фаз, який викликає відповідну векторну різницю напруг на шинах тягового навантаження підстанцій. Під дією різниці напруг, зумовленою саме кутом зсуву фаз тяговою мережею, яка має активно-індуктивний характер, протікає майже активний вирівнювальний струм. Внаслідок того, що тягові підстанції можуть у схемі зовнішнього електропостачання живитись від різних енергосистем, в системі тягового електропостачання виникають транзитні перетоки потужності, які будуть однозначно визначатись кутом зсуву фаз між векторами напруги, що паралельно живлять міжпідстанційну зону.

Для чисельного визначення та фіксації цього кута зсуву фаз, застосовувалась схема (рис. 1), яка додатково вимагає консольного живлення дослідної ділянки тягової мережі від суміжної підстанції. В такому випадку за допомогою наявного аналізатора потужності, відповідно зі схемою, можна виміряти різницю між напругами суміжних тягових підстанцій за величиною та кутом зміщення фаз. Саме кут зміщення векторів напруги, що живлять міжпідстанційну зону, визначатиме можливість протікання та активний характер перетоків електроенергії.

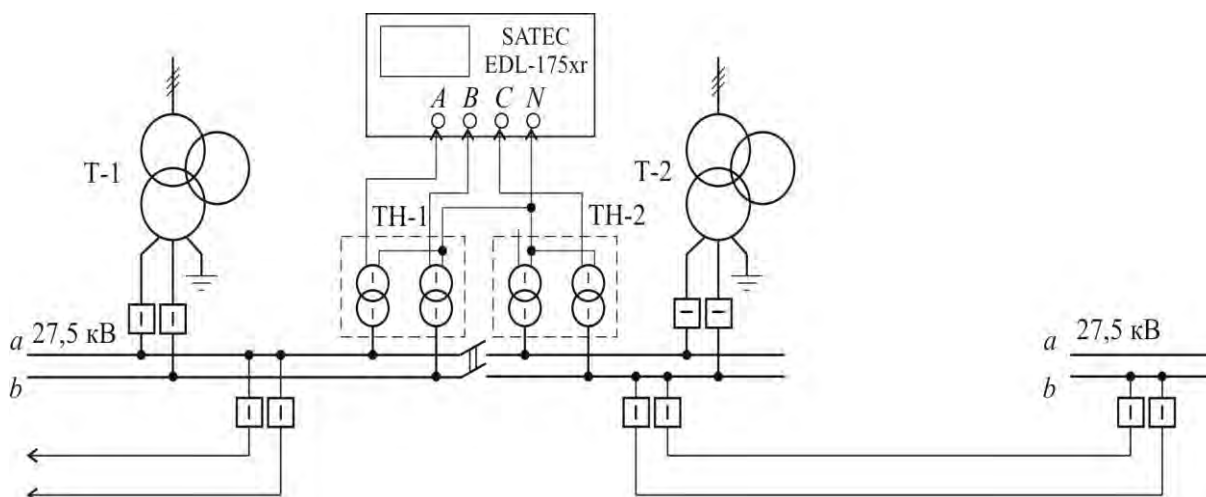


Рис. 1. Схема проведення вимірювань на тяговій підстанції для вимірювання кута зсуву фаз між однойменними векторами напруги

Аналіз отриманих результатів

Керування режимом роботи системи змінного струму повинне керуватись кутом зсуву фаз векторів напруги суміжних тягових підстанцій. Вимірювання цього параметру режиму в умовах експлуатації дещо ускладнюється, оскільки необхідно мати джерело опорної напруги або вимушено застосовувати ненормальні схеми живлення. Так, для отримання приведеної на рис. 2 реєстрограми застосовувалось консольне живлення ділянки між суміжними підстанціями та розділення секцій шин 27,5 кВ з підключенням до трансформаторів напруги кожної секції вимірювальної апаратури.

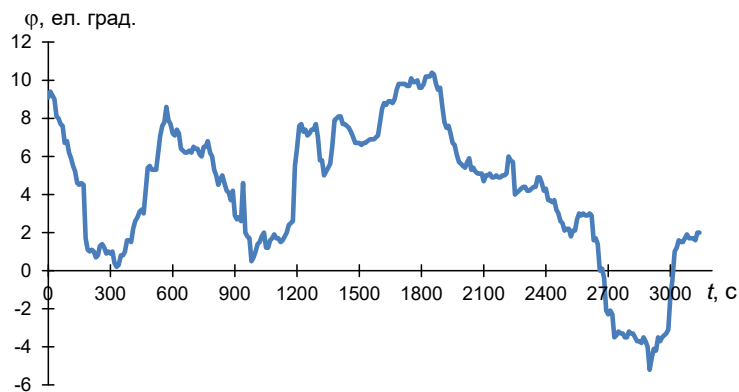


Рис. 2. Зміна кута зсуву фаз між однойменними фазами у часі

Активний характер вирівнювальних струмів в такому випадку ускладнює технічну реалізацію заходів протидії транзитним перетіканням. Тому застосування поперечної компенсації реактивної потужності впливатиме лише на реактивну складову вирівнювального струму. Перемикання положень апацф трансформатора внесе певні корективи (рис. 3) але без остаточного їх уникнення. Вирішення можливе застосуванням фазозсуваючих силових трансформаторів з інтелектуальною системою управління. Вимірювальними органами такої системи можуть бути пристрої комплексних вимірювань електричних параметрів мережі, а виконавчими – пристрої перемикання обмоток трансформаторів, які зібрані за схемою зигзагу [1]. Проте, як показав досвід експлуатації, використання фазозсуваючих трансформаторів виправдане в мережах напругою 150 кВ та вище. Тому, очевидно, що для узгодження тягових підстанцій змінного струму, які отримують живлення в основному напругою 110 кВ, та в окремих випадках в якості винятку – 154 кВ, застосування фазозсуваючих трансформаторів не буде виправданим, ще й тому, що узгодження відбуватиметься лише за однією фазою трифазної системи.

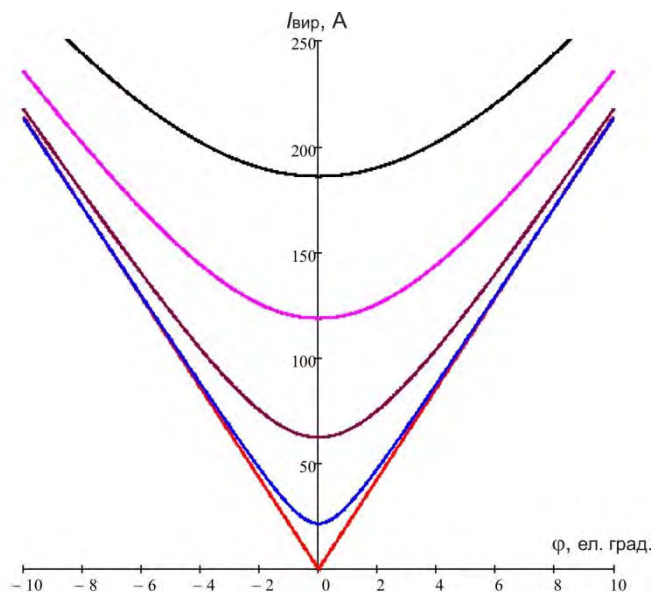


Рис. 3. Залежності вирівнювальних струмів в тяговій мережі на фазовій площині від положень перемикачів апацф трансформаторів

Застосування поздовжньої та поперечної ємнісної компенсації

На тягових підстанціях електрифікованих залізниць з трифазними трансформаторами можливе встановлення установок поздовжньої компенсації у відсмоктуючий фідер [2]. Доцільність цього рішення полягає в тому, що, по-перше, при підвищених навантаженнях і в лівому, і в правому плечах живлення компенсація у відсмоктуючому фідері приймає участь у підвищенні напруги. Необхідно відмітити, що при ввімкненні поздовжньої компенсації у плечі живлення для досягнення таких умов знадобилося вмикання двох установок.

По-друге, при ввімкненні поздовжньої компенсації у відсмоктуючий фідер напруга на плечі живлення не буде залежати від навантаження іншого плеча, тобто усувається ефект випереджуючої та відстаючої фаз. При цьому досягається симетрія напруги при рівних струмах плечах живлення. Та, нарешті, підключення компенсації у відсмоктуючий фідер знижує клас напруги застосовуваного обладнання та спрощує конструктивне виконання установки.

На тягових підстанціях змінного струму встановлюють, як правило, два силових трансформатори. Зазвичай у роботі знаходиться лише один трансформатор, але при відключенні сусідньої підстанції, а також при значному підвищенні розмірів руху та ваги вантажних поїздів з різних причин вмикають другий трансформатор. Таким чином, за рахунок включення другого трансформатора зменшується опір тягової підстанції. Через це при зміні числа ввімкнених трансформаторів необхідно передбачити зміну параметрів пристрою поздовжньої компенсації. Досвід застосування поздовжньої компенсації у тяговому електропостачанні виявив переваги їх підключення до відсмоктуючого фідера підстанції з трифазними трансформаторами.

Для дослідження впливу поздовжньої компенсації на характер вирівнювальних струмів задамося схемою заміщення тягової мережі в загальному виді (рис. 4).

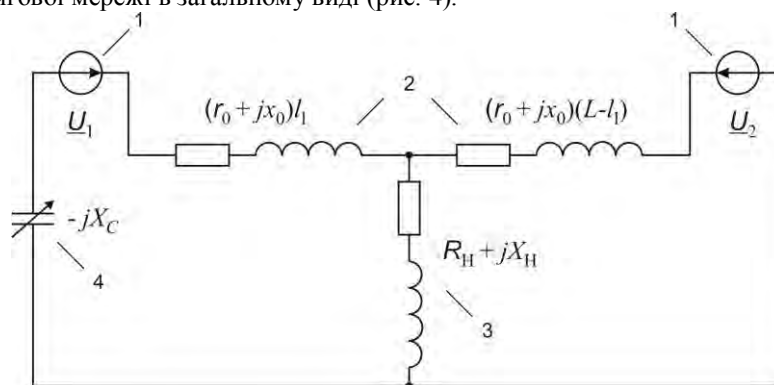


Рис. 4. Схема заміщення міжпідстанційної зони при застосуванні поздовжньої компенсації
1 - фаза трансформатора; 2 – контактна мережа; 3 – навантаження; 4 – поздовжня компенсація

Отримаємо вираз для знаходження вирівнювального струму в тяговій мережі в загальному виді

$$I_{\text{вир}} = \frac{U_1 - U_2}{(r_0 + jx_0) \cdot L - jX_C}, \quad (1)$$

де $\underline{U}_1, \underline{U}_2$ – вектори напруги на шинах суміжних тягових підстанцій, В;

$r_0 + jx_0$ – питомий опір тягової мережі, в подальших розрахунках прийнято $0,2 + j 0,4$ Ом/км;

L – довжина міжпідстанційної зони, приймається рівною 50 км;

X_C – опір пристрою поздовжньої компенсації, Ом.

В такому випадку, залежність модулю вирівнювального струму та його кута зсуву від значення опору поздовжньої компенсації матиме вигляд, приведений на рис. 5, 6.

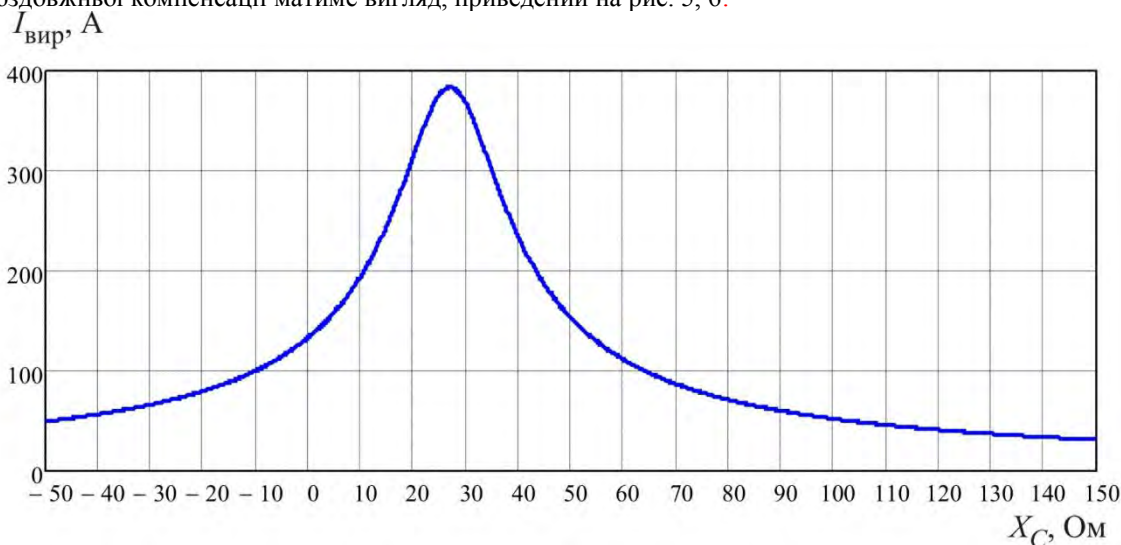


Рис. 5. Залежність модулю вирівнювального струму від опору поздовжньої компенсації

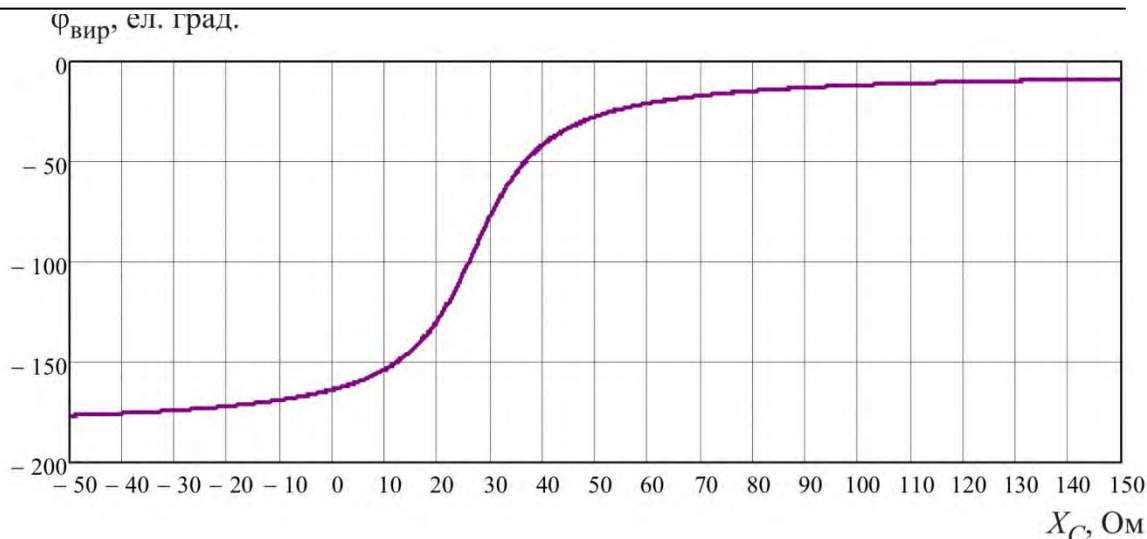


Рис. 6. Залежність кута вирівнювального струму від опору поздовжньої компенсації

Приведені вище розрахунки виконані для максимального значення кута зсуву напруги у фазі А на тяговій підстанції «Шевченка» Одеської залізниці, а саме для 10 ел. градусів.

Для дослідження характеристик вирівнювального струму при застосуванні поперечної компенсації використано схему заміщення, яка приведена на рис. 7.

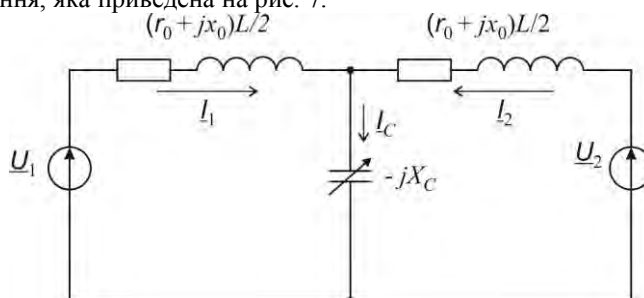


Рис. 7. Схема заміщення міжпідстанційної зони при поперечній компенсації

Виразимо математично значення струмів навантаження та струму компенсації. Для цього складемо систему рівнянь за законами Кірхгофа:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_C = 0; \\ I_1 (r_0 + jx_0)L/2 - jX_C \cdot I_C = \underline{U}_1; \\ I_2 (r_0 + jx_0)L/2 - jX_C \cdot I_C = \underline{U}_2. \end{cases} \quad (2)$$

Виконуючи перетворення в загальному виді отримаємо вирази для знаходження струмів:

$$I_1 = \frac{L\underline{U}_1 r_0 + L\underline{U}_2 r_0 - jL\underline{U}_1 x_0 - jL\underline{U}_2 x_0 + 4j\underline{U}_1 X_C + 4j\underline{U}_2 X_C}{L^2 r_0^2 + L^2 x_0^2 - 8LX_C x_0 + 16X_C^2} + \frac{16\underline{U}_1 X_C^2 r_0 - 16\underline{U}_2 X_C^2 r_0 - j16\underline{U}_1 X_C^2 x_0 + j16\underline{U}_2 X_C^2 x_0}{16LX_C^2 (r_0^2 + x_0^2)}; \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{L\underline{U}_1 r_0 + L\underline{U}_2 r_0 - jL\underline{U}_1 x_0 - jL\underline{U}_2 x_0 + 4j\underline{U}_1 X_C + 4j\underline{U}_2 X_C}{L^2 r_0^2 + L^2 x_0^2 - 8LX_C x_0 + 16X_C^2} + \frac{16\underline{U}_1 X_C^2 r_0 - 16\underline{U}_2 X_C^2 r_0 - j16\underline{U}_1 X_C^2 x_0 + j16\underline{U}_2 X_C^2 x_0}{16LX_C^2 (r_0^2 + x_0^2)}; \quad (4)$$

$$I_C = \frac{2(\underline{U}_1 + \underline{U}_2)(Lr_0 - jLx_0 + 4jX_C)}{L^2 r_0^2 + L^2 x_0^2 - 8LX_C x_0 + 16X_C^2}. \quad (5)$$

Графічно отримані залежності струмів плечей живлення від значення ємнісного опору поперечної компенсації представлені на рис. 8, 9.

