

ISSN 1813-5420

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

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№3–2020

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

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія

Науковий журнал

№ 3 (61) - 2020

Виходить 4 рази на рік
Заснований у березні 2000 року

Енергетичні системи та комплекси
Моніторинг, діагностика та керування енергетичними процесами та
обладнанням
Енергетична ефективність та енергозбереження
Технології та обладнання в енергетиці
Екологічні проблеми в енергетиці

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Головний редактор – Ю.І. Якименко

Заступники

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

Відповідальний секретар – О.О. Закладний

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

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ

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

Технічний секретар Н.О. Кравчук.

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

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

Журнал внесено до Переліку фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук відповідно до наказу МОН України № 1188 від 24 вересня 2020 р. (категорія «Б»). Журнал включено до баз даних «Наукова періодика України» НБУВ, Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, Джерело, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, електронного архіву наукових матеріалів ELAKPI. Підписано до друку за рекомендацією Вченої ради Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (протокол № 1 від 29 січня 2021 р.).

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

Відповідальний за випуск видання Н.О.Кравчук.

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

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

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

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

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

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

POWER ENGINEERING

economics, technique, ecology

ENERHETYKA:
ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya

The Scientific Journal

№ 3 (61) – 2020

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Energy systems and complexes
Monitoring, diagnostics and management of energy processes and
equipment
Energy efficiency and energy savings
Energy technologies and equipment
Environmental problems in energy

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2020

Editor-in-chief Yu.I. Yakymenko

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

Deputy O.O. Zakladnyi

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

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

Technical secretary N.O. Kravchuk

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

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

The Journal was registered approved by order of MES of Ukraine № 1188 of September 24, 2020 as an occupational edition. The Journal is included in databases «Scientific Periodicals of Ukraine», Google Scholar, Index Copernicus WorldCat, BASE, OpenAIRE, Djerelo, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, electronic archive of research materials ELAKPI. Passed for printing under recommendation of Academic Council of National Technical University of Ukraine " Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute " (protocol № 1 on January 29, 2021).

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

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

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

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

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

© Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

- С.П. Денисюк, Т.М. Базюк.** Оцінка додаткових втрат та ефективність регулювання споживання електроенергії в локальних системах електропостачання..... 7
- А. В. Волошко, Я.С. Бедерак, Т.Е. Джеря.** Визначення показника Херста при фрактальному аналізі електричних навантажень.. 22

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

- С.В. Зайченко, Р.Д. Куліш, Д.Г. Дерев'янюк, Н.І. Жукова.** Обґрунтування діагностичних параметрів автономних джерел електричної енергії на базі двигуна внутрішнього згоряння при розробці системи технічного діагностування. 29
- В.В. Михайленко, Ю.М. Чуняк, В.І. Бачинський.** Аналіз процесів у перетворювачі з одинадцятизонним регулюванням вихідної напруги. 35
- В.М. Сліденко, С.П. Шевчук.** Електрогідравлічна адаптивна гідроімпульсна система. 41

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

- В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, А.В. Чернявський.** Методичні питання впровадження систем енергетичного моніторингу промислових підприємств 47
- М.М. Шовкалюк, Є.О. Микита.** Оцінка енергетичних характеристик житлової будівлі та сертифікація енергоефективності. 57

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

- О.М. Попович, Л.К. Лістовщик, А. Крібаа.** Комплексне конструювання багатомашинної електромеханічної системи вітрогенераторів. 66
- Л.Д. Третякова, О.С. Гльчук.** Алгоритм рейтингування для оцінювання системи управління охороною праці. 72

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

- О.М. Терентьєв, М.І. Сергієнко, В.Г. Смоляр.** Вплив промислового автомобільного транспорту на навколишнє середовище. 85
- Вимоги до оформлення статей 92

CONTENTS

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

- S. Denysiuk, T. Bazyuk.** Evaluation of additional losses and efficiency electricity consumption regulation in local power supply systems..... 7
- A. Voloshko, Ya. Bederak, T. Dzheria.** Complex statistical data analysis of electric power consumption, consumption of energy resources and production volumes..... 22

MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

- S. Zaichenko, R. Kulish, D. Derevyanko, N. Zhukova.** Substantiation of diagnostic parameters of autonomous sources of electric energy on the basis of the internal combustion engine at development of system of technical diagnostics..... 29
- V. Mihaylenko, J. Chuniak, V. Bachinskiy.** Analysis of processes in converter with eleven zone regulation output voltage 35
- V. Slidenko, S. Shevchuk.** Electrohydraulic adaptive hydropulse system..... 41

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

- V. Nakhodov, O. Borychenko, A. Cherniavskiy.** The methodical issues of industrial energy monitoring systems implementation..... 47
- M. Shovkaliuk, Y. Mykyta.** Assessment of energy characteristics of residential building and certification of energy efficiency 57

ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- O. Popovych, L. Listovshchik, A. Kribaa.** Complex design of multi-machine electromechanical system of wind generators 66
- L. Tretiakova, O. Ilchuk.** Rating algorithm development for assessing the effectiveness of the occupational health and safety management 72

ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

- O. Terentiev, M. Sergienko, V. Smoliar.** Environmental impact of industrial transport 85
- Requirements for the articles 92

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.316

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6299-3680
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Т.М. Базюк, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-4594-0613

ОЦІНКА ДОДАТКОВИХ ВТРАТ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕГУЛЮВАННЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Наведено особливості оцінки сумарних втрат енергії в електричних мережах та оцінки характеру споживання електроенергії в локальних системах електропостачання (ЛСЕ). Здійснено аналіз структури додаткових втрат електроенергії в ЛСЕ при наявності вищих гармонік струму та напруги, для представлення інтегральних характеристик і показників оцінки взаємного впливу елементів систем розглянуто узагальнений розклад миттєвих функцій струму $i(t)$, напруги $u(t)$ та потужності $p(t)$ на складові. Запропоновані показники оцінки виконання критерію мінімуму втрат електроенергії в ЛСЕ дозволяють оцінити рівні спотворення енергетичних процесів при розгляді як обмінних процесів, так і при аналізі додаткових втрат електроенергії. Розглянуто точність вимірювання інтегральних характеристик енергообміну в залежності від наявних рівнів спотворень сигналів напруги та струму. Показано, що з метою врахування впливу вищих гармонік напруги та струму на повну споживану потужність необхідно визначити зміну потужності Фризе Q_f , як показника оцінки додаткових втрат електроенергії при наявності несинусоїдальних струмів та напруги в перетинах ЛСЕ, зокрема, при різних співвідношеннях між значенням струму та напруги першої і вищих гармонік. Розглянута оцінка ефективності регулювання електроспоживання з використанням потужності Фризе Q_f на довільному інтервалі часу, а також відповідного розкладу струму на активну та реактивну складові. Проаналізовано особливості підвищення ефективності регулювання електроспоживання в ЛСЕ при циклічній зміні параметрів генератора та навантаження.

Ключові слова: локальна система електропостачання, додаткові втрати електроенергії, регулювання електроспоживання, вищі гармоніки струму та напруги, потужність Фризе, реактивний струм, циклічній зміні параметрів генератора та навантаження.

Вступ

Одним з основних інтегральних показників енергоефективності щодо використання енергії, яка надходить на підприємство, є графік електричного навантаження [1 – 4]. Нерівномірний добовий графік споживання електроенергії знижує енергоефективність виробництва, передачі та споживання електроенергії [5 – 9]. Додатковою проблемою постає зростання втрат електроенергії у мережах систем електропостачання, зокрема, й у локальних системах електропостачання (ЛСЕ), обумовлених нерівномірністю графіка навантаження. Це впливає на термін служби електричних мереж, особливо кабельних ліній. Регулювання електроспоживання істотно впливає не лише на процеси генерації електроенергії, а й на процеси її передачі.

За відсутності в електроенергетичній системі збалансованої структури генеруючих потужностей головною можливістю вирівнювання графіків може стати режимна взаємодія електроенергетичної системи зі споживачами на основі адміністративних або економічних заходів [10]. Слід врахувати, що графіки навантаження у більшості випадків являють собою нерівномірну лінію, що складається з багатьох відрізків, з піками в ранкові (8–11) та вечірні (18–22) години.

Нерівномірність графіка навантаження стає фактором зростання кінцевих цін і тарифів на електроенергію, оскільки:

– необхідно вишукувати інвестиції і кошти на утримання додаткової генеруючої потужності, а також потужності мереж і трансформаторних підстанцій, що у підсумку оплачує споживач;

– багато генераторів електроенергії змушені набирати і знижувати навантаження кілька разів

© С.П. Денисюк, Т.М. Базюк, 2020

протягом доби, що збільшує питомі витрати палива, знижує експлуатаційний ресурс і в результаті також впливає на зростання ціни;

– піки споживання, особливо вечірнього, у низьковольтних мережах призводять до зростання ризику аварій і відключень, погіршення показників якості електроенергії, зростання втрат електроенергії в лініях.

Вирівнювання графіка навантаження є важливим завданням щодо зниження середніх цін на електричну енергію та підвищення надійності енергопостачання. Застосовуються такі методи вирівнювання графіків навантаження:

- 1) створення оптимальної структури генеруючих потужностей електроенергетичної системи;
- 2) використання перетоків з сусідніми електроенергетичними системами;
- 3) залучення споживачів до вирівнювання графіків навантаження електроенергетичної системи за рахунок адміністративних (обмежуючих) і економічних (стимулюючих) заходів.

Поширення двоставкового тарифу, тарифу, диференційованого по зонах доби, і погодинних цін, як і деякі інші заходи, стимулюють споживача знижувати пікове споживання електроенергії або переносити його на інші години і дні тижня.

Режими характеризуються низкою показників, зокрема:

- коефіцієнтом навантаження (заповнення добового графіка), який визначається як відношення середньодобового навантаження до максимального (пікового);
- річним (добовим, місячним) числом годин використання максимуму навантаження (максимальної потужності) споживачем; розраховується як відношення величини електроспоживання за даний період до максимального навантаження за цей період;
- коефіцієнтом одночасності навантаження (або коефіцієнтом попиту), що дорівнює відношенню суміщеного максимального навантаження підприємства до суми навантажень його окремих електроприймачів.

1. Оцінка сумарних втрат енергії в електричних мережах

Розрахункову величину сумарних втрат енергії в електричних мережах споживачів, зокрема, доцільно визначати на основі отриманих залежностей коефіцієнта нагрівання від коефіцієнта форми графіка навантаження, що дозволяє проводити аналіз перевищення втрат на нагрівання провідників залежно від форми графіка навантаження [11]. При рівномірній передачі однакової кількості енергії по одній і тій самої лінії, при однаковій напрузі, але за різний час, має місце співвідношення $I_1 T_1 = I_2 T_2$ (I_1, I_2 – струми у провіднику за час T_1 та T_2 відповідно). Покладемо, що W_1 та W_2 – втрати енергії на нагрівання у провідниках у випадку передачі енергії за інтервал часу T_1 та T_2 відповідно; R – опір провідника. Тоді відношення втрат енергії на інтервалах часу T_1 та T_2 можемо представити співвідношенням

$$W_2 / W_1 = T_1 / T_2. \quad (1)$$

З виразу (1) видно, що у найпростішому випадку вирівнювання графіка навантаження споживана на нагрівання провідників потужність характеризується відношенням часу живлення навантаження. Для розрахунку скорочення втрат можна застосувати вираз, який для визначення як коефіцієнта нагрівання провідників $K_{\text{нп}}$. Коефіцієнт $K_{\text{нп}}$ для розглянутого випадку визначається співвідношенням

$$K_{\text{нп}} = 1 - (T_1 / T_2). \quad (2)$$

На практиці рівномірні графіки навантаження зустрічаються вкрай рідко. Зазвичай використовують графіки навантаження з інтервалом усереднення ($T_{\text{ср}}$ – час осереднення), що також вимагає визначення $K_{\text{нп}}$ як усередненого показника.

Важливе місце в розрахунках змінних втрат електроенергії відіграє правильний вибір співвідношення розрахункових значень реактивної та активної потужності в мережі [12]. Зокрема, для синусоїдальних ЛСЕ при оцінці рівня втрат електроенергії може бути запропонований показник коефіцієнт реактивної потужності $\text{tg}\varphi$. Якщо через елемент електричної мережі, що має активний опір R , передається потужність $S = P + jQ$ на напрузі U , то втрати активної потужності у цьому елементі визначаються за виразом

$$\Delta P = (P^2 + Q^2) \cdot R / U^2 = P^2 \cdot (1 + \text{tg}^2\varphi) \cdot R / U^2. \quad (3)$$

Згідно співвідношення (3) впливає, що при фіксованому значенні P зростання величини $\text{tg}\varphi$ зі значення $\text{tg}\varphi_1$ до значення $\text{tg}\varphi_2$ призведе до зростання втрат активної потужності в $(1 + \text{tg}^2\varphi_2) / (1 + \text{tg}^2\varphi_1)$ рази. Так, зростання значення коефіцієнта реактивної потужності з $\text{tg}\varphi_1 = 0,4$ до $\text{tg}\varphi_2 = 0,7$ призведе до зростання розрахункового значення втрат електроенергії в 1,28 рази.