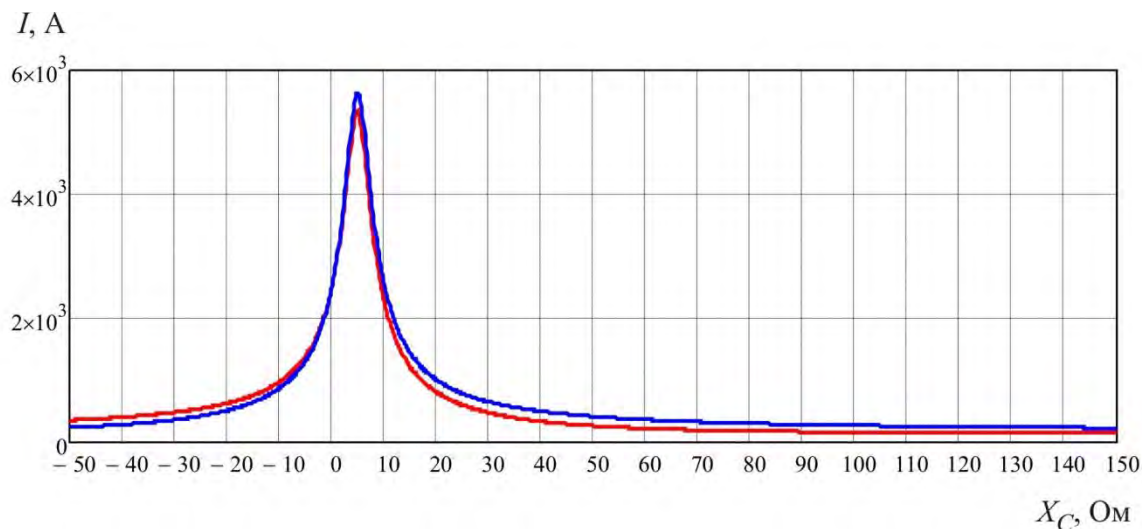


Рис. 8. Залежності струмів плечей живлення від опору поперечної компенсації

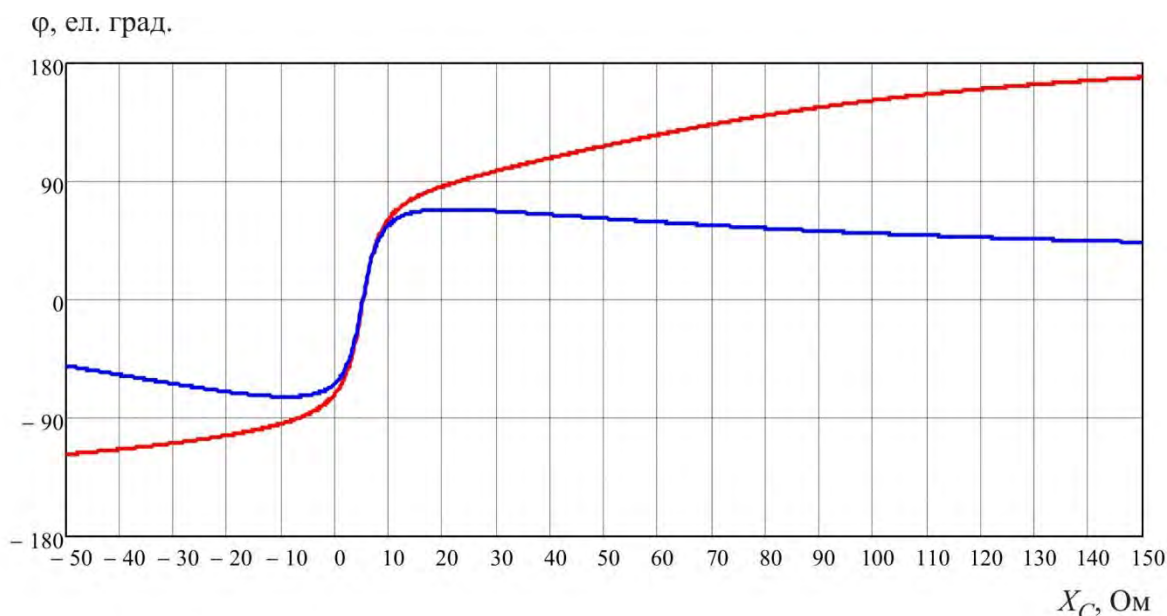


Рис. 9. Залежності кутів навантаження струмів від опору поперечної компенсації

Узагальнюючи проведені дослідження, отримаємо залежності кута навантаження вирівнювального струму від параметрів пристроїв поздовжньої та поперечної компенсації використовуючи вираз

$$\varphi_{\text{вир}} = \psi(\underline{U}_1) - \psi(\underline{I}_{\text{вир}}).$$

Отримаємо залежності, приведені на рис. 10, з яких видно, що кута навантаження у 90° можна досягти при застосуванні поздовжньої компенсації з опором $X_C = 26,5$ Ом, а при застосуванні поперечної компенсації – з опором $X_C = -12,2$ Ом. Тобто, для отримання кута зсуву фаз у 90° при поперечній компенсації необхідно вмикати у коло додаткове індуктивне навантаження, що на практиці не є доцільним. Таким чином, маємо відмовитись від використання поперечної компенсації для впливу на характер вирівнювальних струмів.

У подальшому прийемо поздовжню компенсацію у відсмоктуючому фідері з параметром, який змінить кут зсуву вирівнювального струму якомога ближче до 90° , тим самим переведе проблему вирівнювальних струмів у реактивну площину.

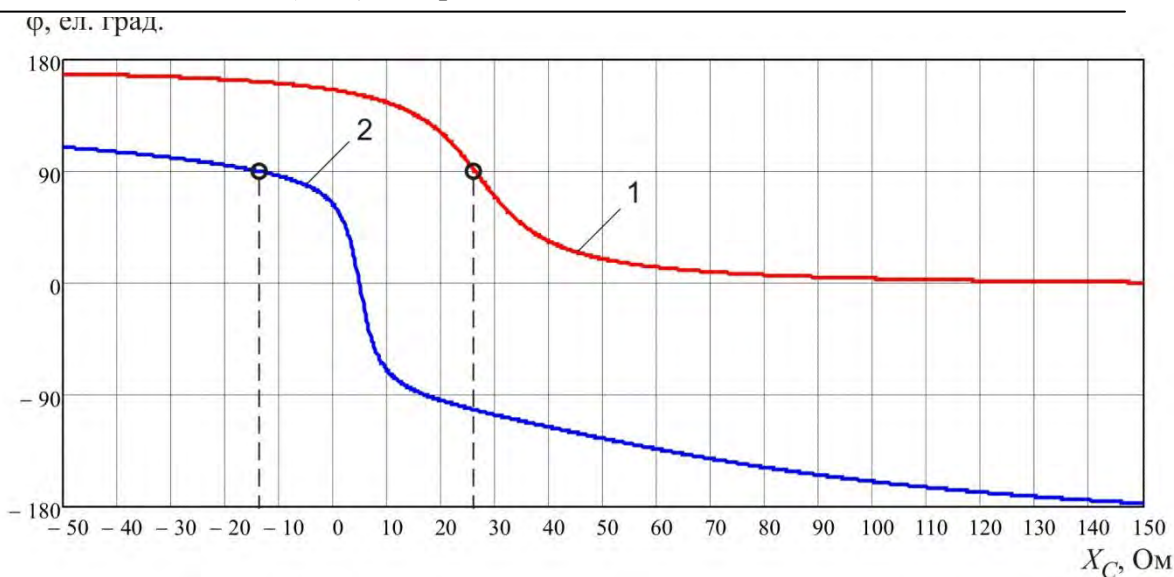


Рис. 10. Залежності кута навантаження вирівнювального струму для різних видів компенсації:
1 – поздовжньої; 2 – поперечної

Визначення раціонального кута навантаження вирівнювального струму

Вирівнювальний струм під дією різних кутів зсуву фаз напруг суміжних тягових підстанцій з урахуванням превалюючого індуктивного опору тягової мережі виявляється майже активним відносно напруг плечей живлення. Використовуючи поздовжню компенсацію у відсмоктуючому фідері існує можливість формування кута зсуву вирівнювального струму відносно напруг плечей живлення. Тим самим стає можливим переведення проблеми активних перетоків у реактивні.

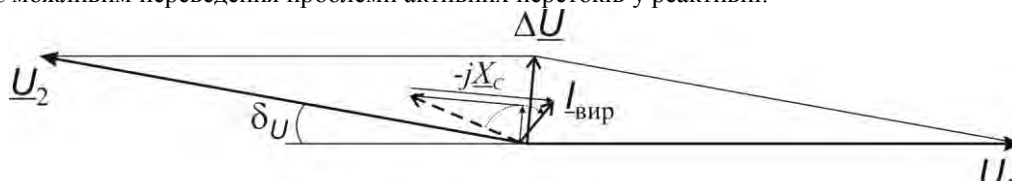


Рис. 11. Векторна діаграма зміни вирівнювального струму при застосуванні поздовжньої компенсації

Прийmemo у якості раціонального кута навантаження вирівнювального струму відносно напруг плеч живлення максимально близьке до 90° . З урахуванням того, що вирівнювальний струм для однієї тягової підстанції буде активним, а для іншої – емнісним, результуючий кут визначимо з виразу

$$\varphi_{\text{вир}} = \frac{180 - \psi(U_1)}{2}. \quad (6)$$

Проведені дослідження показали, що емнісний опір пристрою поздовжньої компенсації для досягнення вимоги (6) не буде змінюватись в залежності від кута зсуву фаз однойменних напруг первинної мережі, що дозволяє визначити його значення за приведеною методикою.

Висновки

Транзитні перетікання потужності тяговою мережею змінного струму на сьогодні залишаються актуальним питанням, особливо в умовах лібералізації ринкових відносин в сфері електроенергетики. Уникнути явища вирівнювальних струмів в тяговій мережі змінного струму при відхиленні кута зсуву фаз однойменних напруг суміжних тягових підстанцій залишаючи їх у паралельній роботі достатньо складно.

Проведені дослідження показали, що найбільший вплив на характер вирівнювальних струмів в тяговій мережі змінного струму має поздовжня компенсація реактивної потужності, яку на практиці найбільш доцільно виконувати у відсмоктуючому фідері тягової підстанції.

Запропонована методика визначення параметрів поздовжньої компенсації дозволяє перевести проблему транзитних перетікань до 90 % у реактивну площину з подальшим застосуванням сучасних пристроїв поперечної компенсації, тим самим покращуючи електрифікованим залізницям умови закупівлі електроенергії.

Список літератури

1. Добрусин Л. А. Проблемы энергоэффективности и энергосбережения в России [Текст]: информационно-аналитический обзор. Ч. 3. Тенденции применения фазоповоротных трансформаторов в электроэнергетике / Л. А. Добрусин // Силовая электроника. – 2012. – № 4. – С. 60-66.
2. Герман Л. А. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог / Л. А. Герман, А. С. Серебряков. – М.: МИИТ, 2012. – 211 с.
3. Сиченко В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць / В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саенко, Д. О. Босий. – Дн-вськ: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2015. – 344 с.
4. Бородулин Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог [Текст] / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
5. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
6. Мирошниченко Р. И. Режимы работы электрифицированных участков / Р. И. Мирошниченко. – М.: Транспорт, 1982. – 207 с.
7. Кондратьев Ю. В. Совершенствование условий согласования систем внешнего и тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока [Текст]: дис. канд. техн. наук. – Омск: ОмГУПС, 2006. – 164 с.
8. Bosiy, D. O. Power quality complex estimation at alternating current traction substations / D. O. Bosiy // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2013. – № 4(46). – С. 30-37.
9. Босий Д.О. Оптимізація керування регульованою компенсацією реактивної потужності на тягових підстанціях змінного струму / Д.О. Босий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 1. – С. 24-32.

D. O. Bosiy

**Dnipropetrovsk National University of Railway Transport
named after academician V. Lazaryan**

**PROVIDING THE PARALLEL OPERATION OF THE ALTERNATING CURRENT TRACTION
SUBSTATIONS UNDER CONDITIONS OF TRANSIT POWER FLOWS**

The phenomenon of transit power flows in the alternating current traction network that parallel operating caused by the shift of the same name voltage phases is described in the article. Using the results of the experimental researches at traction substation of the Odeska Railway the influence of the series and the parallel compensation routines on the characteristics of the circulating currents is researched. The methodic of the evaluating of the series compensation routine parameters which connected in the reverse feeder is proposed. The methodic which proposed in the article allow to transfer the problem of the transit power flows in the reactive power field where might be used the modern parallel compensator routines.

Keywords: electric traction, alternating current, traction substation, parallel operation, transit power, circulating current.

1. Dobrusin L. A. *The problems of energy efficiency and energy conservation in Russia: informational and analytical review. Part 3. Trends in the use of phase-shifting power transformers*, *Silovaya elektronika*, 2012, No. 4, pp. 60-66.
2. German L. A., Serebryakov A. S. *Adjustable capacitive compensation systems in the traction power supply of railways*, Moscow, MIIT publ., 2012, 211 p.
3. Sichenko V. G., Saenko Yu. L., Bosiy D. O. *The power quality in the traction network of electrified railways*, Dnipropetrovsk, Standart Service Publ., 2015, 344 p.
4. Borodulin B. M., German L. A., Nikolaev G. A. *Capacitor routines of the electrified railways*, Moscow, Transport Publ., 1983, 183 p.
5. Markvardt K. G. *Power supply of electrified railways*, Moscow, Transport Publ., 1982, 528 p.
6. Miroshnichenko R. I. *Modes of electrified railways section operation*, Moscow, Transport Publ., 1982, 207 p.
7. Kondratiev Yu. V. *Improving conditions for coordination external systems and traction power supply of alternating current electrified railways*, Ph. D. Dissertation, Omsk, OmSURT, 2006, 164 p.
8. Bosiy D. O. *Power quality complex estimation at alternating current traction substations*, Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 2013, No. 4 (46), pp. 30-37.
9. Bosiy D. O. *Optimization of controlling the variable reactive power compensation at the alternating current traction substations*, *Informatsiyno-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti*, 2010, No. 1, pp. 24-32.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В УСЛОВИЯХ ТРАНЗИТНЫХ ПЕРЕТОКОВ МОЩНОСТИ

В статье рассматривается явление возникновения уравнивающих токов в тяговой сети переменного тока при отклонениях угла сдвига фаз одноименных напряжений смежных тяговых подстанций, которые параллельно питают межподстанционную зону. На основании результатов экспериментальных исследований тяговой подстанции Одесской железной дороги исследуется влияние устройств продольной и поперечной компенсации на характеристики уравнивающих токов. Предложена методика определения параметров продольной компенсации реактивной мощности в отсасывающем фидере для перевода проблемы транзитных перетоков в реактивную плоскость с последующим применением устройств поперечной компенсации.

Ключевые слова: электрическая тяга, переменный ток, тяговая подстанция, параллельная работа, транзит мощности, уравнивающий ток.

Надійшла 23.04.2015

Received 23.04.2015

УДК 37.013.

С.В. Гайдук, старший преподаватель кафедры ЭСАС

ФГБОУ ВО «СГУ» ИЯЭиП

Д.Ю. Гайдук, студент 4-го курса СФ

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ САМОКОНТРОЛЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В статье рассматриваются разнообразные подходы к определению сущности самоконтроля. Обоснована необходимость формирования самоконтроля в процессе обучения инженеров энергетического комплекса. Сформулированы значение и необходимость самоконтроля. Обозначены его виды и компоненты. Перечислены структурные элементы самоконтроля. Выделены его формы и классификация. Рассмотрены этапы формирования самоконтроля. Указана роль преподавателя на каждом этапе. Приведены приёмы формирования самоконтроля в учебном процессе. Обозначены уровни формирования самоконтроля, а также его качественные показатели.

Ключевые слова: самостоятельность, самоконтроль, самооценка, компоненты самоконтроля, формы самоконтроля, классификация самоконтроля, приёмы самоконтроля, этапы формирования самоконтроля.

Введение.

В нынешнее время одним из ключевых факторов конкурентоспособности государства и, что принципиально важно, основой для его технологической, экономической независимости становится качество инженерных кадров. Развитие науки и производства вызывают острую необходимость новых подходов к подготовке специалиста. От инженера требуется не только быстро перестраивать систему своей деятельности в соответствии с новыми технологиями, но и учитывать их неоднозначность, принимая во внимание социально-значимые цели и ограничения. Возрастают требования к личности и профессиональной компетенции специалиста, способного устанавливать межличностные отношения, участвовать в совместной деятельности, исполнять разные социальные роли и принимать участие в коллективном решении творческих задач. Все это предполагает наличие у выпускников знаний, умений и навыков инженерной деятельности, способности к принятию решений, а также профессиональных качеств личности.

Постановка задачи.

Одной из важных **проблем** обучения в высшей школе было и есть развитие их умения самостоятельно контролировать и оценивать результаты своей деятельности, в том числе и учебной. Самостоятельность – это свойство личности, которое выдвигается на первый план при определении качества подготовки выпускника высшего учебного заведения. Базовая подготовка специалистов в современной высшей школе рассматривается не только как процесс приобретения знаний, а в большей мере быть направлена на формирование у студентов навыков анализа и синтеза ситуаций, разрешения возникающих проблем, умения отстаивать сделанный выбор и предвидеть его последствия, что требует активизации сознательной и самоуправляемой познавательной деятельности. Проблема необходимости наличия самостоятельности у студентов вызвана еще и тем, что происходит значительное сокращение часов, предназначенной для аудиторной работы и увеличения количества часов для индивидуальной, самостоятельной работы. Таким образом, одной из важных **задач** обучения в высшей школе становится развитие умений будущих инженеров самостоятельно контролировать и оценивать результаты своей деятельности, что позволит им успешно овладевать знаниями, умениями, навыками.

Вопросы формирования у студентов навыка самоконтроля при изучении базовой инженерной дисциплины в техническом университете рассматриваются в данной статье.

Основная часть.

Проблема самоконтроля знаний и умений стала актуальным предметом исследования. Несмотря на наличие работ проводимых в данной области [3,5,6,7], в нынешнее время проблема формирования умений самоконтроля учебной деятельности у будущих специалистов решена недостаточно полно. Актуальность проблемы вытекает из необходимости совершенствования практической деятельности преподавателей по формированию у студентов умений, необходимых для самоанализа, выбора новых форм и методов работы. Специфика работы инженера в энергетическом комплексе, заключается в том, что при эксплуатации техники необходимо каждый раз делать выбор в принятии решения. Каждая ошибка имеет негативные последствия, а порой и непоправимые. Так анализ аварийных ситуаций последних лет подтверждает, что большая доля причин их возникновения приходится на «человеческий фактор», который в свою очередь может быть следствием отсутствия у сотрудника навыка самоконтроля или его недостаточного уровня. По разным оценкам по вине персонала произошло от 15 до 40% всех аварий и от 20 до 80% всех нарушений в работе АЭС [1]. В связи с этим необходимо уделять должное внимание учебной деятельности будущих инженеров-операторов АЭС, так как она представляет важный компонент профессиональной подготовки и является основой формирования умений в проверке и корректировке собственной деятельности. Реализация этих задач требует организации процесса обучения в высшей школе, направленной на совершенствование всех его компонентов, важной частью которого является самоконтроль. Самоконтроль – один из важнейших факторов, обеспечивающих самостоятельную деятельность человека. Его *назначение* заключается в современном обнаружении и исправлении ошибок, их предотвращении. «Самоконтроль является составной частью любого вида деятельности человека и направлен на предупреждение или обнаружение, уже совершенных ошибок» [5]. Авторы, пользующие понятием самоконтроля, понимают его по-разному. Но, при всем разнообразии определений, в это понятие обязательно входит такой признак, как сопоставление своего действия с эталоном, образцом. В работах [2,4,5,6,8,10,12] утверждается, что самоконтролю следует обучать специально.

Рассмотрим, как определяют самоконтроль некоторые исследователи.

«Самоконтроль – это умение ученика оценивать свою работу с двух точек зрения: верно ли я ответил: Все ли я ответил?» [6], или: «самоконтроль есть форма деятельности, проявляющаяся в проверке поставленной задачи, в критической оценке процесса работы, в исправлении ее недочетов» [4]. Б.Д.Эльконин формулирует понятие самоконтроля следующим образом: «Действие контроля состоит в сопоставлении воспроизводимого действия и его результата с образцом через предварительный образ» [12]. Более широко рассматривается самоконтроль, как процесс, в следующем определении: «Самоконтроль – это сознательное регулирование и планирование деятельности на основе анализа происходящих в предмете труда изменений, позволяющих достичь поставленной цели» [4]. С другой стороны: «самоконтроль – это умение критически отнестись к своим поступкам, действиям, чувствам и мыслям, регулировать свое поведение и управлять им. Самоконтроль связан с личностью в целом» [4]. П.Я.Гальперин сделал попытку дать психологическую характеристику самоконтроля в связи с проблемой внимания. Он пишет: «...контроль составляет неотъемлемый элемент психики как ориентировочной деятельности». Он не имеет своего продукта, отдельного от той деятельности, внутри которой осуществляется. Осуществляется же он «с помощью критерия, мерки, образца». Если контроль выступает как предметная внешняя материальная деятельность, он не является вниманием. «Наоборот, он сам требует актов внимания, сложившихся к этому времени». Постепенно формируясь, контроль становится сокращенным умственным действием. Когда новое действие контроля превращается в умственное и сокращенное, тогда – и только тогда оно становится вниманием... Не всякий контроль есть

внимание, но всякое внимание означает контроль» [2]. Л.И.Рувинский рассматривает самоконтроль как средство самовоспитания: «самоконтроль развивается на основе способности человека контролировать любую свою деятельность» [10]. С точки зрения психологии: «Самоконтроль – осознание и оценка субъектом собственных действий, психических процессов и состояний» [8].