При вирішенні завдання апроксимації графіків навантаження так само, як і при вирішенні будь-якої

задачі, пов'язаної з процесом апроксимації складної функціональної залежності, необхідно йти на компроміс між точністю і складністю моделі [13, 14]. Визначення коефіцієнтів апроксимації тісно пов'язане з необхідною точністю, яка, в свою чергу, визначається критеріями наближення. Зазвичай застосовують критерії рівномірного, середньоквадратичного чи інтерполяційного (точкового) наближень. Наприклад, якщо число заданих точок перевищує число визначених коефіцієнтів апроксимації, то з метою апроксимації графіків навантажень можна використовувати метод найменших квадратів, при якому середньоквадратична помилка мінімальна [13].

2. Оцінка характеру споживання електроенергії в ЛСЕ

Однією з мір оцінки характеру споживання електроенергії в ЛСЕ є відношення найменш можливого значення втрат потужності, яке пропорційне сумі квадратів діючих значень струмів $\Delta P_{min} \sim \Sigma I'^2 = 3I'^2$, які мають місце в електричній мережі в режимі оптимального споживання при чисто активному навантаженні $P = 3UI'$ до фактичного значення втрат потужності, яке пропорційне сумі квадратів діючих значень всіх струмів [8, 10]: $\Delta P \sim \Sigma I^2 = I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + nI_N^2$.

Ці струми у тій само системі викликають споживання тієї ж активної потужності P , яке супроводжується у загальному випадку передачею до споживача реактивної потужності Q , потужності пульсацій S_b , прихованої потужності S_o і потужності спотворення D [7, 9].

Поточне значення коефіцієнта потужності може бути розраховане як

$$\lambda = \sqrt{\frac{\Delta P_{min}}{\Delta P}} = \sqrt{\frac{\Sigma I'^2}{\Sigma I^2}}. \quad (4)$$

Вираз (4) для несиметричної, неурівноваженої та несинусоїдальної системи напруги може бути записаний у вигляді:

$$\lambda = \sqrt{\frac{3I'^2}{\Sigma I^2}} = \frac{P}{S_D} = \sqrt{\frac{3U^2 \cdot 3I'^2}{3U^2(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + nI_N^2)}}; \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{P}{S_a} \sqrt{\frac{1 - K_u^2}{1 + \varepsilon_b^2 + (3n + 1)\varepsilon_o^2}}, \text{ або } \lambda = \cos\varphi \sqrt{\frac{1 - K_u^2}{1 + \varepsilon_b^2 + (3n + 1)\varepsilon_o^2}}.$$

На підставі співвідношення (5) можемо зробити висновок щодо результуючого впливу спотворення системи струмів, викликаного несиметрією споживання ε_b , його неурівноваженістю ε_o та наявністю вищих гармонік в системі струмів K_u . Таке визначення дійсного коефіцієнта потужності λ досить зручне, оскільки в співвідношення (5) включено всі неактивні складові повної потужності.

У випадку симетричної, урівноваженої та синусоїдальної системи напруг коефіцієнт λ у формулі (5) відповідає фазовому зсуву між основною гармонікою напруги і еквівалентною основною гармонікою струму, тобто фазовому зсуву

$$\frac{P}{S_a} = \cos\varphi_1 = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos\varphi.$$

3. Аналіз структури додаткових втрат електроенергії в ЛСЕ

Аналіз структури додаткових втрат електроенергії в ЛСЕ при наявності вищих гармонік струму передбачає наступне [9, 15].

Для заданих P та U мінімальному значенню діючого струму генератора відповідає миттєвий струм $i_A(t) = Pu(t)/U^2$, де $i_A(t)$ – активна складова струму $i(t)$. Для квадрата діючого значення струму I^2 справедливим є співвідношення

$$I^2 = \frac{\int_0^T i^2(t) dt}{T} = \frac{\int_0^T [i_A(t) + i_P(t)]^2 dt}{T} = I_A^2 + I_P^2. \quad (6)$$

Оскільки $I_A = P/U$, має місце вираз $Q_\Phi = UI_P$, де I_A та I_P – діючі значення активної та реактивної складової струму $i(t)$.

Причини появи додаткових втрат електроенергії в ЛСЕ чи конкретному її елементі можна систематизувати за напрямками:

- спотворення якості електроенергії, що генерується генераторами;
- впливу режимів роботи інших систем чи елементів (наявність електромагнітних завад, порушення електромагнітної сумісності);
- зміни технологічних процесів (зміни режимів чи параметрів технологічних процесів, зокрема, зміни структури та параметрів навантажень).

Надалі представимо миттєвий струм $i(t)$ сумою активної (індекс «А») та реактивної (індекс «Р») складових: $i(t) = i_A(t) + i_P(t)$; $i_A(t) = i_{A,1}(t) + i_{A,\infty}(t)$; $i_P(t) = i_{P,1}(t) + i_{P,\infty}(t)$ (де індекс «1» – визначає першу гармоніку; ∞) – вищі гармоніки).

При виділенні активної потужності за першою гармонікою P_1 із повної потужності S маємо рівність:

$$S^2 = P_1^2 + Q_{\Delta}^2. \quad (7)$$

З урахуванням співвідношення $P^2 = P_1^2 + 2P_1P_{\infty} + P_{\infty}^2$ вираз (7) приведемо до вигляду

$$S^2 = P_1^2 + 2P_1P_{\infty} + P_{\infty}^2 + Q_{\Phi}^2. \quad (8)$$

Величина Q_{Δ}^2 згідно (7), (8) набуває вигляду

$$Q_{\Delta}^2 = Q_{\Phi}^2 + 2P_1P_{\infty} + P_{\infty}^2 = Q_{\Phi}^2 + Q_{\Delta\Phi}^2,$$

де $Q_{\Delta\Phi}^2 = 2P_1P_{\infty} + P_{\infty}^2$. Звідки можемо записати:

$$S^2 = P_1^2 + Q_{\Phi}^2 + Q_{\Delta\Phi}^2. \quad (9)$$

Введемо величину ΔP_{∞} – показник рівня спотворення активної потужності по першій гармоніці за рахунок споживання активної потужності на вищих гармоніках $\Delta P_{\infty} = P_{\infty}/P_1$. Тоді співвідношення для $Q_{\Delta\Phi}/P_1$ має вигляд $(Q_{\Delta\Phi}/P_1)^2 = \Delta P_{\infty}(2 + \Delta P_{\infty})$, а при виконанні нерівності $2P_1P_{\infty} \gg P_{\infty}^2$ для величини $Q_{\Delta\Phi}$ можемо записати наближену рівність $Q_{\Delta\Phi}^2 \cong 2P_1P_{\infty}$.

Аналіз співвідношення (9) показує, що складова $Q_{\Delta\Phi}$ відображає додаткові втрати енергії, зумовлені споживанням активної енергії на виділених вищих гармоніках, однак її величина залежить від рівня споживання активної потужності на першій гармоніці.

Щодо адекватної точності вимірювання інтегральних характеристик енергообміну з урахуванням спотворень сигналів. Співвідношення між напругами $u_1(t)$, $u_{\infty}(t)$, і струмами $i_{A,1}(t)$, $i_{A,\infty}(t)$, $i_{P,1}(t)$ та $i_{P,\infty}(t)$ визначають особливості оцінки точності вимірювання складових електроенергії в ЛСЕ.

Для представлення інтегральних характеристик і показників оцінки взаємного впливу елементів систем розглянемо узагальнений розклад миттєвих функцій $i(t)$, $u(t)$, $p(t)$ на складові. Для цього спочатку здійснимо формальну процедуру розкладення функції $i(t)$ в системі ортогональних функцій $\{\varphi_i(t), i = 1, \dots, n_{\Phi}\}$ [9, 15, 16].

Оскільки при використанні функцій $i(t)$, $u(t)$ в перетині кола електромагнітні процеси розглядаються у двовимірній площині, виберемо ортогональну систему у вигляді $\{\varphi_i(t), i = 1, \dots, n_{\Phi}\}$ при $n_{\Phi} = 2$; $\varphi_1(t) \equiv u(t)$; $\varphi_2(t) \equiv u_{\perp}(t)$, де

$$\int_0^T u(t) u_{\perp}(t) dt = 0. \quad (10)$$

По відношенню до ортогональної системи $\{u(t), u_{\perp}(t)\}$ струм $i(t)$ розкладемо на дві ортогональні складові $i_{\parallel}(t)$ та $i_{\perp}(t)$ ($i(t) = i_{\parallel}(t) + i_{\perp}(t)$), які за визначенням дорівнюють відповідно активній та реактивній складовим струму:

$$i_{\parallel}(t) \equiv i_A(t); i_{\perp}(t) \equiv i_P(t); i(t) = i_A(t) + i_P(t). \quad (11)$$

Враховавши, що $i_{\perp}(t) = i(t) - i_A(t)$; $i_A(t) = u(t)/R_{\parallel}$, де $R_{\parallel} = U^2/P$, згідно з (10) та (11) запишемо

$$u_{\perp}(t) = R_{\perp} i_P(t) = R_{\perp} (i(t) - Pu(t)/U^2). \quad (12)$$

Оскільки потужність Фризе Q_{Φ} розглядається як квадратична нев'язка між величинами S та P , то величину R_{\perp} із (12) задамо співвідношенням $R_{\perp} = U^2/Q_{\Phi}$. Величина R_{\perp} має розмірність опору та як і опір R_{\parallel} ,

відображає властивості частини ЛСЕ відносно виділеного перетину і характеризує відхилення існуючих процесів від оптимальних з точки зору виконання критерію мінімуму втрат електроенергії. Мають місце співвідношення

$$R_{\perp} = R_{\parallel}P/Q_{\Phi}; R_{\perp}/R_{\parallel} = P/Q_{\Phi}; S = U^2(R_{\perp}^2 + R_{\parallel}^2)^{1/2}/R_{\perp}R_{\parallel}; \quad (13)$$

$$R_{\text{ЕКВ}} = U/I = R_{\perp}R_{\parallel} / (R_{\perp}^2 + R_{\parallel}^2)^{1/2}.$$

Величину $R_{\perp}/R_{\parallel} = P/Q_{\Phi}$ згідно (13) можна розглядати як показник відносного рівня спотворень сигналів при розгляді критерію мінімуму втрат електроенергії. Якщо ввести провідності $G_{\parallel} = 1/R_{\parallel}$, $G_{\perp} = 1/R_{\perp}$, то співвідношення (13) можна записати таким чином:

$$G_{\perp} = G_{\parallel}Q_{\Phi} / P; G_{\perp} / G_{\parallel} = Q_{\Phi} / P; S = U^2 (G_{\perp}^2 + G_{\parallel}^2)^{1/2}; R_{\text{ЕКВ}} = 1/(G_{\perp}^2 + G_{\parallel}^2)^{1/2}.$$

Часто оцінка рівнів спотворення енергетичних процесів у ЛСЕ розглядається для ustalених режимів відносно критерію мінімуму втрат [7, 9, 16]. Цей критерій відображає забезпечення точної пропорційності напруги та струму

$$u(t)/i(t) = U^2 / P = R_{\parallel} = \text{const}, \quad (14)$$

що відповідає співпаданню форм $u(t)$ та $i(t)$ і призводить до мінімуму втрат електроенергії при її передачі від генератора до навантаження. Для критерію (14) виконуються рівності $P = S$, де S – повна потужність, та $Q_{\Phi} = 0$. Наведений вираз (14) має місце в ситемах, коли діючі значення струму мінімальні ($I = I_{\text{min}}$). Безпосередньо кількісну оцінку рівнів спотворення енергетичних процесів у перетині ЛСЕ доцільно здійснювати згідно з наступними показниками:

$$\Delta_{\text{В1}} = \int_0^T (u(t)/i(t) - R_{\parallel})dt / (TR_{\parallel}). \quad (15)$$

Показник $\Delta_{\text{В1}}$ відображає рівень наближення до виконання критерію мінімуму втрат. Міру оцінки рівнів спотворення енергетичних процесів на основі показника $\Delta_{\text{В1}}$ можна задати ступенем їх наближення до нуля. При цьому співвідношення між “спотворюючим” та “оптимальним” сигналом на елементі охарактеризуємо наступними коефіцієнтами:

$$\begin{aligned} K_{E1} &= R_{\parallel} / R_{\perp} = Q_{\Phi}/P; K_{E2}(t) = \bar{i}_p(t) / i_A(t); \\ K_{E2,\Sigma} &= \int_0^T K_{E2}(t) dt; \\ K_{E3}(t) &= |\bar{i}_p(t)| / |i_A(t)|; \\ K_{E3,\Sigma} &= \int_0^T K_{E3}(t) dt; K_{E4} = I_P / I_A, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{де } I_P = \left(\int_0^T \bar{i}_p^2(t) dt / T \right)^{1/2}; I_A = \left(\int_0^T i_A^2(t) dt / T \right)^{1/2}.$$

Наведені в (15) – (16) показники для критерію мінімуму втрат дозволяють оцінити рівні спотворення енергетичних процесів як при виділенні обмінних процесів, так і при аналізі додаткових втрат електроенергії.

Співвідношення між $u_1(t)$, $u_{\infty}(t)$ ($u(t) = u_1(t) + u_{\infty}(t)$), $i_{A,1}(t)$, $i_{A,\infty}(t)$, $\bar{i}_{p,1}(t)$ та $\bar{i}_{p,\infty}(t)$ визначають особливості оцінки точності вимірювання складових електроенергії в ЛСЕ [17, 18]. Так, у випадку вимірювання активної потужності за наявності вищих гармонічних складових $u(t)$ та $i(t)$ проблема оцінки рівнів споживання активної потужності P на першій (P_1) та вищих гармоніках (P_{∞}) не призводить до труднощів. Потрібно лише правильно визначити гармонічний спектр сигналів $u(t)$ та $i(t)$ і здійснити звичайне додавання величин споживання активної потужності P_i на i -й гармоніці, $i = 1, 2, \dots, n$, де n – кількість гармонік. При оцінці додаткових втрат електроенергії $W_{\text{дод}}$, обумовлених споживанням реактивної потужності (фактично реактивного струму $\bar{i}_p(t)$) в системах з несинусоїдальними $u(t)$ та $i(t)$, потрібно у процесі вимірювання використати такі визначення реактивної потужності, які б адекватно (з допустимою похибкою) дали оцінку реактивного струму $\bar{i}_p(t)$ [8, 9].

Сумарна реактивна потужність мережі ЛСЕ відрізняється від звичайної суми реактивних потужностей всіх гармонік, які, при незначній модифікації, можна визначити за допомогою звичайних лічильників

реактивної потужності [18]. Відомі визначення реактивної потужності представимо через виділення діючих значень реактивного струму: I_p – сумарного; $I_{p,i}$ – реактивного струму i -ї, $i = 1, \dots, n$, гармонік.

Коротко розглянемо адекватність точності вимірювання інтегральних характеристик енергообміну до рівнів спотворень сигналів напруги та струму. Співвідношення між напругами $u_1(t)$, $u_\infty(t)$, і струмами $i_{A,1}(t)$, $i_{A,\infty}(t)$, $i_{p,1}(t)$ та $i_{p,\infty}(t)$ визначають особливості оцінки точності вимірювання складових електроенергії в ЛСЕ. Адекватність оцінки неоптимальності при вимірюванні можемо характеризувати величиною відповідної складової реактивного струму. При цьому реактивній вимірюваній потужності Q поставимо у відповідність еквівалентний реактивний струм $i_{p,j}(t)$, де $Q_j = UI_{p,j}$ [15]. Здійснивши квадратичну декомпозицію потужності Q_Φ на складові Q_j та Q_D ($Q_\Phi^2 = Q_j^2 + Q_D^2$), для діючих значень струму запишемо співвідношення $I_D^2 = I_p^2 - I_{p,i}^2$, де величину I_D визначимо як показник адекватності визначення рівня неоптимальності процесів. Аналогічним чином як такий показник можна розглядати й величину

$$\Delta_Q = (Q_\Phi^2 - Q_j^2) / Q_\Phi^2. \quad (17)$$

Співвідношення (17) представляє рівень відображення додаткових втрат електроенергії у випадку використання при вимірюванні окремих визначень реактивних потужностей (зокрема, Q_j) по відношенню до реального рівня додаткових втрат електроенергії, визначених згідно з потужністю Фризе Q_Φ . Отже, мають місце такі рівності [18]:

$$Q_\Phi^2 = Q_1^2 + D_1^2; \quad Q_\Phi^2 = Q_B^2 + D_B^2; \quad (18)$$

$$Q_\Phi^2 = Q_D^2 + D_D^2; \quad Q_\Phi^2 = Q_I^2 + D_I^2,$$

де D_1, D_B, D_D, D_I – один із різновидів потужності спотворення [9, 18].

Розглянемо наведені реактивні потужності (18) як еквівалентні величини додаткових втрат $W_{\text{Дод}}$ електроенергії, зважаючи, що наприклад: $W_{\text{Дод},Q_\Phi} = I_p^2 R_{\text{ЕКВ}} T = (Q_\Phi/U)^2 R_{\text{ЕКВ}} T$ – додаткові втрати при протіканні струму I_p через еквівалентний опір (наприклад, лінії електропередачі) $R_{\text{ЕКВ}}$ за час T . Для цього кожній з реактивних потужностей $Q_B, Q_D, Q_I, Q_{\text{ЕКВ}}$ поставимо у відповідність еквівалентний струм $I_{p,B}, I_{p,D}, I_{p,I}, I_{p,\text{ЕКВ}}$:

$$I_{p,1} = Q_1/U; \quad I_{p,B} = Q_B/U; \quad I_{p,D} = Q_D/U; \quad (19)$$

$$I_{p,I} = Q_I/U; \quad I_{p,\text{ЕКВ}} = Q_{\text{ЕКВ}}/U.$$

Для оцінки процесів на основі співвідношень (19) можна побудувати квадратичні співвідношення:

$$\Delta_1 = (Q_1/Q_\Phi)^2; \quad \Delta_B = (Q_B/Q_\Phi)^2; \quad (20)$$

$$\Delta_D = (Q_D/Q_\Phi)^2; \quad \Delta_I = (Q_I/Q_\Phi)^2; \quad \Delta_{\text{ЕКВ}} = (Q_{\text{ЕКВ}}/Q_\Phi)^2.$$

Характеристики згідно (20) показують рівень відображення додаткових втрат електроенергії у випадку використання при вимірюванні окремих, наведених вище, визначень реактивних потужностей по відношенню до реального рівня додаткових втрат електроенергії, який визначається при вимірюванні потужності Фризе Q_Φ [9, 18].

Аналіз співвідношень (19), (20) дає змогу зробити висновки, що можна виділити окремі області (три та більше), де мають використовуватися різні поправочні коефіцієнти для уточнення додаткових втрат електроенергії в ЛСЕ. При цьому оцінку втрат доцільно здійснювати на основі окремих визначень реактивних потужностей, що є складовими потужності Фризе. З іншого боку, величини $Q_\Phi, Q_B, Q_D, Q_I, Q_{\text{ЕКВ}}$ можна пронормувати за величиною Q_1 , що дасть можливість оцінити рівень впливу спотворюючих факторів по відношенню до синусоїдального режиму.

Можемо виділити основні складові процедури вирівнювання графіків навантаження.

Крок 1. Проведення аналізу системи з перетворювачами електроенергії, дослідження параметрів роботи системи та визначення проблемних моментів у роботі системи.

Крок 2. Аналіз перетворюючих пристроїв та їх роботи у системі, параметрів перетворення та дослідження графіків навантаження системи.

Крок 3. Аналіз способів регулювання навантаження та вирівнювання графіків навантаження. До цього кроку також входить обчислення та підбір оптимальних елементів для акумулюючої установки, яка буде вирівнювати графіки навантаження.

Крок 5. Оцінка економічної вигоди від вирівнювання графіків навантаження. Використання тарифів

на електроенергію, диференційованих за періодами часу, є досить значущим фактором, який спонукає кінцевого споживача до вирівнювання навантаження.

4. Вплив вищих гармонік на споживану потужність

З метою врахування впливу вищих гармонік на повну споживану потужність необхідно визначити особливості зміни Q_{Φ} , як показника додаткових втрат електроенергії при несинусоїдальних струмах та напругах, при різних співвідношеннях між значенням струму та напруги першої і вищих гармонік.

Струм та напруга із врахуванням вищих гармонік описуються такими формулами:

$$\begin{aligned} U^2 &= U_1^2 + U_{\infty}^2, \\ I^2 &= I_1^2 + I_{\infty}^2, \end{aligned} \quad (21)$$

де U_1 – напруга першої гармоніки; U_{∞} – напруга вищих гармонік; I_1 – струм першої гармоніки; I_{∞} – струм вищих гармонік.

Підставивши наведені вище формули в (21) для визначення струму та напруги, отримаємо:

$$S^2 = (U_1^2 + U_{\infty}^2) \cdot (I_1^2 + I_{\infty}^2) = (U_1^2 \cdot I_1^2 + U_1^2 \cdot I_{\infty}^2 + U_{\infty}^2 \cdot I_1^2 + U_{\infty}^2 \cdot I_{\infty}^2). \quad (22)$$

Реактивна потужність за Фризе визначається за формулою:

$$Q_{\Phi}^2 = S^2 - P^2. \quad (23)$$

Активну потужність можна представити у вигляді $P = P_1 + P_{\infty}$. Підставивши цю формулу та формулу (22) в (23) отримаємо:

$$\begin{aligned} Q_{\Phi}^2 &= S^2 - P^2 = S^2 - (P_1 + P_{\infty})^2 = S^2 - P_1^2 - 2P_1P_{\infty} - P_{\infty}^2; \\ Q_{\Phi}^2 &= (U_1^2 \cdot I_1^2 + U_1^2 \cdot I_{\infty}^2 + U_{\infty}^2 \cdot I_1^2 + U_{\infty}^2 \cdot I_{\infty}^2) - P_1^2 - 2P_1P_{\infty} - P_{\infty}^2. \end{aligned}$$

Розкривши дужки і розділивши праву та ліву частини рівняння (23) на $U_1^2 \cdot I_1^2$ та, провівши спрощення, отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{Q_{\Phi}^2}{U_1^2 \cdot I_1^2} &= \frac{(U_1^2 \cdot I_1^2 + U_1^2 \cdot I_{\infty}^2 + U_{\infty}^2 \cdot I_1^2 + U_{\infty}^2 \cdot I_{\infty}^2) - P_1^2 - 2P_1P_{\infty} - P_{\infty}^2}{U_1^2 \cdot I_1^2}; \\ \frac{Q_{\Phi}^2}{U_1^2 \cdot I_1^2} &= 1 + \frac{I_{\infty}^2}{I_1^2} + \frac{U_{\infty}^2}{U_1^2} + \frac{U_{\infty}^2 \cdot I_{\infty}^2}{U_1^2 \cdot I_1^2} - \frac{P_1^2}{U_1^2 \cdot I_1^2} - \frac{2P_1P_{\infty}}{U_1^2 \cdot I_1^2} - \frac{P_{\infty}^2}{U_1^2 \cdot I_1^2}. \end{aligned} \quad (24)$$

де $\frac{P_1^2}{U_1^2 \cdot I_1^2} \approx 1$; $\frac{P_{\infty}^2}{U_1^2 \cdot I_1^2} \approx 0$; $\delta_p = \frac{P_{\infty}}{U_1 \cdot I_1}$; $\frac{I_{\infty}^2}{I_1^2} = K_{\Pi i}$ – коефіцієнт пульсації струму; $\frac{U_{\infty}^2}{U_1^2} = K_{\Pi u}$ – коефіцієнт пульсації напруги.

Формулу (37) можна записати в такому вигляді:

$$\begin{aligned} Q_{\Phi} &= \sqrt{S_1^2 \cdot (K_{\Pi i}^2 + K_{\Pi u}^2 - 2 \cdot K_{\Pi u} \cdot K_{\Pi i})} = \\ &= U_1^2 \cdot I_1^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{I_{\infty}^2}{I_1^2} + \frac{U_{\infty}^2}{U_1^2} - \frac{2P_{\infty}}{U_1 \cdot I_1}\right)}, \end{aligned} \quad (25)$$

де $\delta_p = K_{\Pi u} \cdot K_{\Pi i} = \frac{P_{\infty}}{U_1 \cdot I_1}$,

Для більш наглядного аналізу залежності (38) розглянемо приклад системи, в якій присутні тільки перша та третя гармоніки. Тоді залежність (38) можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} P_{\infty} &= P_3 = U_3 \cdot I_3 \cdot \cos \varphi, \text{ де } \cos \varphi \in [1; 0]; \\ Q_{\Phi} &= U_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{I_3^2}{I_1^2} + \frac{U_3^2}{U_1^2} - \frac{2U_3 \cdot I_3 \cdot \cos \varphi}{U_1 \cdot I_1}\right)}. \end{aligned}$$

Із рис. 1 – 4 видно, що існує таке співвідношення коефіцієнтів пульсації струму та напруги, при якому наближене значення реактивної потужності Фризе Q_{Φ} набуває нульового значення при відповідних значеннях кута φ .