Таким образом, в психолого-педагогической литературе отражены разнообразные подходы к определению сущности самоконтроля. Самоконтроль – явление сложное и многогранное. Каждое из приведенных определений отражает отдельные его стороны.

В ходе самоконтроля человек совершает умственные и практические действия по самооценке, корректированию и совершенствованию выполняемой ими работы, овладевает соответствующими умениями и навыками. Кроме того, самоконтроль способствует развитию мышления, а оно в свою очередь совершенствует самоконтроль.

Самоконтроль опирается на мышление и другие психические процессы. Большое значение для поведения человека, его самооценки имеет речь. Особенно велика роль внутренней речи, являющейся механизмом самосознания. Самоконтроль также тесно связан с памятью и вниманием. Так, память обеспечивает закрепление образца, чтобы можно было сравнивать с ним ход и результаты выполняемой работы. Большую роль в реализации самоконтроля играют ощущения и восприятия.

Будучи качеством личности и условием проявления ее самостоятельности и активности, самоконтроль в тоже время является составной частью, необходимым компонентом всех видов учебной и трудовой деятельности. Он необходим не только при выполнении самостоятельной работы, но и при выполнении заданий на всех предшествующих стадиях, начиная с пробных действий, совершаемых под внешним управлением. Благодаря самоконтролю человек окончательно овладевает определенным способом действия. Кроме того, общеизвестно, что без специального формирования приемов и навыков самоконтроля качество деятельности остается очень низким. Лишь на основе самоконтроля возможно регулирование деятельности при выполнении определенных операций.

Значение самоконтроля для развития навыков самостоятельной работы состоит в следующем:

- на практике осуществление самоконтроля (усвоение и контроль успешности усвоения) возникает качественно иное самостоятельное состояние, что благоприятно отражается на общей эффективности освоения знаниями;

- самостоятельная коррекция делает учащегося более уравновешенным, а его деятельность – более уверенной и успешной.

Необходимость самоконтроля побуждает к деятельности на основе противоречия между познавательной потребностью и возможностями ее удовлетворения.

Средствами самоконтроля является система знаний и способов познавательной деятельности.

Изучая самоконтроль, важно различать его *виды*. Выделяют преднамеренный (произвольный) и непреднамеренный (непроизвольный) самоконтроль, определяемый сознательно поставленной целью – следить за правильностью реализации программы своей деятельности [10].

Компонентами самоконтроля являются:

1) Мотивационный компонент – это внутренние побуждения, возникающие в результате противоречия между имеющимися у студентов знаниями, умениями и навыками и необходимостью овладения новыми более объемными и качественно совершенными.

2) Процессуальный компонент включает в себя овладение системой базовых знаний и способов учебно-познавательной и иной профессиональной деятельности.

3) Волевой компонент, в его основе лежит готовность к совершению усилия по преодолению затруднений в осуществлении деятельности.

Каждый из трех указанных компонентов играет определенную роль, и если нет в наличии одного компонента, то и самоконтроль не может быть эффективным или отсутствовать.

К структурным элементам самоконтроля относятся:

- внимание к результатам своей работы, ее условиям, приемам;
-наблюдение за ходом работы по ее показателям: безошибочности, скорости, точности применяемых приемов и т.д.;

- мыслительные операции – анализ результатов деятельности, установление причинной зависимости имеющихся недостатков от внутренних и внешних условий;

- точная и своевременная реакция на подмеченные недостатки в работе, выражающаяся в исправлении ошибок, повышении скорости работы и устранение погрешностей (отклонений по точности) управления.

Таким образом, одним из элементов самоконтроля является усовершенствование исполнителем своей деятельности, участие его в решении творческих заданий. Самоконтроль является составной частью всех видов учебной деятельности и должен осуществляться на всех этапах ее выполнения. Он включает в себя чувственные, умственные и двигательные компоненты деятельности, позволяющие учащемуся на основе поставленной цели, намеченного плана и усвоенного образца (аналога, типовой

задачи) следить за своими действиями, результатами этих действий и сознательно регулировать их. При этом в ходе самоконтроля оценивается эффективность самого процесса выполнения работы, намеченного плана и уже осуществленного регулирования.

Выделяют несколько *форм* самоконтроля:

1) Как правило, в учебной деятельности преобладает *контроль по результату* или так называемый *итоговый контроль*. Это первоначальная и простейшая форма самоконтроля. Его функция состоит в сличении результата с заданным образцом, т.е. совершается проверка. Контроль по результату целесообразно использовать на начальном этапе его формирования, а затем постепенно переходить к другим его видам.

2) *Пооперационный контроль*, состоит в выявлении безошибочности произведенных действий. Этот вид контроля в психологической литературе определяется как пошаговый. Он, в первую очередь, обращает внимание студентов на способ осуществляемого ими действия.

3) *Прогнозирующий (предваряющий) контроль*, дает учащемуся, как субъекту деятельности возможность предвосхищать результаты предстоящего действия.

Классификация самоконтроля проводится также на основе других признаков:

- по входящим в него элементам различают самоконтроль констатирующий и корректирующий;
- по способам получения информации о протекании выполняемой операции – непосредственный и опосредованный контроль;

- по органам чувств, участвующих в оценке выполняемой операции; мышечно-двигательной, зрительной, слуховой, комбинированной;

- по формам организации работы.

Согласно этой классификации самоконтроль делится на:

- фронтальную проверку,
- индивидуальную проверку,
- взаимную проверку.

При фронтальной проверке проводится коллективный разбор правильности выполненного задания.

К индивидуальному контролю относятся все виды самоконтроля, проводимого по этапам выполняемой деятельности. Это основная и самая сложная форма самоконтроля.

Взаимный контроль проводится при проверке письменных и графических работ, а также при рецензировании устных ответов и сообщений. Взаимный контроль позволяет углубить знания и умения учащихся, способствует развитию внимания, ответственного отношения к делу, формирования навыка самоконтроля. Это более высокая форма действия контроля, представляющая собой средство обучения самоконтролю. Фронтальные и взаимные проверки представляют собой промежуточное звено между контролем преподавателя и самоконтролем студента.

В структуре самоконтроля можно выделить следующие звенья:

- уяснение студентами цели деятельности и первоначальное их ознакомление с конечным результатом и способами его получения, с которыми они будут сравнивать применяемые ими приемы работы и полученный результат. По мере овладения данным видом работы знание образцов должно углубляться и совершенствоваться;

- сличение хода работы и достигнутого результата с образцами;

- оценивание выполненной работы, установление и анализ допущенных ошибок и выявление их причин;

- коррекция работы на основе данных самооценки и уточнение плана ее выполнения, внесение усовершенствований.

С.Г. Манвелов [5] составил классификацию приемов самоконтроля:

- сверка с образцом,
- повторное решение задачи,
- решение обратной задачи,
- проверка полученных результатов по условию задачи,
- решение задачи различными способами,
- моделирование,
- примерная оценка искомых результатов (прикидка),
- проверка на частном случае,
- испытание получаемых результатов по косвенным параметрам.

Г.С. Никифоров считает: «Контроль извне считается тем обязательным условием, соблюдение которого создает необходимую основу для формирования самоконтроля» [7]. Таким образом, роль преподавателя в формировании самоконтроля в процессе обучения является направляющей.

Формирование самоконтроля происходит в несколько *этапов* [3].

Первый этап – формирование речевого навыка, с точки зрения исправления ошибок, характеризуется следующим:

- студент, допустивший ошибку, сам ее не видит, самостоятельно на нее реагирует;
- преподаватель исправляет ошибку путем объяснения всей программы действия или демонстрацией образца;
- исправление ошибки носит медленный характер, в процессе исправления студент осознает программу действия;
- самоконтроль как механизм сличения отсутствует.

На данном этапе основное значение имеет тщательный, корректирующий и своевременный контроль со стороны преподавателя.

Второй этап определяется тем, что:

- студент, допустивший ошибку, самостоятельно ее не исправляет, но при указании преподавателя делает это достаточно правильно;
- преподаватель исправляет ошибку указанием ее зоны, внешний контроль и указание ошибки служат запуском самоконтроля;
- исправление ошибки студентом носит быстрый, целостный характер;
- самоконтроль полностью не сформирован, но компоненты, необходимые для его формирования, отработаны.

На *третьем этапе* внешний контроль уступает место самоконтролю:

- студент самостоятельно реагирует на допущенную ошибку, но с некоторым опозданием, пауза сокращается при мимическом вмешательстве преподавателя;
- преподаватель фиксирует не только неисправленные в результате самоконтроля ошибки;
- исправление ошибки студентом происходит без внешнего воздействия, самостоятельно, но с некоторым временным опозданием;
- самоконтроль сформирован, но недостаточно автоматизирован.

Роль преподавателя на этом этапе состоит в создании наилучших условий для функционирования самоконтроля, очень большое значение имеют инструкции-установки.

Четвертый этап характеризуется следующими признаками:

- студент исправляет ошибку в момент ее возникновения;
- преподаватель фиксирует только те ошибки, которые не могли быть исправлены самим студентом, в силу незнания нового материала;
- исправление ошибки студентом самостоятельное, «мгновенное» (оговорка);
- самоконтроль сформирован, и действие его автоматизировано.

Выделяют шесть *уровней* сформированного самоконтроля [9]:

1. Отсутствие контроля.
2. Контроль на уровне произвольного внимания.
3. Потенциальный контроль на уровне произвольного внимания.
4. Актуальный контроль на уровне произвольного внимания.
5. Потенциальный рефлексивный контроль.
6. Актуальный рефлексивный контроль.

Качественными показателями сформированного самоконтроля является:

- умение перед началом работы спланировать ее;
- умение изменить взаимосвязь (порядок) действий в соответствии с изменившимися условиями деятельности;
- умение самостоятельно составлять системы проверочных действий.

Анализ особенностей [11] предварительного, текущего и заключительного самоконтроля у студентов позволяет выявить основные направления его развития:

1. Развитие самоконтроля от наглядного, чувственного к умственному самоконтролю. Первоначально самоконтроль протекает на материале восприятия, в соотношении работы с наглядным образцом. В дальнейшем происходит абстрагирование самоконтроля, он связывается с мыслительными операциями, протекающими без восприятия наглядного образца.

2. Развитие самоконтроля от внешнего к внутреннему. На первой стадии самоконтроль протекает во внешней речи, переходя в дальнейшем в план внутренней речи. Этот переход свидетельствует о совершенствовании самоконтроля, о сокращении его в некоторых элементах действия, о более рациональном использовании времени в самоконтроле.

3. Развитие самоконтроля от констатирующего к корректирующему. Умение не только заметить ошибку, неточность в работе, но и правильно откорректировать её, свидетельствует о более высокой степени развития самоконтроля. Но на эту ступень самоконтроля учащийся поднимается после длительных тренировок в применении различных способов проверки учебной работы.

4. Развитие от одностороннего к разностороннему самоконтролю. В связи с недостаточно развитым вниманием у студентов, они не могут контролировать одновременно разные стороны своей деятельности. При направленности их самоконтроля на одну сторону работы упускаются из поля зрения

остальные стороны. Но вместе с приобретением гибких навыков учебной работы и развитием внимания, самоконтроль совершенствуется, приобретая разносторонний характер сначала на заключительном этапе работы, потом при её планировании и, наконец, в самом процессе работы.

5. Изменение объектов самоконтроля. Если первоначально объектом самоконтроля является внешний вид работы, то потом студент переключается на содержание работы. Таким образом, происходит углубление самоконтроля, переход его от оценки формы работы к оценке её содержания. Качественное изменение самоконтроля в учебной деятельности во всех указанных выше направлениях не совершается стихийно, а происходит в результате планомерной работы преподавателя.

Особенностями процесса обучения инженеров-операторов АЭС является:

- в отличие от большинства производственных систем продуктом труда в нем является новое состояние обучаемых;

- цель обучения определяется в зависимости от цели назначения системы человек-техника, следовательно, эффективность обучения оператора связана с эффективностью их действий в реальной среде;

- субъект и объект труда активно взаимодействуют, объединённые общей целью и содержанием обучения;

- орудия труда обучающихся и обучаемых тесно перекрываются с фактической системой в части образцов техники, тренажеров, программно-информационных средств. Психопедагогика самоконтроля операторского действия рассмотрена в [13].

Указанные особенности необходимо учитывать при моделировании обучения операторов. В дальнейшем будет рассмотрена модель обучения будущих операторов АЭС с учётом формирования навыка самоконтроля.

Выводы.

1. Формирование самоконтроля – актуальная задача обучения в технических Вузах, особенно при подготовке специалистов для энергетического комплекса.

2. Самоконтроль учебной деятельности в техническом Вузе имеет свои особенности, которые связаны с профессиональной деятельностью будущих специалистов.

3. Включение самоконтроля в деятельность оператора повышает ее безошибочность, снижает аварийность, но связано с дополнительными затратами времени. Поэтому необходимо доводить его до автоматизма, когда умственные операции контроля выполняются параллельно осуществляемой деятельности.

Список литературы

1. Анохин А.Н., Острейковский В.А. Вопросы эргономики в ядерной энергетике.- М.: Энергоатомиздат, 2001.-344с.: ил.

2. Вопросы психологии учебной деятельности младших школьников /под ред. Д.Б. Эльконина, В.В. Давыдова. – М.: Издательство Академии педагогических наук, 1962.-340с.

3. Галустян О.В. Формирование самоконтроля при обучении иностранному языку в неязыковом Вузе // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. - №2. – 2003. – с.94-97.

4. Гальперин П.Я., Кабыльницкая С.Л. Экспериментальное формирование внимания. – М.: Издательство Московского университета, 1974. – 150с.

5. Манвелов С.Г. Задания по математике на развитие самоконтроля учащихся. – М.: Просвещение, 1997. – 125с.

6. Мор Г.А. Формирование навыков самоконтроля и взаимоконтроля у учащихся // Начальная школа. - №10. – 1998. – с.24-30

7. Никифоров Г.С. Самоконтроль человека. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1989. – 135с.

8. Психология. Словарь / под ред. А.В.Петровского. – М.: Издательство политической литературы, 1990. – 494с.

9. Репкина Г.В., Заика Е.В. Оценка уровня сформированной учебной деятельности. – Томск: Пеленг, 2010.

10. Рувинский Л.И., Соловьева А.Е. Психология самовоспитания. – М.: Просвещение, 1982. – 142с.

11. Сырецкий М.В. Приёмы работы педагога над развитием навыков самоконтроля у студентов // Вектор науки ТГУ №3(17), 2011.

12. Эльконин Д.Б. Избранные психологические труды.- М.: Педагогика, 1989.- 154с.

13. Чабаненко П.П. Исследование безопасности и эффективности функционирования систем человек-техника эргосетями: Сев-ль, АВМС им.П.С.Нахимова, 2012.-162с.

С.В.Гайдук, старший викладач кафедри ЕСАС

ФГБОУ ВО «СГУ» ИЯЭиП

Д.Ю. Гайдук, студент 4-го курса ЗФ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
**ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ САМОКОНТРОЛЮ ПРИ ПІДГОТОВЦІ ФАХІВЦІВ ДЛЯ
ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ**

У статті розглядаються різноманітні підходи до визначення суті самоконтролю. Обґрунтована необхідність формування самоконтролю в процесі навчання інженерів енергетичного комплексу. Сформульовано значення і необхідність самоконтролю. Позначені його види і компоненти. Перераховані структурні елементи самоконтролю. Виділені його форми і класифікація. Розглянуті етапи формування самоконтролю. Вказана роль викладача на кожному етапі. Наведені прийоми формування самоконтролю в учбовому процесі. Позначені рівні формування самоконтролю, а також його якісні показники.

Ключові слова: самостійність, самоконтроль, самооцінка, компоненти самоконтролю форми самоконтролю, класифікація самоконтролю, прийоми самоконтролю, етапи формування самоконтролю.

S.V.Gaiduk, D.U. Gaiduk

FGBO UVO «SGU» INE and I

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

**BASES OF FORMING OF SELF-CONTROL AT PREPARATION OF SPECIALISTS FOR A
POWER COMPLEX**

In the article the various going is examined near determination of essence of self-control. The necessity of forming of self-control is reasonable in the process of educating of engineers of power complex. A value and necessity of self-control are set forth. His kinds and components mark. The structural elements of self-control are enumerated. His forms and classification are distinguished. The stages of forming of self-control are considered. The role of teacher is indicated on every stage. Receptions over of forming of self-control are brought in an educational process. The levels of formed of self-control mark, and also his quality.

Key words: independence, self-control, self-appraisal, components of self-control, form of self-control, classification of self-control, receptions of self-control, stages of forming of self-control.

1. Anohin A.N., Ostreykovskiy V.A. Voprosy ergonomiki v yadernoy energetike.- М.:Energoatomizdat, 2001.-344s.: il.
2. Voprosy psihologii uchebnoy deyatelnosti mladshih shkolnikov /pod red. D.B. Elkonina, V.V.Davyidova. – М.: Izdatelstvo Akademii pedagogicheskikh nauk, 1962.-340s.
3. Galustyan O.V. Formirovanie samokontrolya pri obuchenii inostrannomu yazyku v neyazykovom Vuze // Perspektivnyie informatsionnyie tehnologii i intellektualnyie sistemyi. - #2. – 2003. – s.94-97.
4. Galperin P.Ya., Kabylnitskaya S.L. Eksperimentalnoe formirovanie vnimaniya. – М.: Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 1974. – 150s.
5. Manvelov S.G. Zadaniya po matematike na razvitie samokontrolya uchaschihsya. – М.: Prosveschenie, 1997. – 125s.
6. Mor G.A. Formirovanie navyikov samokontrolya i vzaimokontrolya u uchaschihsya // Nachalnaya shkola. - #10. – 1998. – s.24-30
7. Nikiforov G.S. Samokontrol cheloveka. – L.: Izdatelstvo Leningradskogo universiteta, 1989. – 135s.
8. Psihologiya. Slovar / pod red. A.V.Petrovskogo. – М.: Izdatelstvo politicheskoy literaturyi, 1990. – 494s.
9. Repkina G.V., Zaika E.V. Otsenka urovnya sformirovannosti uchebnoy deyatelnosti. – Tomsk: Peleng, 1
10. Ruvinskiy L.I., Soloveva A.E. Psihologiya samovospitaniya. – М.: Prosveschenie, 1982. – 142s.
11. Syiretskiy M.V.PriYomyi raboty pedagoga nad razvitiem navyikov samokontrolya u studentov // Vektor nauki TGU#3(17), 2011.
12. Elkonin D.B. Izbrannyye psihologicheskie trudyi.- М.: Pedagogika, 1989.- 154s.
13. Chabanenko P.P. Issledovanie bezopasnosti i effektivnosti funktsionirovaniya sistem chelovek-tehnika ergosetyami: Sev-I, AVMS im.P.S.Nahimova, 2012.-162s.

Надійшла 20.05.2015

Received 20.05.2015

О ВЛИЯНИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНУТРИ КАМЕРЫ

В работе представлены результаты промышленного эксперимента по определению характера влияния конструктивных параметров печи на распределение температуры по объему камеры. Получены зависимости ее изменения в зоне размещения нагреваемых изделий от местоположения горелочных устройств и окон для отвода продуктов сгорания, а также от изменения расхода газа на печь.

Ключевые слова: нагревательная печь, энергоэффективность, распределение температуры, промышленный эксперимент, тепловая энергия, нагрев металла.

Введение

Нагревательные печи, установленные на заводах Украины, представлены в основном устаревшим оборудованием, которое в силу своего морального и физического износа не позволяет вести термическую обработку на качественно новом уровне с минимальным расходом энергоносителей. Такие печи имеют ряд проблем, многие из которых связаны с несовершенством их аэродинамики.

Цель и задачи исследования

Повысить энергоэффективность и улучшить аэродинамику рассматриваемых нагревательных печей возможно изменением расположения таких конструктивных элементов, как горелочные устройства и окна для отвода продуктов сгорания, для чего необходимо предварительно оценить влияния мест их установки на распределение температуры в камере. Такие изменения проводились на реальном объекте [1], которым выступила камерная нагревательная печь с выкатным подом, расположенная в восьмом пролете термоотдела инструментального цеха ЧАО «Никопольский завод технологической оснастки». Она построена и сдана в эксплуатацию в 1967г. и не отвечает современным требованиям к энергоэффективности.

Результаты исследования

При проведении эксперимента [2] на указанной печи ее конструктивные параметры изменялись следующим образом:

- местоположение горелочных устройств по высоте боковых стенок камеры печи;
- местоположение окон для отвода продуктов сгорания предложенным приспособлением [2] также по высоте боковых стенок камеры агрегата;
- уменьшение расхода газа до 92, 86 и 80% от существующего.

Температуры в точках свода и пода печи при этом контролировались имеющимися системами контроля.

Координаты существующего и измененного положения горелочных устройств указаны в таблице 1

Как и в варианте с базовым расположением горелочных устройств, с помощью измерительных систем, используемых на печи, фиксировалась температура в месте нахождения изделий и в районе свода камеры.

Таблица 1

Координаты местоположения горелочных устройств в базовом и измененных положениях

Ряд	Координаты положения, м			
	существующее	1 вариант	2 вариант	3 вариант
нижний ($Z_{X1.1}$)	0,18	0,35	0,52	0,69
верхний ($Z_{X1.4}$)	0,35	0,52	0,69	0,86

На рисунке 1 приведен график изменения температуры в месте расположения нагреваемых изделий и в районе свода печи в процессе нагрева в момент времени $t = 1215$ мин., в зависимости от изменения местоположения горелок по высоте боковой стенки.

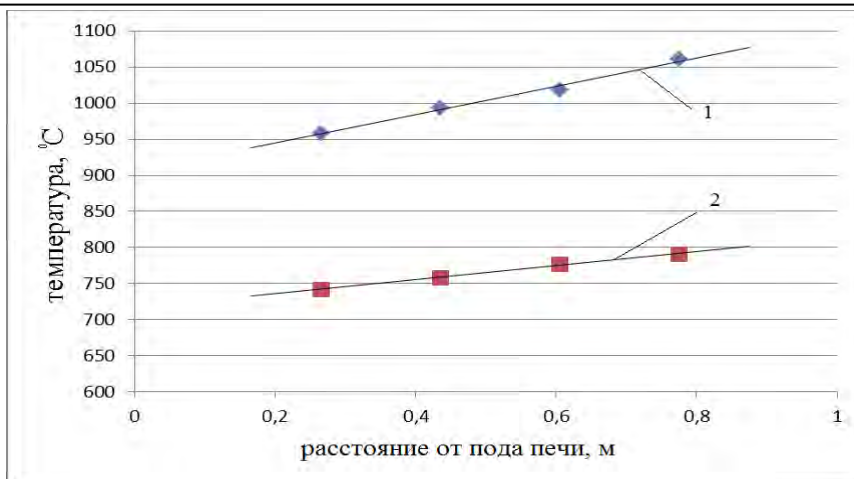


Рис. 1. График изменения температуры в районе свода (1) и пода (2) печи при изменении положения горелочных устройств

По характеру зависимости видно, что указанные конструктивные элементы оказывают значительное влияние на распределение температур в камере. Так, чем выше расположение горелки, тем большее количество теплоты попадает в верхнюю часть камеры, а значит и температура у свода увеличивается. Логично предположить, что в этом случае количество отраженной теплоты от свода на под тоже будет больше по сравнению с базовым вариантом, что приведет к возрастанию температуры в месте расположения деталей.

Как и в случае с горелочными устройствами, перемещение вытяжных окон для изучения влияния последних на характер распределения температуры в рассматриваемом агрегате осуществлялось по высоте камеры, с теми же граничными пределами варьирования.

Координаты существующего и измененного положения указаны в таблице 2

Таблица 2

Координаты местоположения вытяжных окон в печи в базовом и измененных положениях

Обозначение	Координаты положения, м				
	существующее	1 вариант	2 вариант	3 вариант	4 вариант
Z _{X4.1} - Z _{X4.3}	0,25	0,45	0,65	0,85	1,05

На рисунке 2 приведен график изменения температуры в месте расположения металла и в районе свода печи в процессе нагрева в тот же момент времени $t = 1215$ мин. в зависимости от изменения местоположения отверстий для отвода продуктов сгорания по высоте боковой стенки. Как видно из зависимости, при базовом расположении горелочных устройств и вытяжных окон, температура в зоне расположения металла намного ниже, чем у свода печи. Но чем выше мы поднимаем вытяжные отверстия, тем сильнее увеличивается температура на поде печи, по сравнению с верхней зоной.

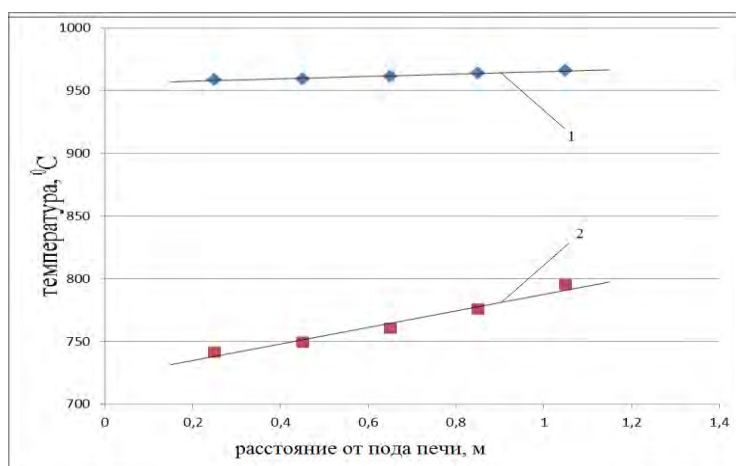


Рис. 2. График изменения температуры в районе свода (1) и пода (2) печи при изменении положения вытяжных отверстий.

Подобное, по нашему мнению, происходит вследствие изменения аэродинамики в рабочем пространстве печи, за счет смещения зоны отвода продуктов сгорания. Близость к своду вытяжных окон приводит к тому, что обмен греющей среды в верхней части камеры происходит быстрее, а в районе пода – наоборот, замедляется.

Изучение характера влияния расхода энергоносителя на исследуемую величину с помощью систем теплового регулирования, осуществлялось при расходе природного газа 49,1, 52,8 и 56,5 м³/ч при базовом варианте расположения горелочных устройств и вытяжных окон. Данные, полученные в результате проведения эксперимента, приведены в таблице 3. Графики зависимостей приведены на рисунке 3. Измерения соответствуют тому же моменту времени $t = 1215$ мин. от начала процесса нагрева.

Таблица 3

Изменение температуры в камере печи в зависимости от изменения расхода газа

Расход газа, м ³ /ч	Температура, °С	
	в районе свода	в районе пода
61,4 (существующий)	959	742
56,5	957	741
49,1	945	729

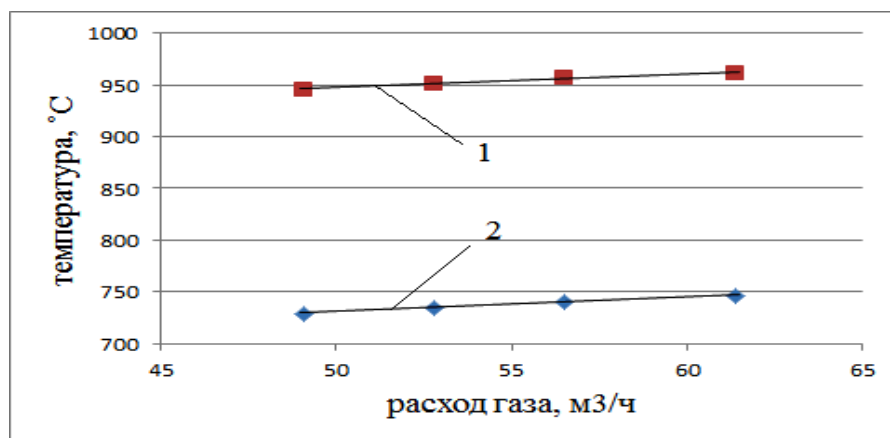


Рис. 3. График изменения температуры в районе свода (1) и пода (2) печи при изменении расхода газа

Как видно из полученных графиков, с уменьшением расхода энергоносителя, температура одинаково и линейно уменьшается как у свода печи, так и у основания.

Выводы

Полученные в результате ряда проведенных промышленных экспериментов зависимости позволяют сделать вывод, что добиться увеличения температуры в зоне размещения нагреваемого металла можно не только увеличением подачи газа в печь, но и с помощью варьирования положения конструктивных элементов установки, что является более целесообразным с точки зрения повышения энергоэффективности камерных нагревательных печей.

Список литературы

1. Ю. Г. Качан. Оптимизация нагревательных газовых печей с выкатным подом по критерию энергоэффективности/ В.В. Степкин, Ю. Б. Лиуш // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2013. - №3. - с.123-125.
2. Ю.Б.Лиуш Организация промышленного эксперимента по изучению влияния конструктивных особенностей нагревательной печи на распределение тепловой энергии в камере// *Вісник Хмельницького національного університету*. – Хмельницький. – 2015. - №2. – С.80-84.

U. Liush

Zaporozhye State Engineering Academy

ABOUT INFLUENCE OF STRUCTURAL FEATURES OF HEATER STOVE ON DISTRIBUTION OF TEMPERATURE INTO CHAMBER

The results of industrial experiment are In-process presented on determination of character of influence of structural parameters of stove on distribution of temperature on volume chambers. Dependences of her change are got in the zone of placing of the heated wares from the site of gas-ring devices and windows for taking of foods of combustion, and also from the change of gas expense on a stove.

Keywords: heater stove, energy efficiency, distribution of temperature, industrial experiment, thermal energy, metal heating.

1. Kachan, U.G., Optimization of heater gas-furnaces with a rolling out pallet on the criterion of energy efficiency/ V.V. Stepink, U.B. Liush // Metallurgical and mining industry. -2013. -№3. -с.123-125.

2. U.B. Liush. Organization of industrial experiment on the study of influence of structural features of heater stove on distribution of thermal energy in the chamber// Announcer of the Khmelnytsk national university. - Khmelnytskyi. - 2015. - №2. - С.80-84

УДК 621.783.2-027.236

Ю.Б. Ліуш

Запорізька державна інженерна академія

ЩОДО ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ НАГРІВАЛЬНОЇ ПЕЧІ НА РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРИ ВСЕРЕДЕНІ КАМЕРИ

У роботі представлені результати промислового експерименту з визначення характеру впливу конструктивних параметрів печі на розподіл температури за об'ємом камери. Отримано залежності її зміни в зоні розташування виробів, що нагріваються, від місцезнаходження пальникових пристроїв та вікон для відведення продуктів згорання, а також зміна витрат газу на піч.

Ключові слова: нагрівальна піч, енергоефективність, розподіл температури, промисловий експеримент, тепла енергія, нагрів металу.

Надійшла 15.05.2015

Received 15.05.2015

УДК 666.1.031.2/.6:66.042.882.2

А.Е. Денисова д-р техн. наук, профессор, К.В. Агеев
Одесский национальный политехнический университет

СТРУЙНО-ВИХРЕВЫЕ РЕКУПЕРАТОРЫ КАК АППАРАТЫ С АКТИВНЫМИ ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ

Исследование работы струйно-вихревых теплообменников и разработка математического описания процессов на воздушной стороне этих рекуператоров является актуальной научной задачей, поскольку не существует единого теоретического представления о вихревых процессах в циклонных аппаратах, где наблюдаются вихри сложной пространственной формы и направления. Актуальной проблемой является изучение параметров существования возмущений винтовой либо спиральной формы, так называемых процессов с прецессирующим вихревым ядром (вихрем винтовой формы) в струйно-вихревых рекуператорах. Для этого предложен аэродинамический стенд для физического и имитационного моделирования протекающих в рекуператоре процессов и задания на их основе граничных условий для численного CFD-моделирования.

Ключевые слова: струйно-вихревой рекуператор, физическая модель, теплотехнические аппараты с активными гидрогазодинамическими режимами.

Введение

В настоящее время энерготехнологические агрегаты, работа которых основана на применении закрученных высокотурбулентных потоков теплоносителей и вихревого эффекта Ранка, такие как циклонные и вихревые устройства, благодаря высокой энергоэффективности, определенной простоте конструкции, надежности и компактным габаритным размерам широко используются в различных отраслях промышленности. Одновременно для таких устройств достижимы высокие удельные эксплуатационные характеристики.

Несмотря на большое разнообразие типов и конструкций циклонно-вихревых аппаратов обычные циклонные камеры круглого поперечного сечения нашли наибольшее применение в промышленности в качестве нагревательных и теплообменных устройств.

Значительные успехи достигнуты в области исследования циклонно-вихревых потоков и вихревых камер различного технологического назначения. К устройствам данного семейства относят аппараты вихревых конструкций, позволяющие обеспечить значительную интенсификацию конвективного и лучистого теплообмена, повысить скорость, полноту и экономичность процессов тепловой обработки деталей и глубину утилизации тепла продуктов сгорания печных агрегатов промышленности, а также эффективность и экономичность нагрева с одновременным решением вопросов охраны окружающей среды и энергоменеджмента в масштабах предприятий, снижения капитальных и эксплуатационных затрат.

1. Постановка задачи

Согласно существующим представлениям, весь рабочий объем циклонной камеры по характеру изменения компонент скорости условно можно разделить на три основные области: ядро потока, приторцевые зоны течения и периферийную пристенную зону [1]. В процессе работы циклонно-вихревой камеры в ее рабочем объеме наблюдаются вихри сложной пространственной формы и направления. Такое распределение с формированием сложного поля осевых скоростей определяется геометрией камеры, трением потока о стенки, а также возникающим в некоторых случаях разрежением в приосевой зоне. Кроме того, сложность картины наблюдаемого процесса дополняется взаимодействием возникшего течения с ядром потока [2].

Создание теории вихревых процессов и соответствующего математического аппарата как области исследований и по сегодняшний день остается наиболее мало изученной. Можно говорить о создании нескольких частных теорий в области аэродинамики потока. Однако все они описывают протекающие в вихревых аппаратах процессы в привязке к конкретным конструкциям либо к определенному классу аппаратов [3].

Обеспечение вихревого характера процессов, протекающих в этих аппаратах, связано со значительными затратами энергии. Например, согласно данным [4], гидравлическое сопротивление закрученного потока может до 5-ти раз превышать его значение для течений без крутки.

Поэтому исследование работы струйно-вихревых теплообменников, разработка математического описания рабочих процессов на воздушной стороне рекуператоров, выполненных на основе струйно-вихревой технологии как аппаратов с активными гидрогазодинамическими режимами, является актуальной научной задачей.

2. Теоретические основы вихревого эффекта

Теория вихрей как совокупность работ, призванных теоретически обобщить наблюдаемые в природе и технике процессы формирования вихревых спиральных структур и течений, например, смерчей и торнадо, которые имеют ярко выраженную винтовую форму, оперирует математическим аппаратом, который сложно применять для решения научно-практических задач, а также специфическим языком, не свойственным теплотехнической науке [5].

Математические исследования в теории вихрей оперируют таким основным понятием гидродинамики (научной абстракцией), как точечный вихрь (вихревая нить), который является простой моделью реальных вихрей, на основе которой возможно построение математических моделей более сложных вихревых течений — модели потоков с вихревой симметрией. При рассмотрении модели движения системы вихрей внутри вращающегося цилиндра из теории вихрей [6] следует важный вывод о высокой неустойчивости таких вихревых спиральных образований и систем вихрей ($N > 3$).

Принимая во внимание вывод о неустойчивости вихревых спиральных структур и значительное число работ, посвященных теории вихрей, практический интерес может представлять теория концентрированных вихрей, которая основана на обобщении и систематизации опытных данных. Согласно этой теории, наиболее характерными являются возмущения винтовой либо спиральной формы, широко распространенные в природе и технике, а изучению процессов с прецессирующим вихревым ядром (вихрем винтовой формы) [3] в настоящее время исследователи уделяют большое внимание.

В качестве закручивающих устройств для придания потоку вращательного движения и частичной крутки применяют три группы завихрителей [7]: тангенциальные, которые сообщают закручиваемому потоку вращательное движение за счет тангенциального или улиточного подвода потока (рис. 1 а, б),

аксиальные, придающие потоку одновременно вращательное и осевое движения и протяженные завихрители, обеспечивающие закрутку потока по всей длине канала вихревого устройства [7].

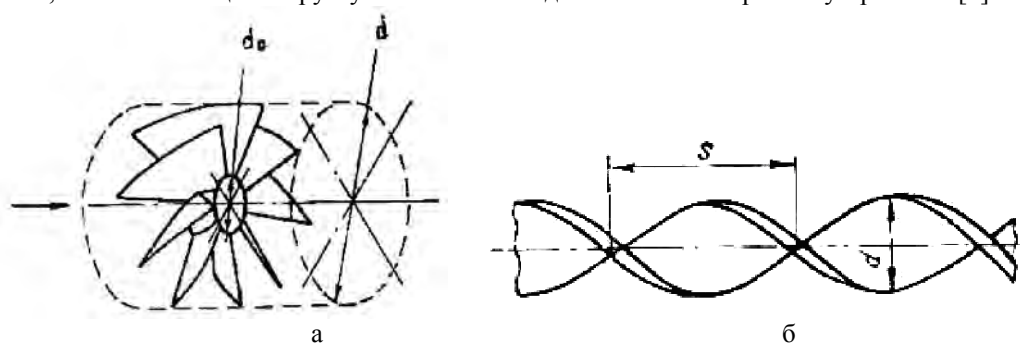


Рис. 1. Применяемые в циклонных аппаратах типы завихрителей [7]:
а — аксиально-лопаточный; б — ленточный.

В работе [8] на основе данных работ [9–12] составлена номограмма (карта) режимов распада вихря в координатах: параметр Re и отношение высоты (длины) вихревой трубы к ее радиусу R . Обобщение результатов исследований параметров распада вихревой структуры было проведено для вертикальной вихревой камеры, где спиральные вихревые структуры формируются вращающимся дном как генератором завихрений (рис. 2).

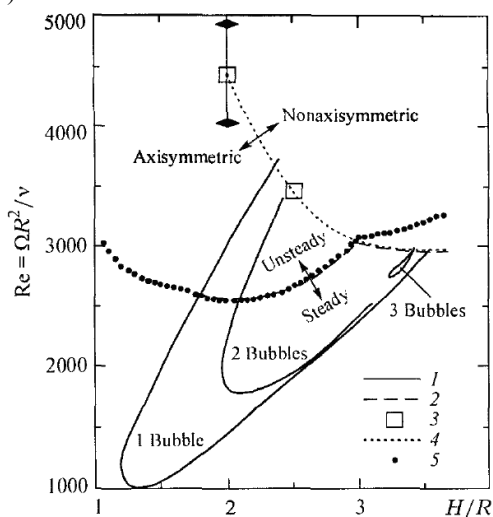


Рис. 2. Карта режимов распада вихря для экспериментов в сосуде с вращающейся крышкой [9–12].

Анализ номограммы показывает, что для вихревой трубы, высота H которой равна не более, чем нескольким радиусам R , обеспечивается соотношение $H/R \leq 3-4$ при величине $Re \leq 3000$, характерной для переходного режима и зарождения флуктуаций при формировании турбулентного течения. Распад вихревой структуры происходит согласно пузырьковой модели, а при турбулентном режиме $Re \geq 3000$ наблюдаются осесимметричный ($H/R \leq 2-3$) и неосесимметричный распад вихря ($H/R \geq 4$).