Також для довільного значення коефіцієнта пульсації за струмом можна визначити значення коефіцієнта пульсації за напругою, і навпаки, при якому зміна значення Q_{Φ} відносно кута φ буде залишатися мінімальною, або не змінюватиметься взагалі у випадку, коли один із коефіцієнтів пульсації (за напругою чи струмом) дорівнюватиме нулю.

Отримані залежності на рис. 1 – 4 вказують на те, що існує таке співвідношення коефіцієнтів пульсації струму та напруги, при яких значення Q_{Φ} може набувати значення 0 або ж знаходитися в межах допустимих значень при більш широкому діапазоні співвідношення коефіцієнтів пульсації.

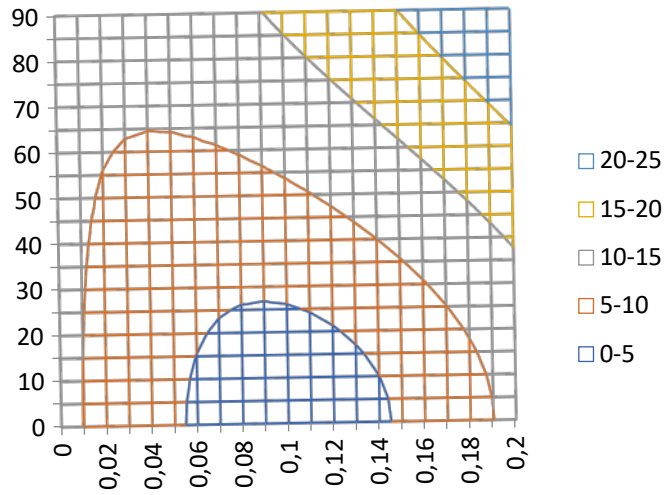


Рисунок 1 – Залежність $Q_{\phi}(\phi)$ при зміні $K_{\Pi i}$ від 0 до 20%, де $\phi \in [0; 90]$ $K_{\Pi i} = 0,1$

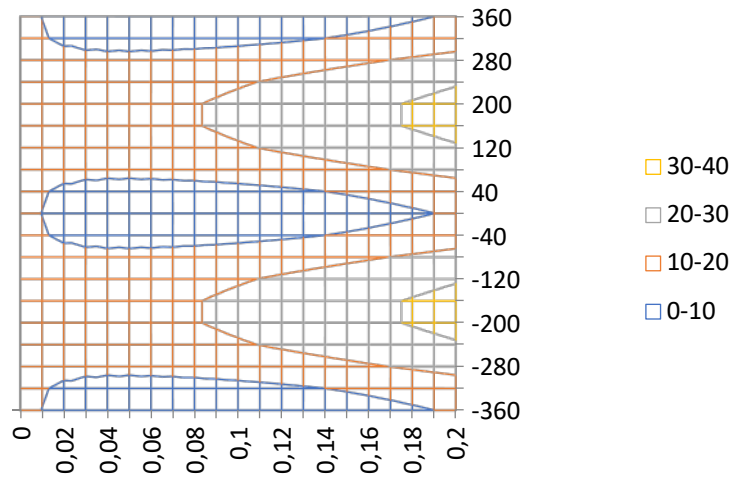


Рисунок 2 – Залежність $Q_{\phi}(\phi)$ при зміні $K_{\Pi i}$ від 0 до 20%, де $\phi \in [-360; 360]$ $K_{\Pi i} = 0,1$

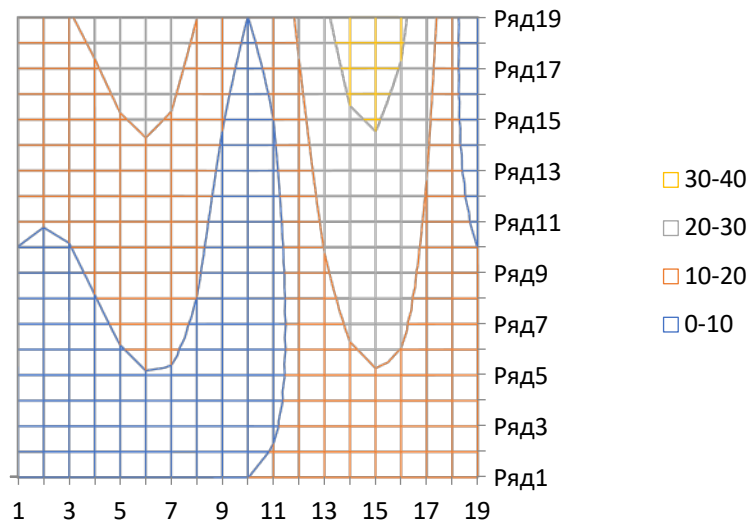


Рисунок 3 – Залежність $Q_{\phi}(\phi)$ при зміні $K_{\Pi i}$ від 0 до 20%, де $\phi \in [0; 90]$ $K_{\Pi i} = 0,1$

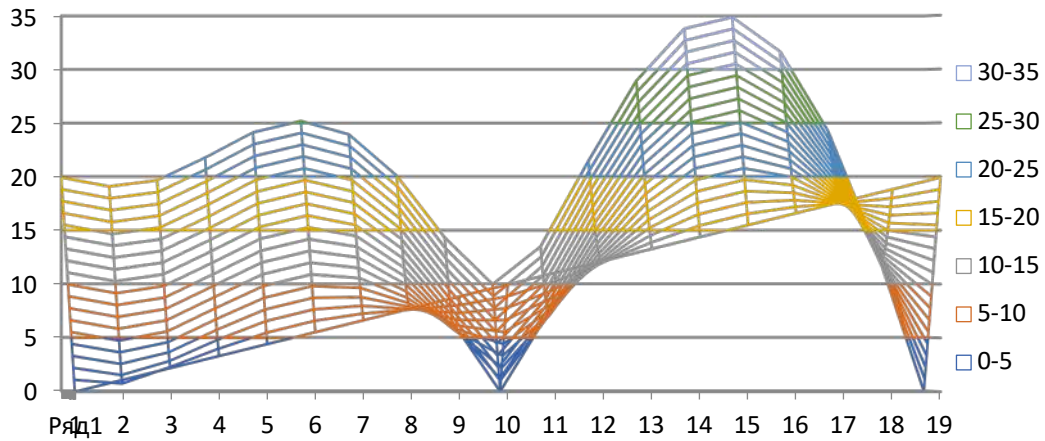


Рисунок 4 – Залежність $Q_{\phi}(\phi)$ при зміні $K_{\text{Пн}}$ та $K_{\text{Пі}}$ від 0 до 20%, де $\phi \in [-360;360]$

Регулювання коефіцієнтів пульсації струму та напруги з метою дотримання значення Q_{ϕ} на допустимому рівні може бути використане для мінімізації втрат електроенергії, оптимізації роботи та регулювання режимів роботи ЛСЕ.

5. Оцінка ефективності регулювання електроспоживання в ЛСЕ

Важливим завданням регулювання споживання електроенергії в ЛСЕ є усунення реактивних режимів роботи електричних систем [10]. Струм навантаження для довільного інтервалу часу $[0.. \tau]$ можна представити як суму активного $i_{\text{А}\tau}(t)$ та реактивного $i_{\text{р}\tau}(t)$ струму, де:

$$i_{\text{А}\tau}(t) = \left(\int_0^{\tau} u(t)i(t)dt \right) u(t) / \int_0^{\tau} u^2(t)dt; \quad (26)$$

$$i_{\text{р}\tau}(t) = i_{\tau}(t) - \left(\int_0^{\tau} u(t)i(t)dt \right) u(t) / \int_0^{\tau} u^2(t)dt. \quad (27)$$

Міру відхилення величини струму $\int_0^{\tau} i^2(t)dt$ від його мінімально можливого значення $\int_0^{\tau} i_{\text{А}\tau}^2(t)dt$ згідно (26), (27) для заданої величин активної енергії, яка передається в навантаження на інтервалі часу $[0.. \tau]$, характеризується реактивною потужністю $Q_{\phi\tau}$ [15, 16].

Величина $Q_{\phi\tau}$ може також розглядатися як критерій оцінки ефективності регулювання споживання електроенергії в ЛСЕ.

Компенсація реактивної потужності $Q_{\phi\tau}$ призводить та зменшення витрат електроенергії, а також її покращення:

$$P = (1/\tau) \int_0^{\tau} u(t)i(t)dt; \quad (28)$$

$$S = (1/\tau^2) \int_0^{\tau} u^2(t)dt \int_0^{\tau} i^2(t)dt; \quad (29)$$

$$Q_{\phi\tau} = \sqrt{\left((1/\tau^2) \int_0^{\tau} u^2(t)dt \int_0^{\tau} i^2(t)dt - \left((1/\tau) \int_0^{\tau} u(t)i(t)dt \right)^2 \right)} = \sqrt{(1/\tau^2) \int_0^{\tau} u^2(t)dt \int_0^{\tau} i_{\text{р}\tau}^2(t)dt}. \quad (30)$$

Розклад активної та реактивної складових струму на інтервалі τ дає змогу визначити параметри пристрою, компенсуючого реактивну потужність:

$$i_{\text{к}\tau}(t) = -i_{\text{р}\tau}(t); \quad (31)$$

$$p_{\text{к}\tau}(t) = u(t) \cdot i_{\text{к}\tau}(t). \quad (32)$$

Регулювання відбувається таким чином, що на інтервалах часу, коли струм навантаження $i_{\tau}(t) < i_{\text{А}\tau}(t)$ ($i_{\text{р}\tau}(t) < 0$), компенсатор реактивної енергії накопичує енергію та передає її в навантаження на інтервалах часу, коли виконується наступна умова: $i_{\tau}(t) > i_{\text{А}\tau}(t)$ ($i_{\text{р}\tau}(t) > 0$).

Згідно співвідношень (26) – (32) проаналізуємо ЛСЕ з навантаженнями, що змінюється в часі за деяким законом

Як приклад, для системи з напругою та навантаженням, зображеними на рис. 5 та 9, розрахуємо

активний $i_{Ar}(t)$ та реактивний $i_{Pr}(t)$ струми на інтервалі $[0..4T]$, використовуючи формули (26), (27) та (31). Для цього окремо розрахуємо активний $i_{Ar}(t)$ та реактивний $i_{Pr}(t)$ струми на інтервалах $[0 \dots T]$, $[T \dots 3T]$ та $[3T \dots 4T]$:

Для системи з навантаженнями $R(t)$, зображеними на рис. 6, та кривою напруги, наведеною на рис. 5, розрахуємо активний $i_{Ar}(t)$ та реактивний $i_{Pr}(t)$ струми на інтервалі $[0 \dots 4T]$, що матиме вигляд:

$$i_{Ar}(t) = \left(\int_0^{4T} (U_M \cdot \sin(\omega \cdot t)) \left(U_M \cdot \frac{\sin(\omega \cdot t)}{R(t)} dt \right) \frac{(U_M \cdot \sin(\omega \cdot t))}{\int_0^{4T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt} \right); \quad (33)$$

$$i_{Pr}(t) = i(t) - \left(\int_0^{4T} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R(t)} dt \right) \frac{(U_M \cdot \sin(\omega \cdot t))}{\int_0^{4T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt} =$$

$$= \frac{U_M \cdot \sin(\omega \cdot t)}{R(t)} = - \left[\int_0^T \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R1} dt + \int_T^{3T} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R2} dt + \int_{3T}^{4T} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R3} dt \right] \times$$

$$\times U_M \cdot \sin(\omega \cdot t) / \left[\int_0^T U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt + \int_T^{3T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt + \int_{3T}^{4T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt \right]. \quad (34)$$

Оскільки, $i_{K\tau}(t) = -i_{Pr}(t)$, струм компенсації буде дорівнювати

$$i_{K\tau}(t) = - \left[i(t) - \left(\int_0^{4T} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R(t)} dt \right) \frac{(U_M \cdot \sin(\omega \cdot t))}{\int_0^{4T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt} \right] \quad (35)$$

Нехай зміна величин $R_1(t)$, $R_2(t)$ та $R_3(t)$ на інтервалах інтервалах $[0 \dots T]$, $[T \dots 3T]$ та $[3T \dots 4T]$ відбувається згідно залежностей, наведених на рис. 6. Підставивши у формули (33) – (35) значення опорів $R_1(t)$, $R_2(t)$ та $R_3(t)$, зображених на рис. 6, частоту $f = 50$ Гц та амплітудне значення напруги U_M , визначимо та побудуємо графіки миттєвих струмів (рис. 7).