Величина параметра $Re \approx 3000$ соответствует не только переходному режиму ламинарного течения, в котором флуктуации формируются в недостаточном количестве для турбулизации всего потока — переходе в турбулентный режим, но и является границей перехода вихревой структуры в неустойчивый режим. На основе анализа номограммы можно говорить также и о том, что с увеличением длины вихревой трубы при увеличении параметра Re более характерным будет распад вихревой структуры по неосесимметричной модели. Это соответствует представлениям о стабильности вихревой спиральной структуры в границах длины вихревой трубы, равной нескольким калибрам, и в этом случае возможно применение модельных упрощений вихря, как пространственной спирали. Также очевидна нестабильность вихря и его распад на больших длинах вихревых труб при $H/R \geq 4$.

Номограмма косвенным образом подтверждает тезис о том, что все реальные течения в технике фактически являются турбулентными, а сами турбулентные течения, как совокупность хаотичных флуктуаций, завихрений и диссипаций потока в некоторой области могут представлять собой последствия распада вихревой структуры по неосесимметричной модели при $Re > 3000$ и $H/R > 3-4$.

3. Аэродинамический расчет циклонных устройств

Существующие на сегодняшний день методики расчетов циклонных устройств на основе аэродинамических представлений о вихревом потоке в основном являются полуэмпирическими, полученными за счет обобщения экспериментальных данных, которые позволяют аппроксимировать величину теплоотдачи к стенкам вихревой камеры следующей обобщенной зависимостью $Nu = A \cdot Re^B$ (где A , B — полуэмпирические коэффициенты), а для определенных случаев в аппроксимационное уравнение добавляется множитель Pg^C , где C — некоторая константа, зависящая от условий работы вихревого устройства и его геометрии. Рассмотренные методы расчета получили наибольшее распространение в связи с использованием уравнений движения турбулентного потока [2].

В ряде работ, например, в [13] использованы интегральные соотношения для пограничного слоя в совокупности с эмпирическими законами задания профиля скорости или нарастания толщины струи. Указанный метод применялся для решения динамической задачи в пристенных зонах у торцевой или боковой поверхностей. В [14] предложена схема расчета циклонного вихревого течения, как полый вращающейся турбулентной струи, обращенной пограничным слоем к оси камеры.

Первые методики аэродинамического расчета циклонных устройств основывались на применении уравнений движения идеальной жидкости [15]. В некоторых из этих методик использовались экспериментально установленные коэффициенты потерь напора, в других применяли физические представления о движении жидкости в центробежной форсунке [2] или использовали принцип максимального расхода при сохранении вдоль радиуса камеры момента количества движения из уравнения Бернулли [16]. В некоторых работах, например, в [17] отмечена бесперспективность совершенствования физической модели потока в гидравлической постановке задачи из-за грубой схематизации потока.

Прогноз эффективности поперечного оребрения (распорок-завихрителей) струйно-вихревого теплообменника конструкции [18] возможен на основе расчетного графика интенсивности частичной закрутки потока $\Phi_{\text{вх}}$ лопастями аксиального завихрителя (рис. 3) [7].

Анализ представленного графика показывает, что в зависимости от соотношения диаметров ступицы и лопастей аксиального завихрителя (рис 3, а), угол наклона лопаток φ , обеспечивающий максимальную эффективность крутки, находится в диапазоне $45\text{--}60^\circ$. Иначе говоря, с увеличением диаметра лопаток и при уменьшении диаметра ступицы аксиального завихрителя максимальное значение крутки возрастает по абсолютной величине в пределах $0,2\text{--}0,8$ (20–80 % соответственно). С достижением этих показателей при смещении максимального угла в сторону больших величин эффективность крутки определяется только величиной угла закрутки лопаток аксиального завихрителя φ .

Такой вывод хорошо коррелируется с распределением эффективности теплообмена при варьировании углов натекания на цилиндрическую поверхность, в частности, на наружную стенку трубчатых рекуперативных теплообменников.

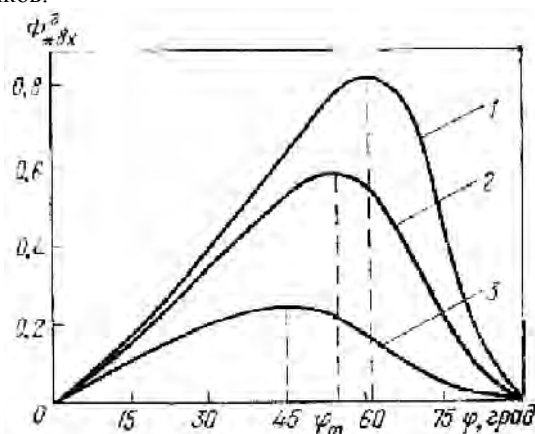


Рис. 3. Интенсивность частичной закрутки потока $\Phi_{\text{вх}}$ лопастями аксиального завихрителя с углом закрутки φ , радиусом лопастей r_1 , радиусом ступицы с прямыми лопатками r_0 : 1 — $r_0 = 0,5$; $r_1 = 0,9$; 2 — $r_0 = 0,65$; $r_1 = 0,9$; 3 — $r_0 = 0,5$; $r_1 = 0,8$ [7].

4. Методика исследования

Исследование работы струйно-вихревого рекуператора с активными гидрогазодинамическими режимами проводилось на физической модели (холодном стенде) с последующим CFD-моделированием процессов теплообмена на воздушной стороне рекуператора в научно-практическом комплексе SolidWorks Flow Simulation [19]. Физическая модель (ФМ) была выполнена в компоновке, согласно конструкции рекуператора [18], из оргстекла (Plexiglass®), распорки-завихрители в количестве 1–4

штуки, расположенные равномерно вдоль внутренней воздушной перфорированной по спирали трубы, выполнялись из ABS-пластика методом стереолитографического прототипирования — 3D-печати с допусками до 0,1 мм при минимальной шероховатости.

Численное исследование и CFD-моделирование для всех конструкций физической модели было проведено в SolidWorks с установкой максимальной точности моделирования, что соответствует программному ограничению в 8 циклов по ~239 итерациям уравнения Навье-Стокса. Основным допущением при создании численной модели работы струйно-вихревого рекуператора конструкции [18] было предположение о том, что характер линий тока и углы истечения импактных струй будут сохраняться при различных температурах нагрева наружной нагреваемой трубы.

На основе этого предположения были выбраны параметры численного исследования. CFD-моделирование проводили с количеством ячеек охлаждающего воздуха (Fluid cells) от 260000 до 100000 штук, неполных ячеек вследствие «сгущения» (Partial cells) — более 150000 штук, объемы численных CFD-исследований были ограничены числом итераций 300–400 после проведения моделирования для конструкции с одной распоркой-завихрителем на конце внутренней воздушной перфорированной по спирали трубы с числом итераций 1500–1700 (~7,9 цикла) длительностью 32–35 ч машинного времени. Измерение температуры нагретого воздуха на выходе из струйно-вихревой системы проводилось цифровым дифференциальным манометром-термоанемометром DT-8920 с трубкой Пито-Прандтля с величиной погрешности измерения температуры ± 1 °C.

Температура нагрева наружной нагреваемой трубы варьировалась в диапазоне 100–400 °C с шагом 100 °C. На ФМ также проводилась визуализация протекающих в системе процессов введением в рабочее пространство ФМ белого дыма из раствора на основе глицерина, производимого специализированной дымовой машиной Chauvet Shurrricane 700 (производство США), применяемой в киноиндустрии для создания эффектов. Имитационное моделирование процессов в ФМ проводили для различных вариантов ее конструктивного исполнения по числу перфорированных сопел и распорок-завихрителей.

5. Обсуждение результатов CFD-моделирования

При сравнении характера изменения скорости, температуры воздуха и параметра P_r был сделан вывод о том, что характер истечения импактных струй (impinging jets) и траекторий турбулизированного вихря этих струй в форме пространственной спирали одинаковы для расчетов 300 и 1500 итераций. Разница температур воздуха на выходе струйно-вихревого рекуператора для этих расчетов находится в районе погрешности применяемого для измерения граничных условий CDF-модели цифрового дифманометра DT-8920. Поэтому дальнейшие эксперименты по численному исследованию струйно-вихревых рекуператоров проводили до достижения 300–400 итераций.

Формирование зоны локального разогрева воздуха 1 в зазоре между наружной нагреваемой трубой и внутренней воздушной перфорированной трубой на «начальном» участке модели рекуператора связано с формированием обратных вихрей, а формирование вихревого потока с пространственной спиральной структурой не наблюдается. Напротив, формируются локальные зоны перегретого воздуха, которые со временем соединяются в протяженный фронт 2 с полем температур 530–690 К.

При анализе характера распределения температур воздуха на продольном разрезе рекуператора (рис. 4.) видно, что поток в рабочем пространстве все-таки представляет собой спиральную вихревую структуру, синусоиду с большим периодом и «размазанными» максимумами, которые представляют собой локальные зоны 3 с высокими температурами разогрева воздуха (до 690 К). Эти «максимумы» расположены зеркально относительно струй, участвующих в их формировании. Импактные струи 4 из этих сопел попадают в продольный вертикальный разрез CFD-модели и отчетливо видны благодаря своей низкой температуре относительно общего нагретого потока.

Можно сказать, что все типы конструктивного исполнения исследуемого струйно-вихревого рекуператора при моделировании проявляют отмеченные свойства такого спирального вихревого потока разогреваемого воздуха.

Анализируя температуры и траектории нагретого воздуха для различных конструктивных исполнений струйно-вихревого рекуператора, можно отметить, что при минимальном количестве распорок-завихрителей (1 шт.) на начальном участке (на входе рекуператора в торцевой части) за счет формирования обратных вихревых турбулизированных течений появляется зона локального разогрева воздуха до температур ~ 500–600 К при температуре наружной стенки рекуператора 673 К (рис. 4, а). Данная зона повышенного разогрева присутствует во всех типах конструктивного исполнения ФМ и минимально занимает около 1/3 длины теплообменника.

Также можно наблюдать формирование закрученного спирального потока разогреваемого воздуха, имеющего в разрезе симметрию, близкую по форме к синусоиде, относительно оси рекуператора с «размазанными» максимумами и одновременным появлением локальных зон нагрева в них. При этом спиральная структура (синусоида траекторий линий тока) выглядит «рваной», а не целостной пространственной спиралью, имеющей промежутки. Близкая к правильной синусоидальная симметрия

траекторий движения нагретого воздуха формируется с повышением числа распорок-завихрителей. На рис. 4, б четко видны чередующиеся «максимумы» с зонами разогрева и «минимумы» с температурами нагрева воздуха до 300–400 К.

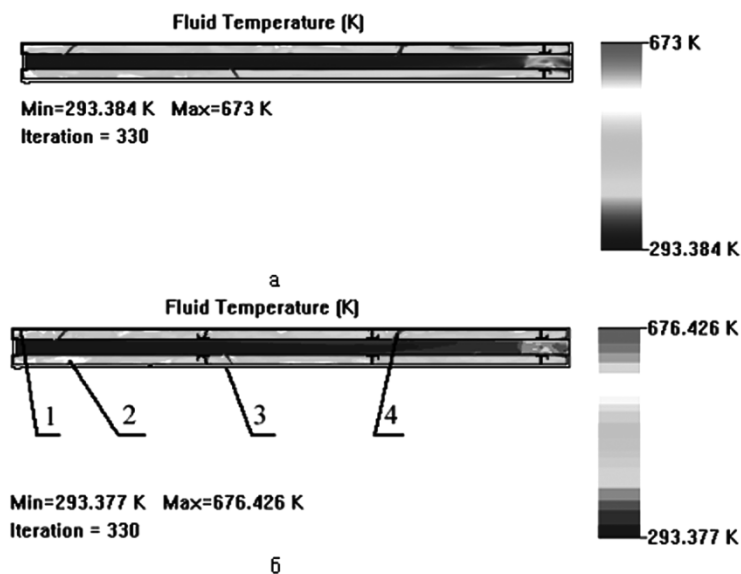


Рис. 4. Структура вихревых турбулизированных потоков в рабочем объеме CFD-модели струйно-вихревого рекуператора $H/D \leq 3$ при температуре нагрева наружной стенки 673 К (400 °С).

При увеличении числа распорок-завихрителей наблюдаемая цикличность линий тока (синусоида), в объеме представляющая собой пространственную спиральную вихревую структуру, распадается на локальные зоны разогрева, сконцентрированные непосредственно за распорками-завихрителями. Если объединить эти локальные зоны разогрева, то можно увидеть, что частота экстремумов синусоиды повысилась при увеличении числа распорок-завихрителей.

При анализе совокупности расчетных кривых (рис. 5) процесс можно видеть как фрактал двух взаимосвязанных и влияющих друг на друга систем: системы импактных струй и сформированной из них системы спиральных пространственных вихревых структур. Так, на графике радиальных скоростей можно видеть максимумы (острые пики) скорости, соответствующие моменту истечения импактной струи из сопла, и в точке экстремума — удару о нагретую поверхность. Одновременно на некоторых графиках пики имеют срезанные максимумы, при этом срезы соответствуют моменту прохождения импактной струи вдоль нагретой стенки CFD-модели. Другие кривые имеют достаточно плавный (параболический) выход на максимум скорости (удар о нагретую стенку) и большую площадь под кривой по сравнению с графиками, имеющими острые, слегка срезанные пики экстремумов.

Параболические кривые начинают появляться при длинах струй в диапазоне 0,6–0,8 м, а при длинах струй ~0,8–1,2 м наблюдается уплотнение кривых с максимумами. Кривые расположены настолько сконцентрировано, что трудно различать их принадлежность к конкретным номерам струй: возникает как бы резонанс пиков радиальной скорости. Причем, если максимумы радиальных скоростей при длинах струй до 0,6 м находятся в диапазоне ≤ 20 м/с, то для длин струй в диапазоне 0,8–1,2 м наблюдаются пиковые радиальные скорости до 30 м/с.

Графики радиальных скоростей для разных струй обладают очевидным подобием. Появление более пологих параболических кривых максимальных радиальных скоростей можно пояснить следующим образом. При аэродинамическом расчете диаметр сопла зависел от требуемого объемного расхода на входе в перфорированную воздушную трубу. Однако, аэродинамика истечения струй из отверстий в цилиндрической стенке имеет существенные отличия от истечения струй при обдувании перфорированной пластины.

При формировании струй из отверстий в цилиндрической стенке на воздух действуют одновременно динамический напор (характеризующий скорость потока) и статический напор как характеристика геометрии трубного канала. По длине трубы скорость и динамический напор падают (падает скорость потока), а статический напор по длине трубы растет. Это приводит к тому, что первые струи истекают под острыми углами, а струи в конце цилиндрической трубы истекают под углами, близкими к прямым.

Появление на графике радиальных скоростей нескольких острых пиков скоростей с может свидетельствовать о том, что импактные струи при соблюдении параметра $H/D \leq 3$ будут полноценно

работать и обеспечивать конвективный теплообмен при ударе о нагретую поверхность, несмотря на сносящих вихревой поток. Импульсные струи будут совместно с вихревым сносящим потоком за счет эффекта синергии участвовать в повышении степени крутки потока и эффективности теплоотдачи в рабочем пространстве рекуператора.

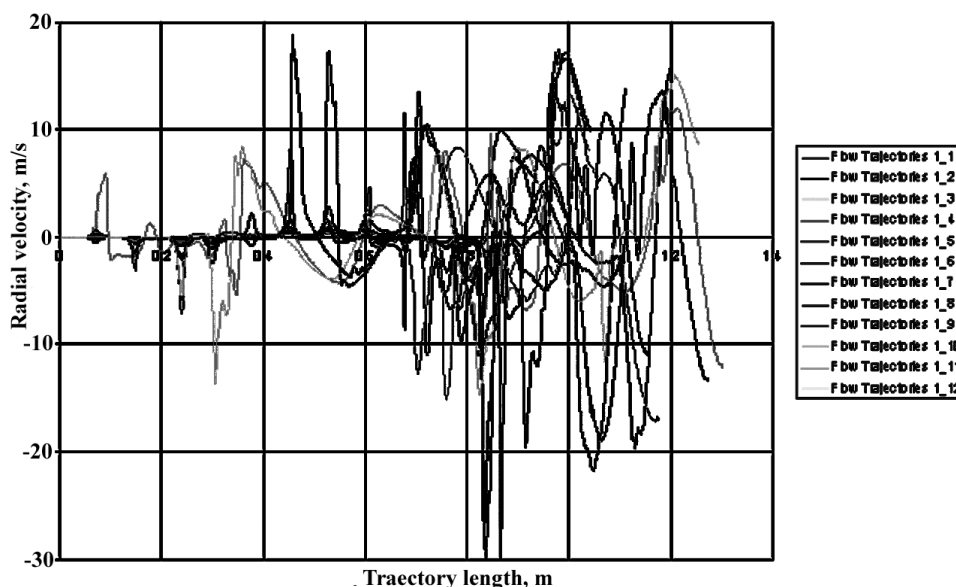


Рис. 5 Совокупности расчетных кривых зависимости радиальной скорости (radial velocity) от длины струи (trajectory length)

Кроме того, в диапазоне длин струй 1,0–1,2 м на графике радиальной скорости можно наблюдать широкие параболические пики, что может быть характеристикой малого участия последних по длине рекуператора струй в разогреве воздуха, несмотря на истечение их под углами, близкими к 90°.

Наличие пульсаций параметра P_r показывает, что струйно-вихревая система по характеру происходящих в ней процессов не подпадает под понятие вихревых труб и циклонных аппаратов, пульсации энергии можно наблюдать не только в пристенной области, но и в ядре — на стенках воздушной перфорированной трубы. При этом нельзя наблюдать однородный градиент температур между ядром вихревого движения и пристенным вихрем как в аппаратах на основе вихревого эффекта Ранка. Пульсации или говоря иначе волны можно наблюдать и в ядре и в пристенной области рекуператора.

Для анализа процессов, протекающих на воздушной стороне струйно-вихревого теплообменника при варьировании температуры нагрева наружной стенки рекуператора, и числа распорок-завихрителей, по данным CFD-моделей теплообменников были получены расчетные параметры нагретого воздуха на выходе из рекуператора (рис. 6).

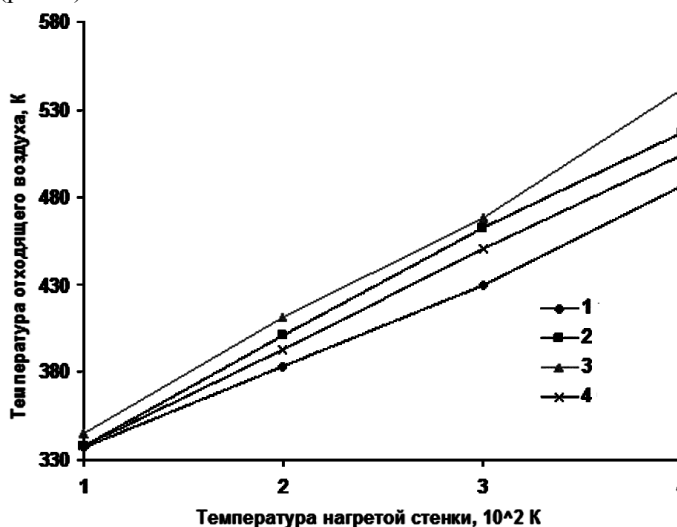


Рис. 6. Зависимость температуры отходящего воздуха от температуры нагретой стенки рекуператора и числа распорок-завихрителей: 1 — 1; 2 — 2; 3 — 3; 4 — 4.

Анализ поведения функции скорости потока воздуха на выходе рекуператора (рис. 6) показывает, что после достижения нагретой стенкой теплообменника температуры 200 °С (473 К) можно наблюдать повышение крутизны графика скорости для конструкции ФМ с 4-мя и 1-й распорками-завихрителями, максимальная скорость на выходе рекуператора прямо пропорционально связана с температурой нагрева наружной стенки рекуператора — при повышении этой температуры в диапазоне 200–400 °С (473–673 К) скорость отходящего воздуха достигает ~ 25–30 м/с и будет максимальной для рекуператора с 4 распорками-завихрителями. При этом зависимость скорости от числа распорок-завихрителей не составляет прямую пропорцию. Скорость на выходе системы из 2-х распорок-завихрителей будет выше, чем для рекуператора с тремя распорками-завихрителями.