Знаючи значення активного, реактивного та компенсуючого струмів, можна знайти та побудувати графіки миттєвих потужностей (рис. 8).

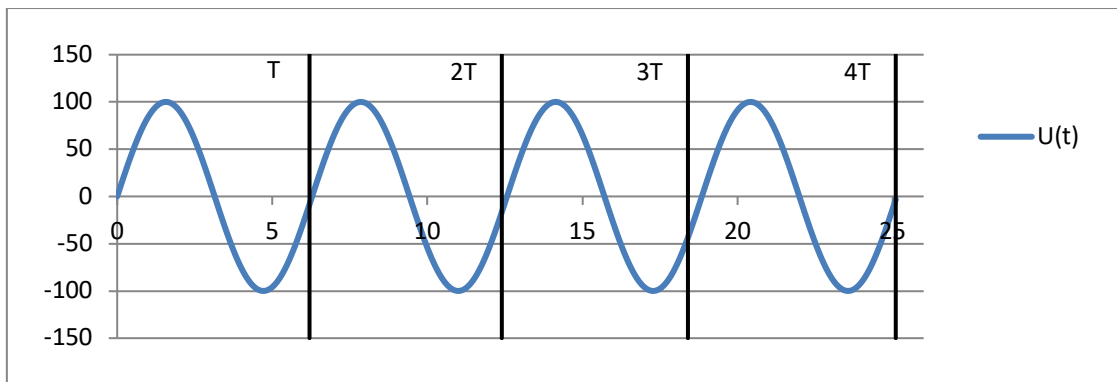


Рисунок 5 – Крива напруги

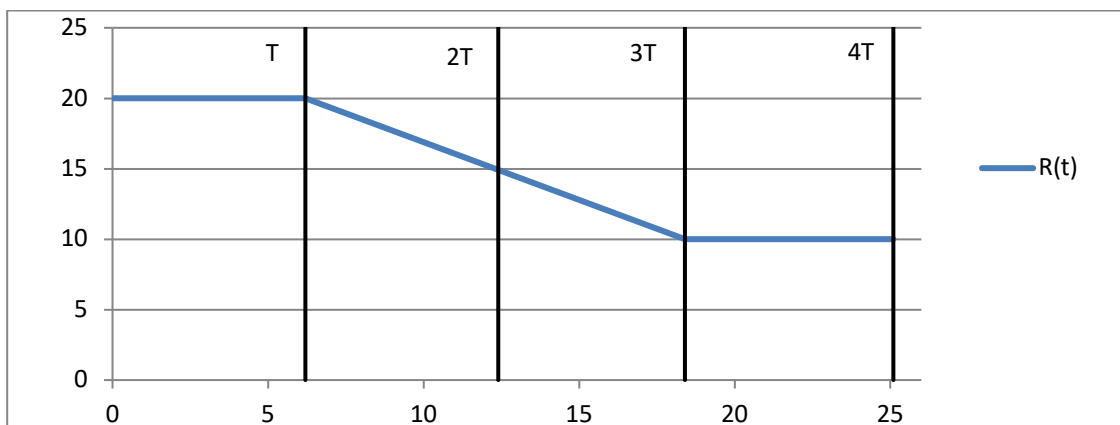


Рисунок 6 – Форми навантажень на періоді $[0 \dots 4T]$

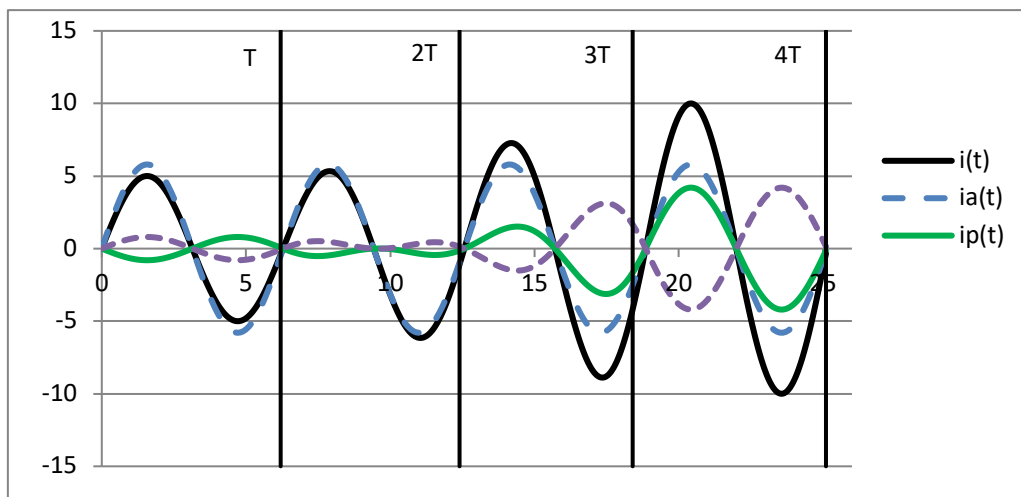


Рисунок 7 – Графіки струмів при навантаженні $R(t)$

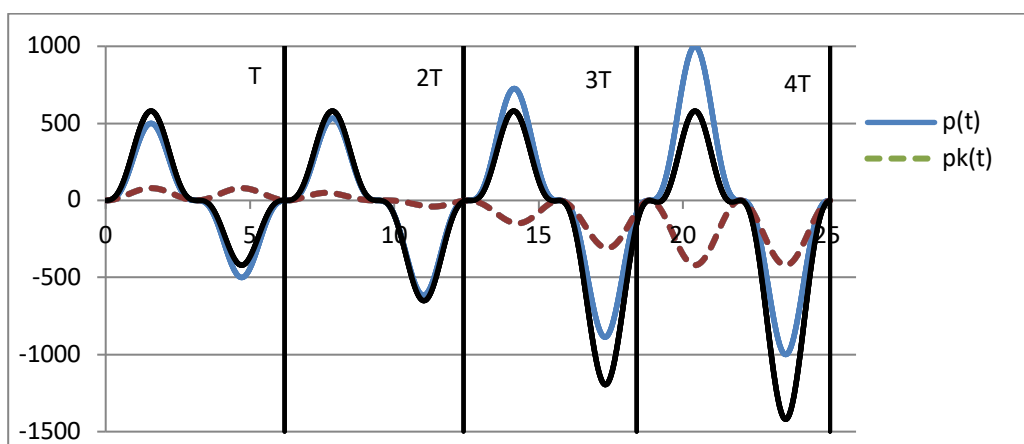


Рисунок 8 – Графіки миттєвих потужностей при навантаженні $R(t)$

Визначені для різних навантажень параметри пристрою, компенсуючого реактивну потужність, дають змогу в загальному вигляді оцінити наведений спосіб регулювання (компенсації) реактивної потужності, створеної за рахунок роботи перетворювальних пристроїв, та отримати відомості про саму роботу пристрою на заданому проміжку часу.

Для системи з напругою та навантаженням, показаним на рис. 5 та 9, розрахуємо активний $i_{Ar}(t)$ та реактивний $i_{pr}(t)$ струми на інтервалі $[0..4T]$, використовуючи формули (26), (27) та (31). Для цього окремо розрахуємо активний $i_{Ar}(t)$ та реактивний $i_{pr}(t)$ струми на інтервалах $[0..2T]$ та $[2T..4T]$:

$$i_{Ar}(t) = \left(\int_0^{2T} (U_M \cdot \sin(\omega \cdot t)) \left(U_M \cdot \frac{\sin(\omega \cdot t)}{R(t)} \right) dt \right) \frac{(U_M \cdot \sin(\omega \cdot t))}{\int_0^{2T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt} =$$

$$= \left[\int_0^T \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R1} dt + \int_T^{2T} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R2} dt \right] \times$$

$$\times U_M \cdot \sin(\omega \cdot t) / \left[\int_0^T U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt + \int_T^{2T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt \right]; \quad (36)$$

$$i_{pr}(t) = i_r(t) - \left(\int_0^{2T} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R(t)} dt \right) \frac{(U_M \cdot \sin(\omega \cdot t))}{\int_0^{2T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt} =$$

$$= \frac{U_M \cdot \sin(\omega \cdot t)}{R(t)} - \left[\int_0^T \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R1} dt + \int_T^{2T+t1} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R2} dt \right] \times$$

$$\times U_M \cdot \sin(\omega \cdot t) / \left[\int_0^T U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt + \int_T^{2T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt \right]. \quad (37)$$

Оскільки, $i_{kr}(t) = -i_{pr}(t)$, то струм компенсації

$$i_{k\tau}(t) = - \left[i_{\tau}(t) - \left(\int_0^{2T} \frac{U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)}{R(t)} dt \right) \frac{(U_M \cdot \sin(\omega \cdot t))}{\int_0^{2T} U_M^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) dt} \right]. \quad (38)$$

Підставивши у формули (36) – (38) значення опорів $R_1(t)$ та $R_2(t)$, наведених на рис. 10, частоту $f = 50$ Гц та амплітудне значення напруги U_M визначимо та побудуємо графіки струмів (рис. 11). Аналогічно розраховуються струми компенсації при інших значеннях напруги U_M та навантаження. Знаючи величину активного, реактивного та компенсуючого струмів, можна знайти та побудувати графіки миттєвих потужностей (рис. 12).

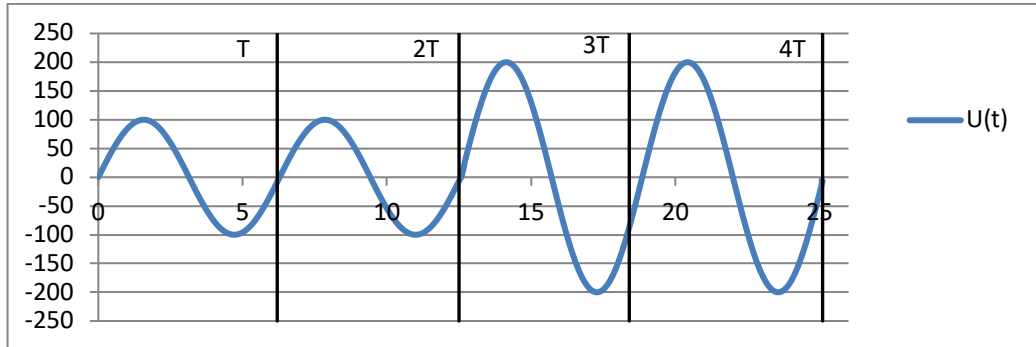
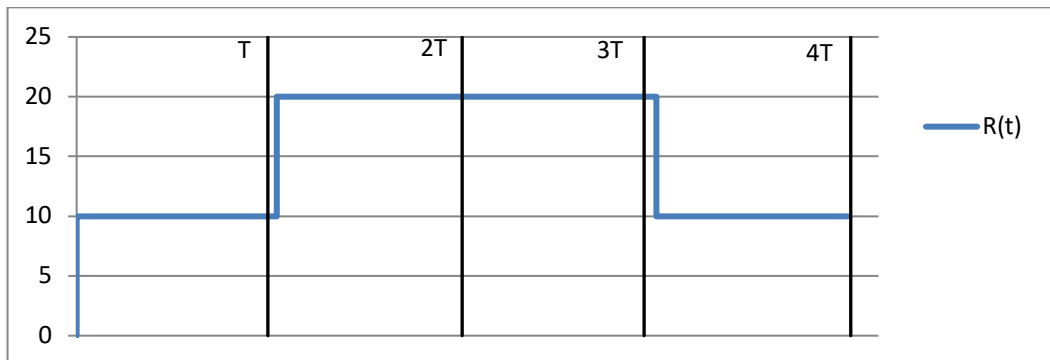


Рисунок 9 – Крива напруги



$R_1 = const$, при $t \in [0 \dots T] \cup [3T \dots 4T]$; $R_2 = 2R_1$, при $t \in [T \dots 2T] \cup [2T \dots 3T]$

Рисунок 10 – Форми навантажень на періоді $[0 \dots 4T]$

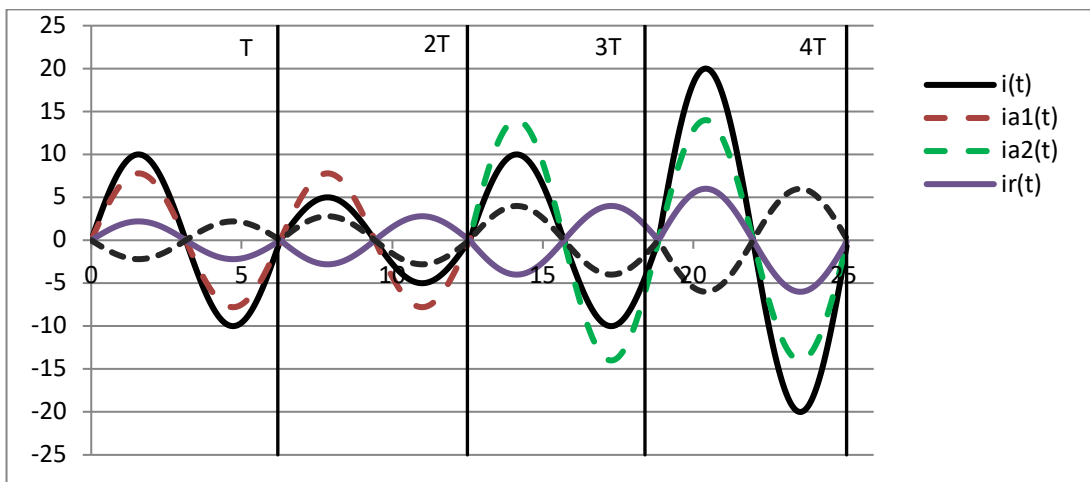
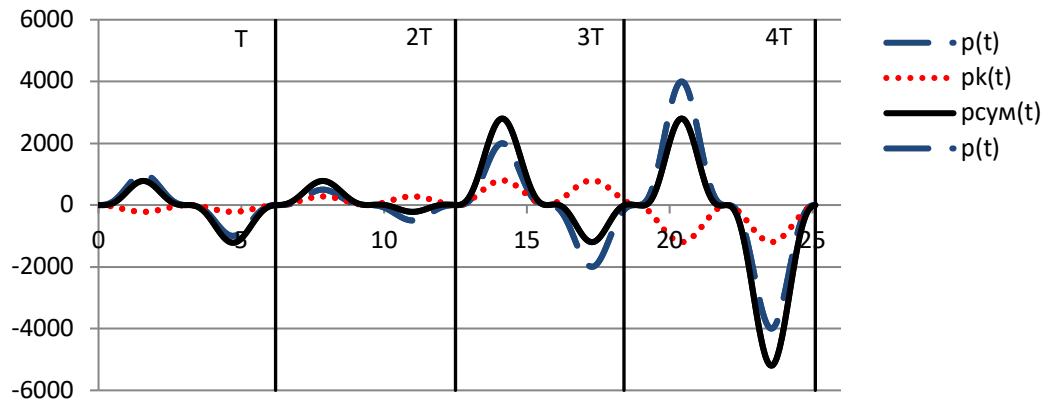


Рисунок 11 – Графіки струмів при навантаженні $R(t)$

Рисунок 12 – Графіки миттєвих потужностей при навантаженні $R(t)$

Наведені на рис. 8 та 12 залежності показують складний характер регулювання електроспоживання в ЛСЕ на основі виділення реактивної складової струму $i_p(t)$. Звичайно, як ефективні виконавчі механізми регулювання доцільно застосовувати силові активні фільтри чи гібридні компенсатори, до складу яких також мають входити компенсатори вищих гармонік струму (напруги).

Висновки

1. Розглянуто особливості оцінки сумарних втрат електроенергії в електричних мережах та особливості оцінки характеру споживання електроенергії в ЛСЕ. При цьому здійснено аналіз структури додаткових втрат електроенергії у виділених системах при наявності вищих гармонік струму та напруги. Для представлення інтегральних характеристик і показників оцінки взаємного впливу елементів ЛСЕ запропоновано узагальнений розклад миттєвих функцій струму $i(t)$, напруги $u(t)$ та потужності $p(t)$ на активну та реактивну складові.

2. Запропоновано показники оцінки рівнів виконання критерію мінімуму втрат електроенергії в ЛСЕ, що дозволило оцінити рівні спотворення енергетичних процесів як при розгляді обмінних процесів, так і при аналізі додаткових втрат електроенергії в таких системах електроживлення. Проаналізовано особливості оцінки точності вимірювання інтегральних характеристик енергообміну в ЛСЕ в залежності від наявних рівнів спотворень сигналів напруги та струму.

3. Показано, що з метою врахування впливу вищих гармонік напруги та струму на повну споживану потужність необхідно визначити зміну потужності Фризе Q_f , як показника оцінки додаткових втрат електроенергії при спотворенні струмів та напруги в перетинах ЛСЕ, зокрема, при різних співвідношеннях між значенням струму та напруги на першій та вищих гармоніках.

4. Представлено оцінку ефективності регулювання електроспоживання в ЛСЕ з аналізом потужності Фризе Q_f на довільному інтервалі часу та відповідного розкладу модульованого струму на активну та реактивну складові, а також проаналізовано особливості підвищення ефективності регулювання електроспоживання в ЛСЕ при циклічній зміні параметрів генератора та навантаження.

Список використаної літератури

1. Шклярский Я.Э., Пирог С. Влияние графика нагрузки на потери в электрической сети предприятия // *Электромеханика и машиностроение*. – 2016. – № 6. – С. 858–863.
2. Figueiredo V., Rodrigues F., Vale Z., Gouveia J.B. An electric energy consumer characterization framework based on data mining techniques // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2005. – № 2. Vol. 20. – P. 596–602.
3. Greening L.A. Demand response resources: Who is responsible for implementation in a deregulated market? // *Energy*. – 2010. – № 4. Vol. 35. – P. 1518–1525.
4. Torriti J., Hassan M.G., Leach M. Demand response experience in Europe: Policies, programmes and implementation // *Energy*. – 2010. – № 4. Vol. 35. – P. 1575–1583.
5. Денисюк С.П., Базюк Т.М. Оптимальний відбір потужності в системах електропостачання // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2013. – № 2. – С. 50–57.
6. Денисюк С.П., Опришко В.П. Аналіз можливостей оптимізації добового графіку споживання електричної енергії // *Вісник КНУТД*. – 2019. – №6 (128). – С. 20–28.
7. Дрехслер Р. Изменение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
8. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат. – 2000. – 252 с.

9. Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Энергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами. – К.: ТЕКСТ, 2010. – 264 с.
10. Ковалев А.А., Шаюхов Т.Т. Выравнивание графиков нагрузки. – https://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/12895/1/eee_2013_10.pdf
11. Брагин А.А. Алгоритм формирования графиков электрических нагрузок предприятия с применением аккумуляторных батарей в качестве потребителей-регуляторов мощности. – Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Специальность 05.09.03 –Электротехнические комплексы и системы. – Санкт-Петербург, 2013. – 20 с.
12. Фролов В.Я., Коротков А.В. Графики активной и реактивной нагрузки бытовых потребителей // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 5. – С. 1–3.
13. Попов В.П. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 1998.
14. Радиотехнические цепи и сигналы. Задачи и задания / под ред. Я.Н. Яковлева. – М.: ИНФРА-М; Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.
15. Денисюк С.П., Аналіз та оптимізація енергопроцесів у розосереджених електроенергетичних системах // Техн. електродинаміка. – 2016. – № 4. – С. 62–64.
16. Денисюк С.П., Базюк Т.М. Аналіз впливу нерівномірності споживання електроенергії // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 8(64). – С. 9–13.
17. Денисюк С.П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 1. – С. 7–21.
18. Денисюк С.П., Кравцов В.О. Оцінка точності вимірювання складових електроенергії в системах з перетворювачами електроенергії // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – Ч.1, 2008. – С. 61 – 66.

REFERENCES

1. Shlarskiy Ya., Pirog S. Influence of the load graph on the consumption in the electrical network of the enterprise // Electromechanics and mechanical engineering. – 2016. – № 6. – P. 858–863.
2. Figueiredo V., Rodrigues F., Vale Z., Gouveia J.B. An electric energy consumer characterization framework based on data mining techniques // IEEE Transactions on Power Systems. – 2005. – № 2. Vol. 20. – P. 596–602.
3. Greening L.A. Demand response resources: Who is responsible for implementation in a deregulated market? // Energy. – 2010. – № 4. Vol. 35. – P. 1518–1525.
4. Torriti J., Hassan M.G., Leach M. Demand response experience in Europe: Policies, programmes and implementation // Energy. – 2010. – № 4. Vol. 35. – P. 1575–1583.
5. Denysiuk S., Bazyuk T. Optimal power selection in power supply systems // Energy: economics, technologies, ecology. – 2013. – № 2. – P. 50–57.
6. Denysiuk S., Opryshko V. Analysis of possibilities of optimization of daily schedule of electric energy consumption // Bulletin of KNUTD. – 2019. – №6 (128). – P. 20–28.
7. Drehsler R. Change and assessment of electricity quality under asymmetric and nonlinear loading. – М.: Energoatomizdat, 1985. – 112 p.
8. Zhezhelenko I., Saenko Yu. Electricity quality indicators and their control at industrial enterprises. – М.: Energoatomizdat, 2000. – 252 p.
9. Zhuikov V., Denysiuk S. Energy processes in electric circuits with key elements. – К.: ТЕКСТ, 2010. – 264 p.
10. Kovalev A., Shauychov T. Aligning load curves. – https://elar.rsvpu.ru/bitstream/123456789/12895/1/eee_2013_10.pdf
11. Bragin A. Algorithm for the formation of graphs of electrical loads of the enterprise using storage batteries as consumers-power regulators. – Abstract of the dissertation for the degree of Cand. tech. sciences. – Specialty 09.05.03 – Electrotechnical complexes and systems. - St. Petersburg, 2013. – 20 p.
12. Frolov V., Korotkov A. Residential and reactive load graphs for residential consumers // ISPU Bulletin. – 2011. – Issue. 5. – P. 1–3.
13. Popov V. Fundamentals of circuit theory. – М.: Vushaya chkola, 1998.
14. Radio circuits and signals. Tasks and assignments / ed. J. Jakovlev. – М.: INFRA-M; Novosibirsk: NGTU, 2003.
15. Denysiuk S. Analysis and optimization of energy processes in dispersed power systems // Techn. electrodynamics. – 2016. – № 4. – P. 62–64.
16. Denysiuk S., Bazyuk T. Analysis of the impact of uneven electricity consumption // Eastern European Journal of Advanced Technologies. – 2013. – № 8(64). – P. 9–13.
17. Denysiuk S. Technological guidelines for the implementation of the Smart Grid concept in power systems // Energy: economics, technology, ecology. – 2014. – № 1. – P. 7–21.

18. Denysiuk S., Kravtsov V. Estimation of accuracy of measurement of components of the electric power in systems with converters of the electric power // Techn. electrodynamics. Theme. issue "Problems of modern electrical engineering". – Part 1, 2008. – P. 61 – 66.

S. Denysiuk, Dr. Sc. Sciences, Prof., ORCID 0000-0002-6299-3680
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
T. Bazyuk, Ph.D. tech. Science, ORCID 0000-0003-4594-0613

EVALUATION OF ADDITIONAL LOSSES AND EFFICIENCY ELECTRICITY CONSUMPTION REGULATION IN LOCAL POWER SUPPLY SYSTEMS

Peculiarities of estimation of total energy losses in electric networks and estimation of nature of electricity consumption in local power supply systems (LES) are given. The structure of additional electricity losses in LES in the presence of higher harmonics of current and voltage is carried out, the generalized schedule of instantaneous functions of current $i(t)$, voltage $u(t)$, and power $p(t)$ on components. The offered indicators of an estimation of the performance of criterion of a minimum of losses of the electric power in LES allow to estimate levels of distortion of power processes at consideration both exchange processes, and at the analysis of additional losses of the electric power. The accuracy of measuring the integrated characteristics of energy exchange depending on the available levels of distortion of voltage and current signals is considered. It is shown that in order to take into account the influence of higher harmonics on the total power consumption, it is necessary to determine the change of Frize Q_F power as an indicator of additional electricity losses in the presence of non-sinusoidal currents and voltages in at different ratios between the value of current and voltage of the first and higher harmonics. The evaluation of the efficiency of power consumption regulation using the Frize Q_F power at an arbitrary time interval, as well as the corresponding current distribution into active and reactive components are considered. The peculiarities of increasing the efficiency of power consumption regulation in LES at the cyclic change of generator parameters and load are analysed.