Поскольку энергия потока не только повышается за счет конвективного разогрева воздуха, но и расходуется на преодоление местных аэродинамических сопротивлений (оребрений и шероховатости стенок) распределение кривых связано с тем, что потери скорости на преодоление сопротивлений для системы из 2 распорок-завихрителей будут меньше потерь для системы из 3-х сопел, при этом разогрев потока для 4-х распорок-завихрителей будет достаточным для компенсации потери скорости на местных сопротивлениях. Для системы из 3-х распорок-завихрителей разогрев спиральной вихревой структуры в рабочем пространстве CFD-модели не обеспечивает повышение скорости потока, аналогичное системе из 4-х сопел.

Мощность рекуператора, как интегральная характеристика тепловых процессов в его рабочем пространстве, повышается с повышением числа распорок-завихрителей и температуры нагрева наружной стенки.

Анализ кривых рис. 6. показывает, что максимальная температура отходящего воздуха наблюдается для исполнения ФМ с двумя и тремя распорками-завихрителями. При температуре стенки рекуператора 573 К кривые 2 и 3 расходятся, разность температур нагрева для них составляет ~ 40 °С. Наблюдаемую зависимость можно пояснить, исходя из модельного представления формирования спиральной пространственной вихревой структуры в струйно-вихревом рекуператоре, как результирующую наложения колебаний натянутой струны.

При этом в случае совпадения периодов и фаз вихря, формируемого импактными струями из перфорированных сопел воздушной трубы, и вихрем, создаваемым принудительной закруткой первого вихря поперечными завихрителями, спиральная структура вихря проявится более отчетливо, пики амплитуды не будут «размазанными», спиральная пространственная структура будет поддерживаться за счет закрутки потока распорками-завихрителями неподвижного оребрения. Таким образом, при размещении распорок-завихрителей в местах, обеспечивающих осцилляцию двух вихрей, либо в местах, близких к оптимальному, для достижения этой цели в рекуператоре можно будет достигнуть более высоких показателей утилизации тепла дымовых газов печи.

Выводы

Высокая эффективность работы струйно-вихревого теплообменника с активными гидродинамическими режимами может быть достигнута за счет эффекта синергии между эффектами от различных конструктивных решений. Анализ результатов численного исследования рекуператора предлагаемой конструкции показывают существенное влияние «волновой» составляющей, которая возникает в результате взаимодействия и наложения явлений, вызванных высокой внутренней неустойчивостью вихревого движения и способностью вихрей генерировать возмущения из-за особенностей спиральной пространственной структуры.

Если представить вместо вихря колеблющуюся натянутую струну, то создаваемые ее колебаниями волны будут иметь определенные показатели амплитуды, периода и частоты колебаний, иными словами, струна будет пульсировать. При наличии нескольких струн, генерируемые ими волны будут либо осциллировать, усиливать колебания друг друга, либо подавлять, если периоды колебаний совпадают либо находятся в противофазе соответственно.

Резкие локальные скачки P_r можно пояснить наличием пульсационных флуктуаций, волн, формируемых одновременно импактными струями в пристенной области и статичными распорками-завихрителями. Вихревые пульсации параметра P_r на поверхности внутренней воздушной перфорированной трубы могут быть объяснены на основе модели формирования концентрированных вихрей за истекающей в сносящий поток струей [8].

На преодоление оребрения расходуется значительное количество энергии (скорости) потока. Можно предположить, что наложение пульсаций энергии (скорости) нескольких сформированных в рабочем пространстве струйно-вихревого рекуператора вихревых спиральных структур и является причиной того, что протяженные области разогрева при увеличении числа распорок-завихрителей дробятся на локализованные за распорками-завихрителями оребрения разогретые турбулизированные флуктуации, что характерно для отрыва турбулизированного течения при обтекании т.н. плохо обтекаемого тела, которое можно наблюдать в авиации при обтекании крыла самолета.

Список литературы

1. Сабуров Э.Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом [Текст] / Э.Н.Сабуров. — Архангельск : Сев.-Зап. кн. изд-во, 1995. — 341 с.
2. Кортюева И.А. Аэродинамика и конвективный теплообмен в эллиптических циклонных нагревательных устройствах. Дисс.... канд. техн. наук. — Архангельск, 2003.
3. Ляндзберг А.Р. Вихревые теплообменники и конденсация в закрученном потоке [Текст] / А.Р.Ляндзберг, А.С. Латкин. — Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2004. — 149 с.
4. Высочин В.А, Сафонов В.А. Экспериментальное исследование рабочего процесса вихревой трубы // ИФЖ. — 1983. — Т. 44, № 12. — С. 235–242.
5. Козлов В.В. Общая теория вихрей [Текст] / В.В. Козлов. — Ижевск : Изд. дом «Удмуртский университет», 1998. — 238 с.
6. Фундаментальные и прикладные проблемы теории вихрей / Под ред. А.В. Борисова и др. — Москва-Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. — 704 с.
7. Халатов А.А. Теория и практика закрученных потоков [Текст] / А.А.Халатов. — Киев : Наук. думка, 1989. — 192 с.
8. Алексеенко С.В. Введение в теорию концентрированных вихрей [Текст] / Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. — Новосибирск : Институт теплофизики СО РАН, 2003. — 504 с.
9. Escudier M.P. Observations of the flow produced in a cylindrical container by rotating endwall // Exp. in Fluids. — 1984. — Vol. 2, № 4. — P. 189–196.
10. Sorensen J.N. Visualization of rotating fluid flow in a closed cylinder // Rep. AFM 92–06. Department of Fluid Mesh. Technical Univ. of Denmark, 1992.
11. Stevens J.L., Lopez J.M, Cantwell B.J. Oscillatory flow states in an enclosed cylinder with a rotating endwall // J. Fluid Mech. — 1999. — Vol. 389. — P. 101–118.
12. Gelfgat A.Y., Bar-Yoseph P.Z., Solan A. Stability of confined swirling flow with and without vortex breakdown // J. Fluid Mech. — 1996a. — Vol. 311. — P. 1–36.
13. Смолина Н.В. Повышение эффективности использования топлива и снижение выбросов вредных веществ в циклонных нагревательных устройствах с двухсторонним выводом газов оптимизацией их геометрических параметров: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Архангельск. — 1995. — 150 с.
14. Вулис Л.А., Устименко Б.П. Об аэродинамике циклонной топочной камеры // Теплоэнергетика. — 1954. — № 9. — С. 3–9.
15. Чинь Ко-фа. Экспериментально-теоретическое исследование турбулентной структуры потока в циклонной камере: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1962. — 21 с.
16. Калишевекий Л.Л., Кацнельсон Б.Д. и др. Циклонные топки / Под общ. ред. Г.Ф.Кнорре и М.Л.Наджарова. — М.-Л. : Госэнергоиздат, 1958. — 216 с.
17. Хавкин Ю.И. Центробежные форсунки. — Л. : Машиностроение, 1976. — 168 с.
18. Пат. 104396 Укр., МПК⁹ F 28 D 1/04, F 23 L 15/04. Рекуператор / К.В. Агеев. — Опубл. 27.01.14, Бюл. № 2.
19. Агеев К.В., Денисова А.Е. Струйно-вихревые рекуператоры для энергосберегающих технологий// Холодильна техніка та технологія. Енергетика та енергозбереження. — 2015. — № 51(4). — С. 76–82.

А.С. Денисова д-р техн. наук, професор; К.В. Агеев

Одеський національний політехнічний університет

**СТРУМИННО-ВИХРОВІ РЕКУПЕРАТОРИ ЯК АПАРАТИ З АКТИВНИМИ
ГІДРОГАЗОДИНАМІЧНИМИ РЕЖИМАМИ**

Дослідження роботи струминно-вихрових теплообмінників і розробка математичного опису процесів на повітряній стороні цих рекуператорів є актуальним науковим завданням, оскільки не існує єдиного теоретичного уявлення про вихрові процеси в циклонних апаратах де спостерігаються вихри складної просторової форми і напрямку. Актуальною проблемою є вивчення параметрів існування збурень гвинтової або спіральної форми, так званих процесів з вихровим ядром (вихром гвинтової форми), в струминно-вихрових рекуператорах. Для цього запропонований аеродинамічний стенд для фізичного і імітаційного моделювання процесів у рекуператорі та завдання на їх основі граничних умов для чисельного CFD-моделювання.

Ключові слова: струминно-вихровий рекуператор, фізична модель, теплотехнічні апарати з активними гідро газодинамічними режимами.

A.E. Denysova, K.V. Ageyev
Odessa National Polytechnic University

JET-VORTEX RECUPERATORS AS THE APPARATUS WITH HYDRO-ACTIVE MODES

The investigation of jet-vortex heat exchangers operation and mathematical formulation of processes on the recuperators air side is relevant science problem because there is no the single theoretical presentation of vortex processes in cyclone apparatus where complicated tridimensional shape and direction vortices are observed. The problem of current importance is research of existence parameters of disturbances of swirl spiral shape and directions. The disturbances so called processes with precessing nucleus vortex (spiral shape vortex) in jet-vortex recuperators. It is proposed the aerodynamic unit for physical simulation of recuperative processes for CFD-simulation boundary conditions definition on they basis.

Key words: jet-vortex heat exchanger, physical model, heat exchanger with hydro-active modes.

1. Saburov E.N. Tsiklonnye nagrevatel'nye ustroystva s intensifitsirovannym konvektivnym teploobmenom. — Arkhangel'sk : Sev.-Zap. kn. izd-vo, 1995. — 341 p.
2. Kortoeva I.A. Aerodinamika i konvektivnyy teploobmen v ellipticheskikh tsiklonnykh nagrevatel'nykh ustroystvakh. Diss.... kand. tekhn. nauk. — Arkhangel'sk, 2003.
3. Lyandzberg A.R., Latkin A.S. Vikhrevye teploobmenniki i kondensatsiya v zakruchennom potoke. — Petropavlovsk-Kamchatskiy : KamchatGTU, 2004. — 149 p
4. Vysochin V.A, Safonov V.A. Eksperimental'noe issledovanie rabocheho protsessa vikhrevoy trubyy // IFZh. — 1983. — T. 44, № 12. — P. 235–242.
5. Kozlov V.V. Obshchaya teoriya vikhrey [Tekst] / V.V. Kozlov. — Izhevsk : Izd. dom «Udmurtskiy universitet», 1998. — 238 p.
6. Fundamental'nye i prikladnye problemy teorii vikhrey / Pod red. A.V. Borisova, I.S.Mamaeva i M.A.Sokolovskogo. — Moskva-Izhevsk : Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2003. — 704 p.
7. Khalatov A.A. Teoriya i praktika zakruchennykh potokov. — Kiev : Nauk. dumka, 1989. — 192 p.
8. Alekseenko S.V., Kuybin P.A., Okulov V.L. Vvedenie v teoriyu kontsentrirovannykh vikhrey. — Novosibirsk : Institut teplofiziki SO RAN, 2003. — 504 p.
9. Escudier M.P. Observations of the flow produced in a cylindrical container by rotating endwall // Exp. in Fluids. — 1984. — Vol. 2, № 4. — P. 189–196.
10. Sorensen J.N. Visualization of rotating fluid flow in a closed cylinder // Rep. AFM 92–06. Department of Fluid Mech. Technical Univ. of Denmark, 1992.
11. Stevens J.L., Lopez J.M, Cantwell B.J. Oscillatory flow states in an enclosed cylinder with a rotating endwall // J. Fluid Mech. — 1999. — Vol. 389. — P. 101–118.
12. Gelfgat A.Y., Bar-Yoseph P.Z., Solan A. Stability of confined swirling flow with and without vortex breakdown // J. Fluid Mech. — 1996a. — Vol. 311. — P. 1–36.
13. Smolina N.V. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya topliva i snizhenie vybrosov vrednykh veshchestv v tsiklonnykh nagrevatel'nykh ustroystvakh s dvukh-storonnim vyvodom gazov optimizatsiyei ikh geometricheskikh parametrov: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. — Arkhangel'sk. — 1995. — 150 p.
14. Vulis L.A., Ustimenko B.P. Ob aerodinamike tsiklonnoy topochnoy kamery // Teploenergetika. — 1954. — № 9. — P. 3–9.
15. Chin' Ko-fa. Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie turbulentnoy struktury potoka v tsiklonnoy kamere: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. — M., 1962. — 21 p.
16. Kalishevskiy L.L., Katsnel'son B.D. i dr. Tsiklonnye topki / Pod obshch. red. G.F.Knorre i M.L.Nadzharova. — M.-L. : Gosenergoizdat, 1958. — 216 p.
17. Khavkin Yu.I. Tsentrobezhnye forsunki. — L. : Mashinostroenie, 1976. — 168 p.
18. Pat. 104396 Ukr., MPK⁹ F 28 D 1/04, F 23 L 15/04. Rekuperator / K.V. Ageev. — Opubl. 27.01.14, Byul. № 2.
19. Ageev K.V., Denisova A.E. Struyno-vikhrevye rekuperatory dlya energosberegayushchikh tekhnologiy, Kholodil'na tekhnika ta tekhnologiya. Energetika ta energozberezhennya, 2015, № 51(4), P. 76–82.

Надійшла 29.05.2015
Received 29.05.2015

ЕКОНОМІКА ECONOMY

УДК 620.9+338.2

М.Т. Стрелков, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

РЕГУЛЬОВАНА Й ДИФЕРЕНЦІЙОВАНА ТАРИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Метою статті є застосування механізму перехресно диференційованої тарифікації електроенергії до існуючої системи регульованих тарифних ставок, з використанням структурного ланцюга «ціни-тарифи-контракти». З цієї метою методи регульованого ціноутворення поділено на три групи, які за своїм механізмом розрахунку регульованих цін (тарифних ставок) у різній мірі орієнтовані на процеси електропостачання та споживання електроенергії. Показано, що перехресно диференційована тарифікація реалізує системний підхід до формування тарифних ставок та є більш потужним механізмом, ніж дискримінаційне ціноутворення. Проаналізовано відповідність тарифних ставок можливим ознакам диференціації та проілюстровано механізм перехресно диференційованої тарифікації. Як результат, в існуючій системі тарифних ставок, інтегрованих і диференційованих у часі, сформовано підсистеми одноставкових і багаставкових тарифів, а також підсистеми однокомпонентних і багатокомпонентних тарифів. Встановлено зв'язки між сформованими підсистемами. Показано відповідність сформованих підсистем тарифних ставок використовуваним контрактам на електропостачання (форвард, опціон покупця, опціон продавця).

Ключові слова: регульоване ціноутворення, дискримінація цін, перехресно диференційована тарифікація, лінійні та нелінійні ціни, підсистеми тарифних ставок, контракти на електропостачання.

Вступ. Ціноутворення, як засіб досягнення цілей цінової політики на рівні держави, галузі або фірми, може бути вільним і регульованим, дискримінаційним і диференційованим, лінійним і нелінійним. Метою застосування цінової дискримінації є збільшення прибутку виробників за рахунок перерозподілу на їх користь надлишку споживачів. Реалізація цінової дискримінації вимагає виконання певних умов, основними серед яких є наявність у виробника монопольної влади та неможливість перепродажу продукту ринку міжспоживачами. Це притаманне регульованому сектору електроенергетики, тільки ціни є регульованими, а прибуток не може перевищувати дозволений. Дискримінаційне ціноутворення за вільних або регульованих цін завжди є диференційованим.

Тарифікація електроенергії одночасно вимагає всеохоплюючого і поглибленого(системного) підходу до ціноутворення, оскільки безпосередньо пов'язана з реалізацією цінової стратегії фірми як обґрунтованого вибору ціни або переліку цін з декількох можливих варіантів. Оскільки диференційоване ціноутворення може бути як дискримінаційним, так і недискримінаційним, використовують систему тарифних ставок, диференційованих за певними ознаками через відповідні тарифні сітку, шкалу і компоненти. Системна тарифікація електроенергії, підґрунтям якої є теорія економічного регулювання, повинна базуватися на відповідності тарифних ставок перехресно диференційованим ознакам пов'язаних між собою у часі процесів електропостачання та споживання електроенергії.

Механізм тарифікації є замиканим, таким, що визначає ефективність ринкових перетворень на кожному етапі реорганізації електроенергетики, функціонування якої, як мережевої галузі, неможливе без природно монопольних утворень. Тому тарифікацію електроенергії розглянемо на прикладі класичної, вертикально інтегрованої, регульованої енергопостачальної компанії, яка є багатопродуктовою природною монополією та єдиним суб'єктом ринку в моделі всерівневої монополії на всіх стадіях технологічного процесу електропостачання [1-2].

Мета та завдання дослідження. Застосувати до існуючої системи регульованих тарифних ставок механізм перехресно диференційованої тарифікації електроенергії, використовуючи структурний ланцюг «ціни-тарифи-контракти». Узагальнено формалізувати й виділити серед методів регульованого ціноутворення групи методів, механізми розрахунку регульованих цін (тарифних ставок) за якими орієнтовані на процеси електропостачання та споживання електроенергії. Показати, що перехресно диференційоване тарифікаційне утворення, як засіб досягнення цілей цінової політики, реалізує системний підхід до тарифікації електроенергії та застосовує механізм, більш потужний, ніж дискримінаційне

ціноутворення. За ознаками, покладеними в основу механізму перехресно диференційованої арифкації, сформувати в існуючій системі тарифних ставок можливі підсистеми, встановити зв'язки між ними та пов'язати їх з існуючими контрактами на постачання електроенергії.

Прямі методи регульованого ціноутворення. До прямих будемо відносити методи, в основу яких покладено механізм безпосереднього розрахунку регульованих цін як результат взаємодії функцій ринкового попиту та економічних витрат виробництва енергопостачальної компанії. За таким механізмом встановлювані ціни будуть розв'язком оптимізаційної задачі з цільовою функцією суспільного добробуту ринку електроенергії (W , грн.), як сукупного надлишку споживачів (CS , грн.) і виробника (PS , грн.), та з обмеженням у вигляді умови безбитковості (отримання нульового економічного прибутку) енергопостачальної компанії. Формалізованим узагальненням подібної задачі є оптимізаційна задача дискримінаційного ціноутворення третього ступеня [3]:

$$\begin{cases} W = CS + PS = \sum_n CS_n(q_n) + T\pi(q) \rightarrow \max \\ \sum_n p_n(q_n) \times q_n - TC(q) = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

де n – індекс сегменту ринку; $CS_n(q_n) = \int_0^{q_n} p_n(q_n) dq_n - p_n(q_n) \times q_n$ – надлишки споживачів на сегментах ринку, грн.; p_n, q_n – ціни (грн./кВт*год.) та обсяги (кВт*год.) попиту на сегментах ринку; $p_n(q_n)$ – обернена функція попиту на сегментах ринку; $T\pi(q) = \sum_n p_n(q_n) \times q_n - TC(q)$ – функція повного (економічного) прибутку компанії, грн.; $q = \sum_n q_n$ – сукупний обсяг купівлі-продажу електроенергії, кВт*год.; $TC(q)$ – функція повних (економічних) витрат виробництва, грн.

Розв'язують задачу (1) використовуючи метод невизначених множників Лагранжу:

$$L = [\sum_n \int_0^{q_n} p_n(q_n) dq_n - TC(q)] + \mu \times [\sum_n p_n(q_n) \times q_n - TC(q)] \rightarrow \max, \quad (2)$$

де L – функція Лагранжу, грн.; $\mu > 0$ – невизначений множник Лагранжу. Розв'язком задачі (2) будуть обсяги купівлі-продажу електроенергії на кожному сегменті ринку Q_n , кВт*год., використовуючи які, знаходять лінійні ціни Рамсея [3]:

$$P_n = p_n(q_n = Q_n) = MC(Q)/(1 + R/E_{d,p}^{(n)}), \quad (3)$$

де $Q = \sum_n Q_n$ – сукупний обсяг купівлі-продажу електроенергії за розв'язком задачі (2), кВт*год.; $MC(Q)$ – граничні витрати сукупного обсягу виробництва, грн./кВт*год.; $E_{d,p}^{(n)}$ – цінові еластичності попиту на сегментах ринку; $R = \mu/(1 + \mu)$ – число Рамсея, $0 < R < 1$.

За відсутності цінової дискримінації ($n = 1$) оптимізаційна задача (1)-(2) спрощується, і ми отримуємо друге найкраще рішення цінового регулювання. За цим рішенням оптимальна лінійна ціна P_2 та обсяг Q_2 купівлі-продажу електроенергії визначаються координатами точки перетину ліній оберненої функції ринкового попиту $p(q)$ та функції середніх витрат виробництва $AC(q)$, грн./кВт*год., енергопостачальної компанії [3-4]:

$$p(q) = AC(q) \rightarrow P_2 = AC(Q_2). \quad (4)$$

За неактивного обмеження ($\mu = 0$) та відсутності цінової дискримінації ($n = 1$) маємо перше найкраще рішення цінового регулювання, за яким оптимальна лінійна ціна P_1 та обсяг Q_1 купівлі-продажу електроенергії визначаються координатами точки перетину ліній оберненої функції ринкового попиту $p(q)$ та функції граничних витрат виробництва $MC(q)$, грн./кВт*год., енергопостачальної компанії [3-4]:

$$p(q) = MC(q) \rightarrow P_1 = MC(Q_1). \quad (5)$$

Прямі методи (3)-(5) за формалізації (1)-(2) вважаються ідеальними [5], оскільки досягається максимальний добробут ринку (5) або мінімізуються його втрати (3)-(4). Для цього прямі методи регульованого ціноутворення потребують знання оберненої функції ринкового попиту й однієї з функцій економічних витрат виробництва, оскільки, як відомо, фірма-монополія не має функції ринкової пропозиції. Тому за своїм ідеальним механізмом розрахунку прямі методи більш орієнтовані на процес споживання, ніж постачання електроенергії.

Непрямі методи регульованого ціноутворення. До непрямих будемо відносити методи, в основу яких покладено механізм опосередкованого розрахунку регульованих цін, рівень яких буде забезпечувати енергопостачальній компанії достатній для отримання дозволеного бухгалтерського прибутку виторг. Механізм непрямих методів за недискримінаційного ціноутворення формалізується узагальнюючим рівнянням дозволеного прибутку ($T\pi$, грн.) енергопостачальної компанії, визначеного як частка бази (RB) для нарахування прибутку [4-5]:

$$T\pi = RR(Q) - TC(Q, K) = P \times Q - [TVC(Q) + TFC(K) + Tax] = s \times RB, \quad (6)$$

де $RR = P \times Q$ – потрібний виторг, грн.; P, Q – ціна (грн./кВт*год.) та обсяг продажу (кВт*год.) електроенергії; TC – повні (бухгалтерські) витрати, грн.; TVC – повні змінні (операційні) витрати, грн.; TFC – повні постійні (капітальні) витрати, грн.; K – обсяг капіталу, інвестованого в основну виробничу діяльність, грн.; Tax – сума податку на прибуток, грн.; s – встановлена норма прибутку; $s \times RB$ – сума дозволеного прибутку, грн.

Перепишемо рівняння (6) як узагальнену формулу лінійної ціни за непрямими методами:

$$P = RR/Q = (TC + T\pi)/Q = AC + A\pi = (1 + m) \times AC, \quad (7)$$

де AC – середні витрати, грн./кВт*год.; $A\pi$ – середній прибуток, грн./кВт*год.; m – норма надбавки до середніх витрат. За формулою (7) непрямі методи реалізують принцип ціноутворення «витрати плюс надбавка», де остання дорівнює

$$m = A\pi/AC = T\pi/TC = s \times (RB/TC),$$

а непрямі методи вважаються витратними методами регульованого ціноутворення.

Можливий вибір нормованої бази RB визначається змінними рівняння дозволеного прибутку (6), за якими називають показник рентабельності та відповідний йому непрямий метод регульованого ціноутворення, які зведено у таблицю 1, де AR позначає середній виторг компанії, грн./кВт*год.

Таблиця 1

Показники непрямих методів регульованого ціноутворення.

Регулювання норми прибутку за:	Нормована база(RB)	Дозволений прибуток($T\pi$)	Середній прибуток($A\pi$)	Норма надбавки(m)
обсягом випуску	Q	$s \times Q$	s	s/AC
обсягом продажу	TR	$s \times TR$	$s \times AR$	$s/(1 - s)$
витратами виробництва	TC	$s \times TC$	$s \times AC$	s
інвестованим капіталом	K	$s \times K$	$s \times (K/Q)$	$s \times (K/TC)$

Недискримінаційні лінійні ціни (7) за непрямыми методами, зібраними у таблиці 1, не є оптимальними, оскільки вони не отримані як розв'язок оптимізаційної задачі. У разі застосування, наприклад, цінової дискримінації третього ступеня потрібний виторг буде розраховуватися за формулою:

$$RR = \sum_n P_n \times Q_n, \quad (8)$$

де обсяги проданої на сегментах ринку електроенергії за n -ою ціною позначені як Q_n, P_n . Обидва рівняння (6) і (8) не вимагають встановлення економічно ефективних цін, головне щоб вони покривали повні витрати виробництва, включаючи податок на прибуток, та забезпечували дозволений прибуток [5].

Оскільки непрямі методи регульованого ціноутворення не потребують знання функцій ринкового попиту і пропозиції, але потребують знання бухгалтерських витрат виробництва, включаючи затрати самих факторів виробництва, за своїм витратним механізмом розрахунку вони більш орієнтовані на процес постачання ніж споживання електроенергії.

Змішані методи регульованого ціноутворення. До змішаних будемо відносити методи, в основу яких покладено механізм прогнозного розрахунку дозволених змін верхньої межі цінового показника (ціни, виторгу, індексу цін) відносно його базового рівня, значення якого можуть бути отримані за допомогою як прямих (орієнтованих на споживання), так і непрямих (орієнтованих на постачання) методів регульованого ціноутворення.

Вихідним положенням методу верхньої межі ціни є те, що відносно збільшення цін енергопостачальною компанією не повинно перевищувати рівень інфляції по економіці в цілому, що формалізується рівнянням у відносних одиницях [6-8]:

$$\Delta P/P = \alpha \times I_E = (1 - \beta) \times I_E = I_E - X, \quad (9)$$

де $I_E > 0$ – індекс інфляції; $0 < \alpha < 1$ – коефіцієнт зростання цін; $\beta = (1 - \alpha)$ – коефіцієнт відставання зростання цін; $X > 0$ – дефлятор зростання цін. Останній порівнює відносну динаміку зміни цін факторів виробництва та факторної продуктивності по економіці в цілому та регульованої енергопостачальної компанії. Інакше кажучи, відносне зростання цін (9) не повинно перевищувати різницю між індексом інфляції та дефлятором зростання цін з урахуванням можливого коригування, що у грошових одиницях приймає вигляд нерівності:

$$P_t \leq P_0 \times (1 + I_E - X \pm Z)_t, \quad t = (\overline{1, T}), \quad (10)$$

де P_t – дозволений рівень ціни, грн./кВт*год.; P_0 – базовий рівень ціни, грн./кВт*год.; t – інтервал регулювання, рік; T – горизонт регулювання, роки; Z – показник коригування рівня ціни (враховує обставини, які не є контрольованими, але повинні враховуватися компанією). Компанія самостійно встановлює ціни, рівень яких протягом інтервалу регулювання не перевищує верхню межу (10), а відносний рівень зростання цін протягом горизонту регулювання може досягти значення:

$$P_t/P_0 = \prod_{t=1}^{t=T} (1 + I_E - X \pm Z)_t.$$

У разі застосування, наприклад, цінової дискримінації третього ступеня в якості цінового показника використовують верхню межу виторгу компанії або верхню межу індексу цін, встановлених компанією. За методом верхньої межі виторгу маємо:

$$RR_{t+1} \leq (RR_t + \sum_n R_{n,t+1} \times \Delta Q_{n,t+1}) \times (1 + I_E - X \pm Z)_{t+1}, \quad t = (\overline{0, T}), \quad (11)$$

де RR_t – досягнутий на попередньому інтервалі регулювання потрібний виторг, грн.; n – індекс сегменту ринку; R_n – споживання електроенергії у грошовому еквіваленті на одного споживача, грн.;

ΔQ_n – зміна кількості споживачів протягом інтервалу регулювання. Аналогічно за методом верхньої межі індексу цін:

$$API_{t+1} \leq PCI_t \times (1 + I_E - X \pm Z)_{t+1}, \quad t = (\overline{0}, \overline{T}), \quad (12)$$

де API – індекс дійсних цін, %; PCI – верхня межа індексу цін, %.

Змішані методи вважаються стимулюючими, оскільки додатковий прибуток, який компанія може отримати за рахунок зменшення витрат виробництва протягом горизонту регулювання, може залишитися компанії або бути розділений між компанією та споживачами її продукції.

Змішані методи потребують поінформованості стосовно функцій ринкового попиту і витрат виробництва для встановлення базового рівня цінових показників (10)-(11), для яких базова верхня межа індексу цін (12) дорівнює 100%. Оскільки дозволені зміни верхньої межі цінового показника одночасно залежать від індексу інфляції та дефлятора зростання цін, змішані методи регульованого ціноутворення за своїм стимулюючим механізмом розрахунку однаково орієнтовані на обидва процес постачання та споживання електроенергії.

Інтегровані у часі та диференційовані за часом тарифи. Вихідною, всеохоплюючою (загальносистемною) диференціацією тарифних ставок є їх розподіл на тарифні ставки інтегровані у часі й тарифні ставки диференційовані за часом. Оскільки споживання на кожному часовому інтервалі можна вважати інтегрованим, то інтегровані у часі тарифні ставки є складовими тарифних ставок диференційованих за часом, тобто останні будуються з використанням перших. Тому складовою механізму диференційованої тарифікації електроенергії є перехресне використання тарифних ставок у часі.

Диференційовані за часом тарифні ставки враховують варіювання споживання електроенергії у часі та відповідні цьому зміни витрат виробництва енергопостачальної компанії з урахуванням достатності встановленої електричної потужності. Тобто вони є одночасно орієнтованими на процеси постачання та споживання електроенергії. Періоди часу, охоплювані підсистемою тарифних ставок за міжчасовою диференціацією, наступні:

тарифи реального часу, диференційовані за кожною годиною (60 хвилин) або протягом кожної години (поки що 30 хвилин), передумовою чого є вільне ціноутворення в нерегульованому секторі ринку електроенергії;

багатозонні тарифи, диференційовані за часом доби (тривалістю більше години), передумовою чого є висхідний характер короткострокових граничних витрат виробництва та нерівномірність споживання електроенергії протягом доби;

календарні тарифи, диференційовані за днями тижня (робочі, вихідні, свята), передумовою чого є нерівномірність споживання електроенергії протягом тижня;

сезонні тарифи, диференційовані за порою року, передумовою чого є коливання протягом року вартості палива й температури зовнішнього повітря;

тарифи на переривання, диференційовані за часом максимального навантаження енергосистеми, передумовою чого є дефіцит встановленої електричної потужності та згода споживачів обміняти низьку якість електропостачання на низьку ціну електроенергії.

Інтегровані у часі тарифні ставки, як показано далі, диференціюються за ознаками споживання та постачання електроенергії, утворюючи тим самим відповіді підсистеми тарифних ставок, наведених далі.

Одноставкові та багатоставкові тарифи. Пряма тарифікація (нульова диференціація) передбачає єдину тарифну ставку для оплати кожної одиниці спожитої електроенергії, врахованої лічильниками. *Прямий (простий) тариф* по лічильнику електроенергії являє собою лінійну ціну, оскільки повні видатки споживача TE (грн.), відповідно до виставленого рахунку, будуть лінійною функцією $TE = T \times Q$, де T – тарифна ставка оплати електроенергії, спожитої в обсязі Q [5]. Перше (5) і друге (4) найкраще рішення та ціни (7) і (10) є прикладами прямої тарифікації із різними механізмами розрахунку. Тарифи за нульовою диференціацією споживання електроенергії утворюють підсистему *одноставкових тарифів*, які завжди є лінійними цінами.

Тарифи за диференціацією використання враховують мету споживання електроенергії та реалізують дискримінацію цін третього ступеня. Електроенергію продають по різним цінам неоднорідним за ціновою еластичністю попиту групам споживачів, які утворюють відповідні сегменти ринку. Лінійні ціни (3), (8) та за нерівностями (11)-(12) є прикладами диференційованих за метою використання *сегментних тарифів* із різними механізмами розрахунку. Серед них тільки ціни Рамсея (3) є *соціально справедливими* тарифами, оскільки тільки вони мінімізують втрати суспільного добробуту ринку. Встановлення інших рівнів тарифних ставок, які забезпечують безбитковність виробництва, але не є цінами Рамсея, може викликати перехресне субсидування. Так звані *соціально орієнтовані* тарифи використовують у цьому контексті змішану диференціацію, поділяючи, як правило, побутовий сегмент ринку на неоднорідні групи споживачів за доходною еластичністю попиту, встановлюючи їм різні ціни. Після визначення рівнів тарифних ставок, на кожному сегменті ринку використовується свій прямий тариф по лічильнику електроенергії.

Тарифи за кількісною диференціацією враховують обсяг спожитої електроенергії та реалізують дискримінацію цін другого ступеня. Так *ступінчастий тариф* задає тарифну шкалу, яка складається щонайменш з двох тарифних ставок, серед яких для оплати кожної одиниці спожитої електроенергії вибирається тільки та ставка, нижній поріг ступеня споживання якої перевищено у найменшій мірі. Ступінчастий тариф являє собою лінійну ціну, оскільки повні видатки споживача є лінійною функцією:

$$TE = T_i \times Q, \quad Q_{i-1} < Q \leq Q_i, \quad i = (\overline{1, n}), \quad Q_0 = 0,$$

де Q_{i-1}, Q_i – відповідно нижній і верхній пороги i -го ступеня споживання; T_i – тарифна ставка i -го ступеня; n – кількість ступенів тарифної шкали. *Блочний тариф* задає тарифну сітку, яка складається щонайменш з двох тарифних ставок, кожна з яких вибирається для оплати кожної одиниці спожитої електроенергії тільки у визначеному для неї прирісному блоці споживання. Блочний тариф вже являє собою нелінійну ціну, оскільки повні видатки споживача є нелінійною функцією за рахунок фіксованої плати за кожен повністю спожитий блок електроенергії:

$$TE = \sum_{i=1}^m T_i \times \Delta Q_i + T_{m+1} \times (Q - \sum_{i=1}^m \Delta Q_i), \quad i = (\overline{1, n}), \quad m < n,$$

де $\Delta Q_i = Q_i - Q_{i-1}$ – максимальний обсяг електроенергії, спожитої в i -ому блоці; Q_{i-1}, Q_i – відповідно нижній і верхній пороги i -го блоку; T_i – тарифна ставка i -го блоку; n – кількість блоків тарифної сітки; m – кількість повністю спожитих блоків електроенергії; $(m + 1)$ – індекс замикаючого, неповністю спожитого блоку електроенергії.

Якщо співвідношення рівнів тарифних ставок «відповідає» закону попиту ($T_i > T_{i+1}$), то маємо *регресивний* ступінчастий або блочний тариф, що узгоджується із спадним характером середніх витрат постійної або сильної природної монополії [2]. Якщо співвідношення рівнів тарифних ставок «відповідає» закону пропозиції ($T_i < T_{i+1}$), то маємо *прогресивний* ступінчастий або блочний тариф, що узгоджується із зростаючим характером середніх витрат слабкої природної монополії. Тому механізм розрахунку ступінчастого і блочного тарифів є витратним [2]. Рівні тарифних ставок, визначені за тарифною шкалою для кожної ступені або за тарифною сіткою для кожного блоку, являють собою набір прямих тарифів по лічильнику електроенергії, послідовно змінюваних із збільшенням обсягу спожитої електроенергії.

Тарифи із змішаною диференціацією одночасно застосовують диференціацію використання, яка є первинною (визначальною), та кількісну диференціацією, яка є вторинною. Якщо на кожному сегменті ринку встановлюється свій ступінчастий тариф, то отримуємо *ступінчасто-сегментні тарифи*, які є лінійними цінами. Якщо на кожному сегменті ринку встановлюється свій блочний тариф, то отримуємо *блочно-сегментні тарифи*, які вже є нелінійними цінами.

Тарифи за кількісною диференціацією, диференційовані за метою використання та змішано диференційовані утворюють підсистему *багатоставкових тарифів*, які можуть бути як лінійними, так і нелінійними цінами. Основою диференційованих багатоставкових тарифів є одноставкові тарифи з нульовою диференціацією.

Однокомпонентні та багатоконпонентні тарифи. Одноставкові та багатоставкові тарифи, диференційовані за ознаками процесу споживання електроенергії, утворюють підсистему *однокомпонентних тарифів*, зібраних у матричній таблиці 2. Оскільки матриця відповідності є повною (немає жодного співпадаючого стовпця та рядка), її розбудова неможлива без подальшої диференціації системи тарифних ставок, але вже за ознаками процесу електропостачання. Тому підсистема *багатоконпонентних тарифів* обов'язково використовує тарифні ставки підсистеми однокомпонентних тарифів. Тобто складовою механізму диференційованої тарифікації електроенергії є перехресне використання тарифних ставок між створюваними підсистемами.

Таблиця 2

Матриця відповідності однокомпонентних тарифів.

Диференціація	використання (змішана*)		кількісна	
	нульова			
лінійний	Так	Так	Так	-
нелінійний	-	Так	-	Так
одноставковий	Так	-	-	-
багатоставковий	-	Так	Так	Так
Тарифи	прямий	сегментний*	ступінчастий	блочний

*ступінчасто-сегментний і блочно-сегментний

Регульована енергопостачальна компанія може реалізовувати вибрану цінову стратегію через призначення тарифних ставок, які задовольняють рівнянню потрібного виторгу:

$$RR = \sum_m T_m \times Q_m = [TFC(K) + Tax + s \times RB] + AVC \times Q = RR, \quad (13)$$

яке отримане з рівняння (6) з урахуванням формули (8), але в якому тепер m – це індекс продукту, вироблюваного або надаваного компанією; Q_m, T_m – обсяг продажу m -го продукту виробництва за m -ою

тарифною ставкою; AVC – середні змінні витрати, грн./кВт*год., постачання сукупного обсягу електроенергії Q . Оскільки рівняння (13) не вимагає оптимальних або економічно ефективних цін, передумовою створення багатокомпонентних тарифів є продуктова або витратна диференціація, різниця між якими пов'язана з використанням лівої або правої частини рівняння потрібного виторгу. Зауважимо, що у лівій частині рівняння (13) можуть використовуватися як лінійні, так і нелінійні ціни.

За витратною диференціацією сукупні витрати виробництва поділяються на постійну і змінну складові. Постійна складова, незалежна від обсягу виробництва (перший складник у правій частині (13)), враховує, зокрема, капітальні витрати на встановлену електричну потужність. Змінна складова, залежна від обсягу виробництва (другий складник у правій частині (13)), пов'язана із операційні витратами. Так двокомпонентний тариф щонайменш розділяє вартість встановленої електричної потужності виробника через *основну тарифну ставку*, як плату за абовану електричну потужність споживача, та вартість поставленої виробником електричної енергії через *додаткову тарифну ставку*, як плату за спожиту і враховану лічильниками споживача електроенергію.