Keywords: local power supply system, additional power losses, power consumption regulation, higher harmonics of current and voltage, Frize power, reactive current, cyclic change of generator parameters and load.

Надійшла 12.10.2020

Received 12.10.2020

А. В. Волошко, д-р техн. наук, проф.
 Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
 Я.С. Бедерак, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-2669-0965
 ПрАТ «АЗОТ», м. Черкаси
 Т.Е. Джеря, аспірантка
 Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКА ХЕРСТА ПРИ ФРАКТАЛЬНОМУ АНАЛІЗІ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Метою дослідження є перевірка гіпотези правильності застосування показника Херста H , розрахованого за емпіричним співвідношенням при значенні константи a , що дорівнює $0,5$. Проведено ряд розрахунків показника Херста для декількох вибірок електроспоживання методом нормованого розмаху при значенні константи a , що дорівнює $0,5$, які показали, що застосування емпіричного співвідношення для деяких вибірок електроспоживання призводить до великих похибок у визначенні цього показника. Запропоновано визначати значення показника H або програмним шляхом (для вибірок, що містять більше 512 часових інтервалів n), або шляхом визначення методом найменших квадратів нахилу лінії регресії, яка утворюється з'єднанням точок, одержаних відкладанням по осі x $\lg n$, а по осі y $\lg(R/S)$, де R/S - нормований розмах.

Ключові слова: графік електричного навантаження, електроспоживання, показник Херста, метод нормованого розмаху.

Вступ. На промислових підприємствах не буває зниження втрат електроенергії та зменшення витрат на її оплату без точного та своєчасного прогнозування величини електроспоживання. Прогнозування електричних навантажень надає вихідну інформацію, яка є необхідною для планування нормальних режимів роботи, узгодження більш вигідних умов електроспоживання з енергосистемою, забезпечення якості електроенергії, що в підсумку впливає на кінцеву вартість продукції, яка виготовляється підприємством.

Проведення передпрогнозного аналізу електричних навантажень дозволяє вибрати декілька найефективніших методів прогнозування для певного споживача в конкретних умовах, що зменшить час проведення прогнозу та підвищить його якість. Однією із головних складових передпрогнозного аналізу є фрактальний аналіз електричних навантажень, який застосовується в основному для оцінки персистентності часових рядів.

Задачею фрактального аналізу будь-якого часового ряду є виявлення наявності в ньому довгострокової пам'яті, а також визначення значення показника Херста, виявлення трендостійкості. Знання перерахованих фрактальних характеристик часового ряду, який розглядається, дозволяє оцінити аналітику та перспективність надійного прогнозування часового ряду електричних навантажень [1].

Результати дослідження добових, тижневих, місячних, річних графіків електричного навантаження (ГЕН), які наведені в роботі [2], показали наявність фрактальних властивостей (персистентності, наприклад) і наявність короткострокової та довгострокової пам'яті. Це дозволяє застосувати для ефективного прогнозування та керування електроспоживанням фрактальний аналіз, який встановлює залежність подальших значень від ретроспективної інформації.

Херст запровадив наступну формулу:

$$R/S = (an)^H, \quad (1)$$

де a – деяка константа; n – число неспостережень; H – показник Херста.

Після прологарифмування рівності (1) визначається показник Херста:

$$H = \frac{\ln(R/S)}{\ln(an)}. \quad (2)$$

Відкладаючи по осі x $\lg n$, а по осі y $\lg(R/S)$ виходять точки, за якими, використовуючи метод найменших квадратів, будується лінійна регресія. Нахил отриманої лінії регресії дає значення показника Херста. При побудові R/S - траєкторії необхідно враховувати, що R/S - аналіз через алгоритмічну особ-

ливість не обчислює координати (x_τ, y_τ) , відповідно до двох перших рівнів досліджуваного часового ряду, тобто для $\tau = 1$ и $\tau = 2$. Тому пропонується нумерувати точки вказаних траєкторій, починаючи з номера 3.

Значення показника Херста можливо також отримати для вибірок із більш ніж 512 значеннями, використовуючи програму «Fractan».

Разом із використанням показника Херста для аналізу тенденції, оцінки автокореляційного впливу попередніх значень динамічного ряду на його наступні значення і визначення майбутніх тенденцій обчислюють характерне кореляційне співвідношення $C = 2^{2H-1} - 1$, де C – міра кореляції.

Для багатьох часових рядів спостережуваний нормований розмах R/S дуже добре описується емпіричним співвідношенням [3]

$$\frac{R}{S} = (n/2)^H. \quad (3)$$

Із цього співвідношення випливає, що

$$H = \frac{\ln(R/S)}{\ln(0,5n)}. \quad (4)$$

У роботі [4] виконаний розрахунок показника Херста H за формулою (3) для часового ряду електроспоживання насосної станції очищення стоків промислового підприємства. Розрахункові дані H співпали із значенням сталої, яку отримали програмним шляхом. Розрахунок виконувався за алгоритмом, який наведений у роботах [5, 6].

Проте є сумніви в тому, що формула (3) розрахунку показника Херста H може застосовуватись для всіх ГЕН виробничих об'єктів.

Мета та задачі. Метою даної роботи є з'ясування правильності застосування для розрахунку показника Херста значення константи a , яка рівна 0,5; визначення істинного способу розрахунку показника Херста при виконанні фрактального аналізу електричних навантажень.

Матеріал та результати досліджень.

Для порівняння розглядаються 3 об'єкти: насосна станція для очищення стоків та 2 цехи аміаку великого хімічного промислового підприємства.

Лічильником електроенергії, який було встановлено на вводі 10 кВ підстанції насосної станції очищення промислових стоків енергоємного хімічного підприємства за 30 днів 201... року, були зібрані та передані в базу даних автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії значення активної потужності з 15-ти хвилинним інтервалом усереднення. Отриманий таким способом часовий ряд складає за місяць 2880 значень (рис. 1). Таким чином, число спостережень $n=2880$ штук.

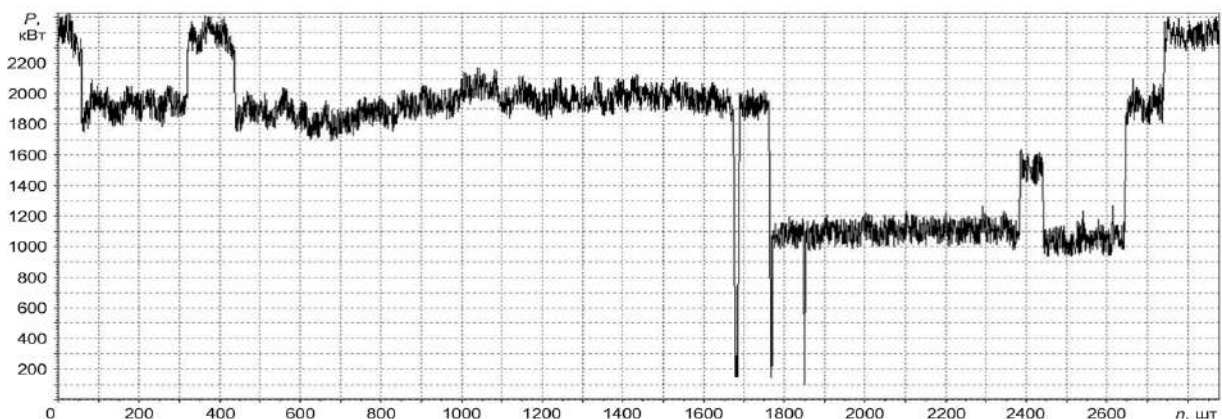


Рис. 1. Динаміка електроспоживання насосної станції за 30 днів (2880 показників)

Для обробки також використовуються добові графіки двох цехів випуску аміаку, які працювали цілодобово.

Електропостачання цехів здійснювалося з підстанції 110/6 кВ, на вводах якої встановлені лічильники комерційного обліку. Для дослідження застосовуються реальні добові погодинні графіки цехів по виробництву аміаку за 31 день літнього місяця 201... року. Графік електричного навантаження цеху аміаку №1 представлено на рис. 2, цеху аміаку №2 – на рис. 3.

За віссю X відкладено число спостережень у годинах, за віссю Y – потужність цеху в кВт.

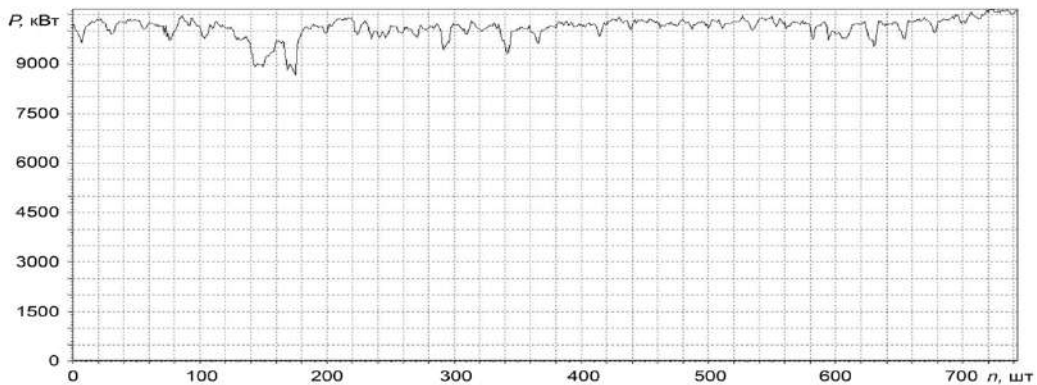


Рис. 2. Динаміка електроспоживання цеху аміаку №1 за 31 добу (744 погодинних значень)

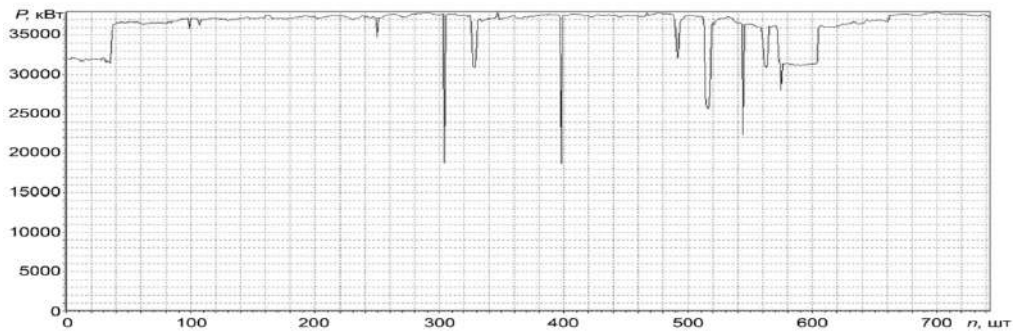


Рис. 3. Динаміка електроспоживання цеху аміаку №2 за 31 добу (744 погодинних значень)

Згідно алгоритму розрахунку показника Херста для розглянутих вибірок електроспоживання при значенні константи $a=0,5$ отримані для різних часових інтервалів значення Херста, зазначені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати розрахунку показника Херста на виробничих об'єктах на часових інтервалах різної тривалості

Число часових інтервалів N , шт.	Розрахункові значення показника Херста H		
	Цех аміаку №1	Цех аміаку №2	Насосна станція
72	0,43	0,23	0,92
96	0,39	0,23	0,98
120	0,37	0,23	0,98
144	0,42	0,23	0,98
168	0,32	0,24	0,97
192	0,32	0,24	0,97
216	0,32	0,24	0,96
240	0,32	0,25	0,95
264	0,32	0,25	0,95
288	0,32	0,26	0,94
480	0,32	0,42	0,95
744	0,32	0,36	0,91

На рис. 4 зазначений логарифмічний графік залежності співвідношення нормованого розмаху R/S від кількості часових інтервалів в цеху аміаку №1 за 22 доби; на рис. 5 - логарифмічний графік залежності співвідношення нормованого розмаху R/S від кількості часових інтервалів в цеху аміаку №1 за 31 добу; на рис. 6 наведено логарифмічний графік залежності співвідношення нормованого розмаху R/S від кількості часових інтервалів у цеху аміаку №2 за 22 доби; на рис. 7 - логарифмічний графік залежності співвідношення нормованого розмаху R/S від кількості часових інтервалів у цеху аміаку №2 за 31 добу.