Продуктова диференціація визначає кількість компонент тарифу, за якою електроенергія є одним (єдиним) вироблюваним продуктом (товаром), всі інші продукти виробництва є надаваними енергопостачальною компанією послугами. За основними тарифними ставками споживачі найчастіше оплачують приєднання до електричної мережі певного класу напруги, оренду вимірювального обладнання різного класу складності, включаючи зчитування показань і виставлення рахунків, та абовану електричну потужність (встановлену власну сумарну, максимально використовувану або одночасну з максимумом навантаження системи). В якості додаткових тарифних ставок для оплати спожитої електроенергії використовуються одноставкові й багатовставкові однокомпонентні тарифи.

Вищезгаданий двокомпонентний тариф також вказує на можливість диференціації споживачів за необхідною інтенсивністю електропостачання (основна ставка) та можливими обсягами споживання електроенергії (додаткова ставка). Тому до основної тарифної ставки, як і до додаткової, може бути застосована диференціація використання та кількісна диференціація інтенсивності електропостачання. Якщо, наприклад, енергопостачальна компанія закуповує електроенергію на оптовому ринку, то може використовуватись трикомпонентний тариф з двома основними й однією додатковою ставками. За основними ставками можуть сплачуватися послуги розподілення електроенергії низьковольтними електричними мережами та розповсюдження її між кінцевими споживачами. Додатковою ставкою буде середньозважена вартість купованої на оптовому ринку електроенергії. При цьому всі компоненти тарифу будуть диференційовані за ознаками груп споживачів і класу напруги приєднання.

Для виставлення рахунку за багатокомпонентних тарифів одночасно використовують щонайменш одну основну й одну додаткову ставки (двокомпонентний тариф). Тому багатокомпонентні тарифи завжди є нелінійними цінами, оскільки повні видатки споживачів складаються з фіксованої плати за основними тарифними ставками та змінної плати за додатковими тарифними ставками.

Підсистеми тарифів у контрактах на електропостачання. Комерційні взаємовідносини між енергопостачальною компанією та споживачами її продукції визначаються контрактами на постачання електроенергії. За визначенням, контракт – це договір (комерційна угода), або домовленість сторін щодо взаємних зобов'язань стосовно купівлі-продажу активу договору в майбутньому. До переваг підписання контрактів відносять скорочення транзакційних витрат (на укладання, проведення і завершення угоди), управління ризиком (у тому числі ціновим) та стимулювання ефективної поведінки сторін (наприклад, управління енерговикористанням). Контракти на постачання електроенергії пропонують споживачам фіксовані протягом певного періоду часу тарифи, а виробники забезпечують необхідну якість електропостачання відповідно до встановлених тарифів [9]. Використовувані у контрактах тарифи можуть бути однокомпонентними або багатокомпонентними, інтегрованими у часі або диференційованими за часом.

Контракти на постачання електроенергії, в яких ціну встановлюють, використовуючи однокомпонентні тарифи, припускаючи «необмежене» електропостачання, відносять до форвардних контрактів. Видатки споживача за таким контрактом, незважаючи на наявність витрат енергопостачальної компанії, можуть бути нульовими, якщо він не споживав електроенергію протягом визначеного угодою терміну часу.

Використання багатокомпонентних тарифів потребує зміни типу контракту. Так з технологічної точки зору двокомпонентний тариф диференціює необхідну швидкість електропостачання та можливу тривалість споживання електроенергії. Перше визначається встановленою електричною потужністю виробника, готового постачати свою продукцію в любий момент часу, друге – нерівномірним і переривчастим характером попиту (за бажанням) споживачів на продукцію виробника. Тому з комерційної точки зору двокомпонентний тариф розділяє фіксовану плату за право споживача користуватися потужностями виробника та змінну плату за отриману споживачем продукцію виробника. Інакше кажучи, основна тарифна ставка – це ціна доступності товару, додаткова тарифна ставка – це ціна використання (споживання) товару. Тепер видатки споживача складаються з фіксованої плати, що

сплачується ним незалежно від факту споживання електроенергії, та змінної плати, яка сплачується у разі купівлі та залежить від обсягу спожитої електроенергії.

Контракти на постачання електроенергії, структура ціни в яких відповідає вищевизначеній, припускаючи «необмежене» електропостачання, відносять до опціонних контрактів. У нашому випадку - це опціон покупця, який дає покупцю право, але не обов'язок купувати електроенергію протягом визначеного угодою терміну часу. За таким контрактом фіксована плата за право споживача користуватися виробничими потужностями виробника є опціонною премією, а додаткова тарифна ставка – ціною виконання контракту. Оскільки встановлена електрична потужність як фізична величина не є товаром або послугою, опціонну премію можна розглядати як специфічну форму оплати споживачем лізингу виробничого обладнання, яке він бере в оренду у енергопостачальної компанії з одночасною передачею його їй в управління.

У разі використання тарифів на переривання електропостачання маємо опціонний контракт продавця, за яким він отримує право, але не обов'язок продавати електроенергію протягом визначеного угодою терміну часу. За цим контрактом різниця між тарифними ставками без переривання і на переривання електропостачання є базою для нарахування опціонної премії, яка покупцю не виплачується, а зараховується у вигляді меншої тарифної ставки на переривання, яка стає ціною виконання контракту. Невиплата опціонної премії також дозволяє трактувати контракт на переривання електропостачання як форвардний контракт.

Взагалі форвардні й опціонні контракти на постачання є нестандартизованими, позабіржовими угодами, за якими ціни встановлюються за домовленістю сторін та є конфіденційними. За регульованої тарифікації електроенергії тарифні ставки навпаки є загальновідомими та затверджуються регуляторним органом, що розширює можливості застосування форвардних й опціонних контрактів на постачання.

Висновки.

1. Методи регульованого ціноутворення за відповідністю процесам електропостачання та споживання електроенергії поділяються на три групи. Прямі методи за своїм ідеальним механізмом розрахунку орієнтовані на процес споживання електроенергії, непрямі методи за своїм витратним механізмом розрахунку – на процес електропостачання. Змішані методи за своїм стимулюючим механізмом розрахунку орієнтовані на обидва процеси електропостачання та споживання електроенергії.

2. Застосований механізм диференційованої тарифікації електроенергії полягає у перехресному використанні тарифних ставок у часі та між створюваними підсистемами. Загальносистемною диференціацією тарифних ставок є їх розподіл на тарифні ставки, інтегровані у часі, й тарифні ставки, диференційовані за часом. Перші диференціюються за ознаками електропостачання та споживання електроенергії, останні – за ознаками міжчасової диференціації, одночасно орієнтованої на обидва процеси.

3. Тарифи за нульовою диференціацією споживання утворюють підсистему одноставкових тарифів, які завжди є лінійними цінами. Тарифи за кількісною диференціацією, диференціацією використання та змішано диференційовані утворюють підсистему багатоставкових тарифів, які можуть бути лінійними і нелінійними цінами. Одноставкові й багатоставкові тарифи утворюють підсистему однокомпонентних тарифів.

4. Підсистема багатокомпонентних тарифів розділяє, використовуючи витратну диференціацію, необхідну швидкість (інтенсивність) електропостачання та можливу тривалість (обсяги) споживання електроенергії через основні та додаткові ставки, кількість компонент яких визначається продуктовою диференціацією. Підсистема багатокомпонентних тарифів використовує тарифні ставки підсистеми однокомпонентних тарифів у якості додаткових ставок.

5. Однокомпонентні тарифи застосовуються як ціни у форвардних контрактах на електропостачання, багатокомпонентні тарифи – в опціонних контрактах на електропостачання.

Список літератури

1. Стрелков М.Т. Лібералізація в системі ринку електричної енергії // *Енергетика та електрифікація*. – 2012. – № 10. – С.10-17.
2. Стрелков М.Т. Розвиток природної монополії в електроенергетиці: змінні, індекси, стійкість, стадії. // *Енергетика та електрифікація*. – 2014. – № 12. – С.32-38.
3. Berg S.V., Tschirhart J. *Natural Monopoly Regulation: Principles and Practice*. – Cambridge University Press, 1988. – 564 p.
4. Train K.E. *Optimal Regulation: the Economic Theory of Natural Monopoly*. – MIT, 1991. – 338 p.
5. Віскузі В.К., Вернон Д.М., Гарингтон Д.Е. *Економічна теорія регулювання та антимонопольна політика*. – К.: Основи, 2004. – 1047 с.
6. Schmalensee R. *The Control of Natural Monopolies*. – Lexington Books, 1979. – 179 p.
7. Waterson M. *Regulation of the Firm and Natural Monopoly*. – Basil Blackwell, 1988. – 164 p.
8. Shepherd W.G. *The Economics of Industrial Organization*. – Prentice Hall, 1990. – 566 p.
9. Hunt S., Shuttleworth G. *Competition and Choice in Electricity*. – Wiley, 1996. – 237 p.

M.T. Strelkov

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

REGULATED AND DIFFERENTIATED TARIFFICATION OF ELECTRICITY

The purpose of the article is to apply the mechanism of cross-differentiated electricity tariffication to the existing system of regulated tariffs in accordance with the structure chain of "prices-tariffs-contracts". With this purpose methods of regulated pricing are divided into three groups of methods which are one way or another orientated towards the processes of electricity supply or electricity consumption according to their mechanism of regulated prices (tariffs) calculation. It is shown that cross-differentiated tariffication makes use of system approach to form electricity tariffs and that is more powerful mechanism than discriminatory pricing. Correspondence between electricity tariffs and possible indications of differentiation has been analyzed. The mechanism of cross-differentiated tariffication has been illustrated. As a result in the existing system of electricity tariffs integrated and differentiated by time, subsystems of one-part and multipart tariffs have been formed as well as subsystems of one-component and multicomponent tariffs. Connections between the formed tariffs subsystems are established. Correspondence between the formed electricity tariffs subsystems and contracts using for electricity supply is shown (forward, call option, put option).

Key words: regulated pricing, price discrimination, differentiated tariffication, linear and nonlinear prices, tariffs subsystems, contracts for electricity supply.

1. Strelkov M.T. Liberalization in the System of Electricity Market. // Energy and electrification. – 2012. – № 10. – С.10-17.
2. Strelkov M.T. Natural Monopoly Development in Electricity Industry: variables, indexes, sustainability, stages. // Energy and electrification. – 2014. – № 12. – С.32-38.
3. Berg S.V., Tschirhart J. Natural Monopoly Regulation: Principles and Practice. – Cambridge University Press, 1988. – 564 p.
4. Train K.E. Optimal Regulation: the Economic Theory of Natural Monopoly. – MIT, 1991. – 338 p.
5. Viscusi W.K., Vernon J.M., Harrington J.E. Economics of Regulation and Antitrust. – K.: Osnowy, 2004. – 1047 с.
6. Schmalensee R. The Control of Natural Monopolies. – Lexington Books, 1979. – 179 p.
7. Waterson M. Regulation of the Firm and Natural Monopoly. – Basil Blackwell, 1988. – 164 p.
8. Shepherd W.G. The Economics of Industrial Organization. – Prentice Hall, 1990. – 566 p.
9. Hunt S., Shuttleworth G. Competition and Choice in Electricity. – Wiley, 1996. – 237 p.

УДК 620.9+338.2

М.Т. Стрелков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» РЕГУЛИРУЕМАЯ И ДИФФЕРЕНЦИРОВАННАЯ ТАРИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Целью статьи является применение механизма перекрестно дифференцированной тарификации электроэнергии к существующей системе регулируемых тарифных ставок с использованием структурной цепочки «цены-тарифы-контракты». С этой целью методы регулируемого ценообразования разбиты на три группы методов, которые согласно своему механизму расчета регулируемых цен (тарифных ставок) в разной степени ориентированы на процессы электроснабжения и потребления электроэнергии. Показано, что перекрестно дифференцированная тарификация реализует системный подход к формированию тарифных ставок и является более мощным механизмом, чем дискриминационное ценообразование. Проанализировано соответствие тарифных ставок возможным признакам дифференциации и проиллюстрировано механизм перекрестно дифференцированной тарификации. Как результат, в существующей системе тарифных ставок, интегрированных и дифференцированных во времени, сформированы подсистемы одноставочных и многоставочных тарифов, а также подсистемы однокомпонентных и многокомпонентных тарифов. Установлены связи между сформированными подсистемами. Показано соответствие сформированных подсистем тарифных ставок используемым контрактам на электроснабжение (форвард, опцион покупателя, опцион продавца).

Ключевые слова: регулируемое ценообразование, дискриминация цен, перекрестно дифференцированная тарификация, линейные и нелинейные цены, подсистемы тарифных ставок, контракты на электроснабжение.

Надійшла 18.05.2015

Received 18.05.2015

**ОСНОВНІ ЗАСАДИ РЕДАКЦІЙНОЇ ПОЛІТИКИ ЖУРНАЛУ
«ЕНЕРГЕТИКА: ЕКОНОМІКА, ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ»**

Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія» - фахове видання, що надає вченим, дослідникам і фахівцям-практикам можливість викладати результати своїх наукових досліджень в галузі енергетики і енергозбереження, економіки та екології.

У виданнях журналу представлені питання, які стосуються систем енергетики, електро-теплопостачання і електротеплоспоживання, а також джерел як традиційної, так і не традиційної генерації, зокрема – відновлюваних джерел, питанням перетворення, передавання, розподілення енергії та енергоспоживання. Також присутні важливі для всього людства питання щодо пом'якшення впливу змін клімату.

Значна увага приділяється економічному обґрунтуванню інвестиційної привабливості енергетичних проєктів та заходів, зокрема, схем їх фінансування та ефективності впровадження, формування й оптимізації різних варіантів, систем прийняття рішень, з урахуванням можливих ризиків.

Основними засадами редакційної політики є: актуальність, достовірність, обґрунтованість, наукова новизна, інноваційність у статтях видання. Тематика рукописів, які подаються до друку, має відповідати науковим напрямам журналу. Статті не повинні мати характер відкритої чи прихованої реклами (антиреклами). Редакція залишає за собою право редагувати надіслані рукописи з метою забезпечення відповідності текстів граматичним, орфографічним, стилістичним нормам та правилам.

Автор(и), надаючи рукопис для публікації, автоматично підтверджує, що поданий рукопис надається для опублікування вперше, є результатом власних досліджень, а будь-яке використання у цих рукописах досліджень інших осіб чи інформації з інших джерел оформлено відповідно до чинних вимог законодавства України та міжнародної практики. Рукописи приймаються до публікації тільки у разі якщо, автор(и) згоден(ні) на відкритий доступ до його статті через мережу Інтернет: через web-сайт журналу <http://energy.iee.kpi.ua>, інформаційний ресурс Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського «Наукова періодика України», Електронний архів НТУУ «КПІ», наукометричні бази даних та портали закордонних наукових бібліотек.

Усі рукописи, що подаються до публікації, проходять дворівневу систему рецензування: внутрішню та зовнішню.

Порядок розгляду рукописів:

1) Рукопис приймається редколегією до розгляду тільки за умови відповідності його оформлення чинним вимогам МОН України, державним та міжнародним стандартам, та вимогам до оформлення статей у журналі. Рукопис може бути відхилений чи відправлений на доопрацювання у разі невідповідності вищезазначеним вимогам.

2) Рукопис попередньо розглядає редакційна колегія.

3) Редколегія направляє рукопис на обов'язкове незалежне рецензування.

4) Тільки після остаточного узгодження всіх питань стосовно змісту рукопису, він вважається прийнятним до опублікування.

5) Редколегією вирішується питання щодо включення рукопису у відповідний номер журналу, про що повідомляється авторові.

Редакційна колегія журналу «Енергетика: економіка, технології, екологія» прагне до того, щоб видання становило інтерес не лише для науковців України, але також і зарубіжних країн. Тому редакційна колегія заохочує публікації, наданні авторами з інших країн, а також колективами авторів, що складаються як з українських, так і з закордонних вчених.

Для інтеграції результатів наукових досліджень, поданих у журналі, до світової науки редакційна колегія здійснює процес реєстрації видання у закордонних наукометричних базах даних.

Редакційна колегія заохочує до публікації молодих вчених, які здійснюють інноваційну науково-дослідну роботу у галузі енергетики.

Редакційна колегія підтримує політику відкритого доступу, тому на web-сайті видання представлено постатейно архів журналу, починаючи з 2004 року, у відкритому форматі Portable Document Format (pdf). Кожний новий випуск журналу паралельно з друкованою версією з'являється на сайті видання без ембарго (затримки).

У рамках редакційної політики науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія» послідовно дотримується видавничих стандартів публікації COPE Code of Conduct, затверджених COP (Committee on Publication Ethics).

Право інтелектуальної власності на результати наукових досліджень, поданих у вигляді рукопису до редколегії, належить авторам статті. У випадку виявлення плагіату відповідальність несуть автори наданих матеріалів. Висловлені у статтях думки та пропозиції не обов'язково збігаються з точкою зору редакційної колегії. Відповідальність за достовірність інформації у статтях, точність назв, статистичних даних, прізвищ та цитувань несуть автори. Всі питання та зауваження стосовно діяльності журналу необхідно надсилати на адресу електронної або звичайної пошти редколегії.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для публікації в журналі "Енергетика: економіка, технології, екологія" приймаються статті, надруковані на стандартних аркушах паперу А4 (в 2-х примірниках), що супроводжуються електронною версією (Microsoft Word 2003 або 2007) на CD/DVD дисках, USB-флеш накопичувачах або надіслані електронною поштою.

Мова статті обирається автором. Параметри сторінки: поля верхні, нижні, ліві та праві – 2,5 см. Вирівнювання основного тексту – за шириною. Перші рядки всіх абзаців – з відступом 0,6 см, шрифт Times New Roman, кегль 10, інтервал 1. Назва статті друкується великими напівжирними літерами – кегль 14. Заголовки елементів основного тексту виділяються напівжирним шрифтом.

Структура статті: 1) номер УДК (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом); 2) ініціали, прізвища авторів (великими літерами) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання, посада, повна назва організації, адреса організації) - вирівнювання за правим краєм; 3) назва статті (у центрі); 4) 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, ключові слова (6–8 слів), словосполучення «Ключові слова» – напівжирним; 5) основний текст статті; 6) перелік літератури; 7) п.2, 3, 4, 6 – англійською мовою; 8) номер УДК, п.2,3,4 російською/українською, якщо основний текст представлено українською/російською мовою.

Відповідно до постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003р. до друку приймаються наукові статті, що мають такі елементи: **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 його на частини з відповідними назвами); **Висновки** (зазначити основні висновки з даного дослідження та перспективи його подальшого розвитку в цьому напрямку).

Для надання відомостей про авторів англійською мовою слід використовувати загальноприйнятну лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад та місця роботи. **Англомовна анотація за обсягом рекомендується більшою за українську (російську)**, оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

Обсяг статті, включаючи текст, таблиці, рисунки, не має перевищувати 6–8 сторінок. **Сторінки повністю заповнені текстом**. Схеми, рисунки й таблиці 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 такі елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонтитули. Стаття має бути ретельно перевірена та підписана всіма авторами.

Рисунки (діаграми, фото тощо) подаються у чорно-білому зображенні разом із текстом, у місцях посилань на них. **Вимога до графічних матеріалів: будь-яка ілюстрація повинна бути єдиним нерозривним графічним об'єктом**. 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.

Формули в статтях мають бути набрані за допомогою редактора формул (внутрішній редактор формул у Microsoft Word). 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.

Список літератури наводиться в порядку посилань у тексті відповідно до ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках. Список використаних джерел подається двічі: мовою оригіналу й англійською. У англомовному списку літератури (References) прізвища та назви журналу, видавництва подаються згідно з правилами транслітерації, відповідно до Постанови КМУ від 27 січня 2010 р. №55 (для української мови) або вимогам системи BGN/HCGN (для російської мови). **Назви статті, книги перекладаються англійською мовою.**

В окремому файлі надаються відомості про авторів: прізвище, ім'я та по-батькові повністю, науковий ступінь, вчене звання, посада, місце роботи (повна назва організації без скорочень, адреса, місто, країна), контактні телефони та електронна пошта

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити скорочення та редакційну правку статей.

Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" не розглядаються.

Контакти: тел. (38-044) 406-85-14, <http://energy.iee.kpi.ua>, e-mail: krav@iee.kpi.ua