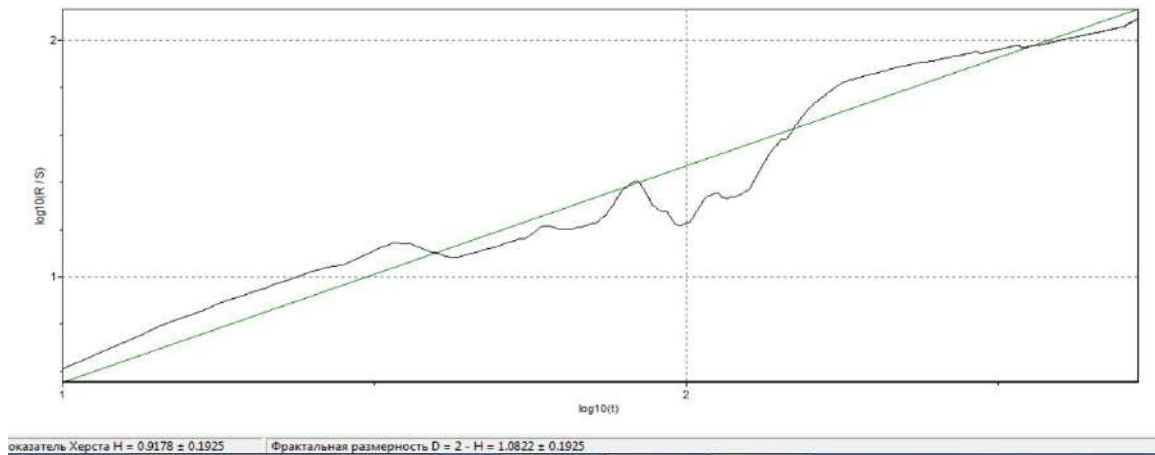


Рис. 4. Логарифмічний графік залежності співвідношення нормованого розмаху R/S від кількості часових інтервалів у цеху аміаку №1 за 22 доби (528 погодинних значень)

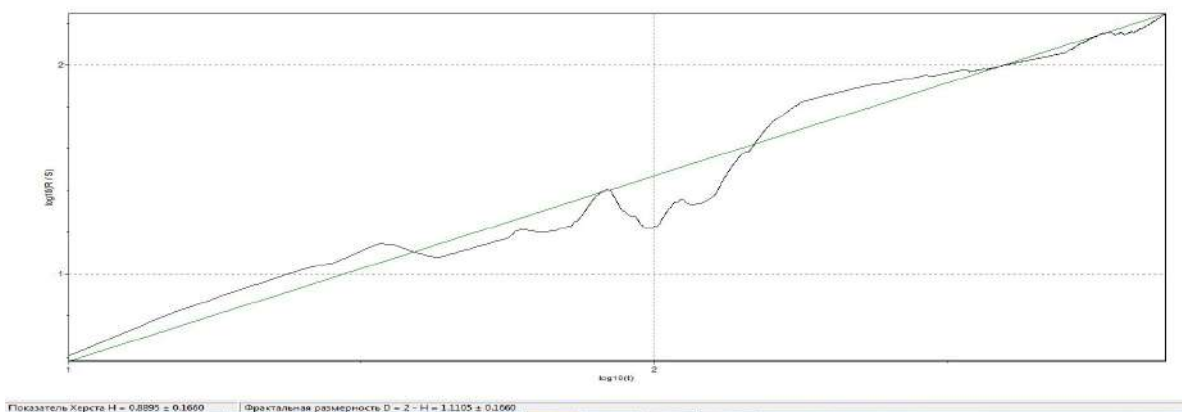


Рис. 5. Логарифмічний графік залежності співвідношення нормованого розмаху R/S від кількості часових інтервалів у цеху аміаку №1 за 31 добу (744 погодинних значень)

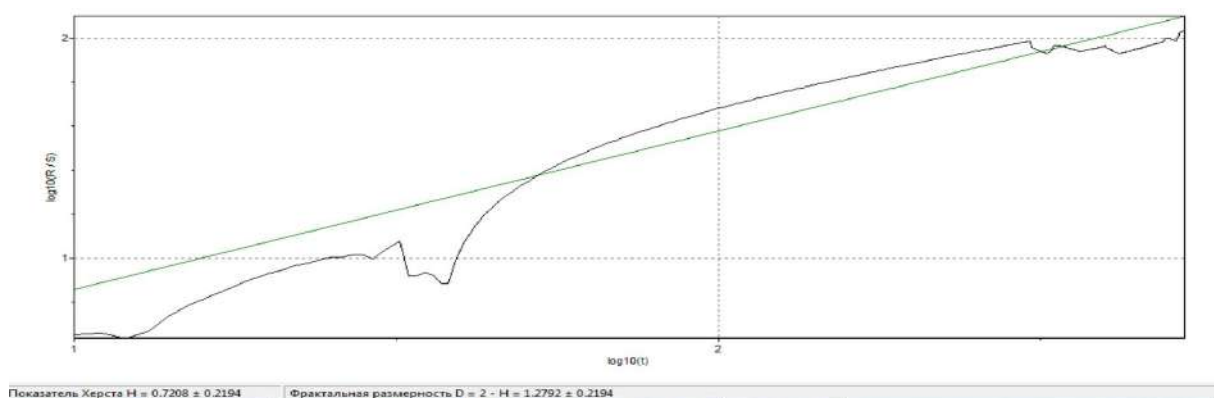


Рис. 6. Логарифмічний графік залежності співвідношення нормованого розмаху R/S від кількості часових інтервалів у цеху аміаку №2 за 22 доби (528 погодинних значень)

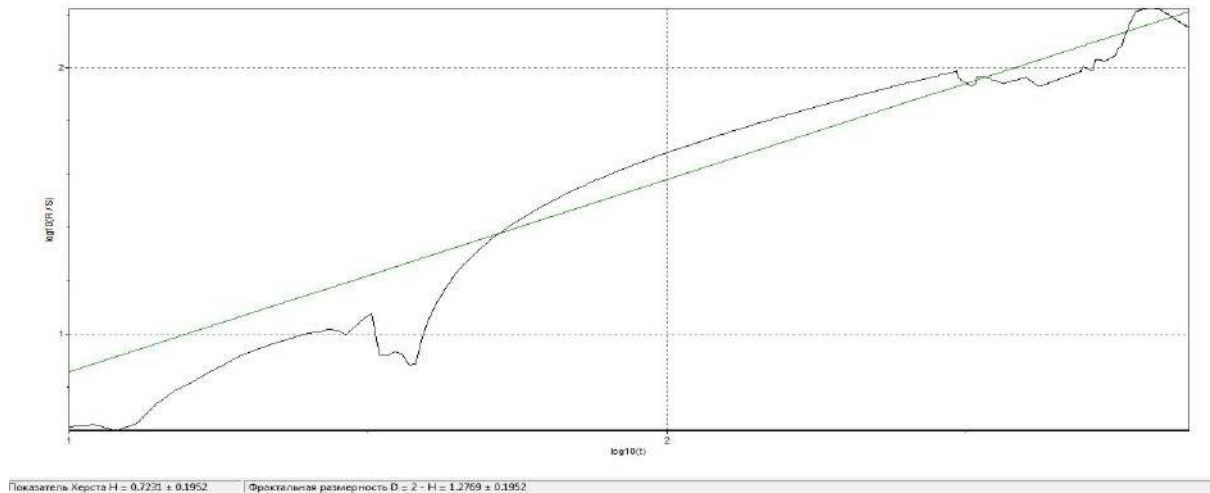


Рис. 7. Логарифмічний графік залежності співвідношення нормованого розмаху R/S від кількості часових інтервалів у цеху аміаку №1 за 31 добу (744 погодинних значень)

Знизу рисунків 4, 5, 6, 7 наведено значення показника Херста H та фрактальної розмірності D .

Дані, зазначені в табл.1, свідчать про те, що часові ряди електричного навантаження в цеху аміаку №1 і цеху аміаку №2 мають низькі розрахункові значення показника Херста ($0,32 \div 0,42$) та ($0,23 \div 0,42$) відповідно. Проте значення показника Херста, які отримані програмою «Fractan» доводять, що для цеху аміаку №1 за 22 доби та за місячний інтервал часу значення H дорівнює приблизно 0,9 (рис. 4 і 5), а для цеху №2 – приблизно 0,7 (рис. 6 і 7 відповідно).

Таким чином, значення показника Херста, визначені програмним шляхом, не співпадають із розрахунковими значеннями H , наведеними в табл. 1 та отриманими методом нормованого розмаху, за умови, що константа $a=0,5$.

Із формули (1) випливає, що константа

$$a = e^{\frac{\ln(R/S) - H \ln n}{H}}$$

В табл.2 наведені результати розрахунку константи a для місячного та 22-добового погодинного ГЕН цеху аміаку №1, використовуючи алгоритм розрахунку та значення показника Херста, розраховані програмно, в табл. 3 – те саме для цеху аміаку №2.

Таблиця 2. Результат розрахунку константи a для 22-добового та місячного ГЕН цеху аміаку №1

n	S	R	H	a
528	308,15	1781,898	0,9178	0,01281574
744	299,7	1996,4	0,8895	0,01133174

Таблиця 3. Результат розрахунку константи a для 22-добового та місячного ГЕН цеху аміаку №1

n	S	R	H	a
528	2100	19282	0,7208	0,04104766
744	2221	19282	0,7231	0,0266965

Результати розрахунку константи a для ГЕН цехів аміаку №1 та №2 доводять, що для часових рядів електричних навантажень деяких виробництв не можна застосовувати формулу (3) для розрахунку показника Херста.

Виконані розрахунки доводять, що обчислення показника Херста, який є одним із основних параметрів фрактального передпрогнозного аналізу електричних навантажень, необхідно виконувати тільки використовуючи формулу Херста, а не емпіричне співвідношення при значенні константи a , що дорівнює 0,5. Дане твердження доцільно поширити й на інші часові ряди неелектричної природи.

Достовірне значення показника H необхідно отримувати або програмним шляхом (для вибірок, які містять більш ніж 512 значень), або шляхом визначення нахилу лінії регресії. Ця регресія утворюється відкладанням за віссю $x \lg n$, а за віссю $y - \lg(R/S)$, сполученням отриманих точок одна з одною, за якими, використовуючи метод найменших квадратів, будується лінійна регресія.

Висновки

1. Вперше експериментально доведена неправильність застосування у формулі розрахунку показника Херста константи a , яка дорівнює 0,5, при фрактальному аналізі електричних навантажень деяких виробничих об'єктів.

2. Запропоновано визначати показник Херста або програмним шляхом, або шляхом визначення методом найменших квадратів нахилу лінії регресії. Ця регресія утворюється відкладанням за віссю $x \lg n$, а за віссю $y - \lg(R/S)$, сполученням отриманих точок одна з одною, за якими, використовуючи метод найменших квадратів, будується лінійна регресія.

3. Необхідно при фрактальному аналізі економічних та фізичних часових рядів або не використовувати формулу Херста, або виконувати попередню перевірку співпадінь розрахункового значення показника Херста, застосовуючи у формулі значення константи a , яка дорівнює 0,5, зі значенням, яке отримане, розраховуючи нахил лінії регресії, отриманої відкладанням за віссю $x \lg n$, а за віссю $y - \lg(R/S)$.

4. Виконані дослідження дозволяють значно підвищити достовірність фрактального передпрогнозного аналізу електричних навантажень.

Список використаної літератури

1. Antonova I., Chikina N. Application of nonlinear dynamics methods in prepropriate analysis of the morbidity indicators in Ukraine by various skin pathology // Norwegian Journal of development of the International Science, 2018. – №14 (Vol. 1). – P. 48–52.

2. Lezhniuk P., Bondarchuk A., Shullie Iu. Investigation and implementation of the fractal properties of electric load on civilian objects in order to efficiently predict and control electrical consumption // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019. – №3/5 (99). – P. 6–12.
DOI: 10.15587/1729-4061.2019.168182.

3. Федер Е. Фракталы. – Москва: Мир, 1991. – 254 с.

4. Voloshko A. V., Bederak Ya. S., Kozlovskiy O. A. An improved pre-forecasting analysis of electrical loads of pumping station // Resource-Efficient Technologies, 2019. – №4. – P. 20–29.
DOI: 10.18799/24056537/2019/4/265.

5. Шулле Ю.А. Аналіз графіків електричних навантажень промислових підприємств методом нормованого розмаху (R/S-аналіз) // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2015. – №2. – С. 50–56.

6. Курской Ю.С. Фрактальный анализ результатов электрических измерений // Энергоснабжение. Энергетика. Энергоаудит, 2014. – №1. – С. 52–57.

A. Voloshko, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof.
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
Ya. Bederak, Ph.D. tech. Science, ORCID 0000-0002-2669-0965
Private Joint Stock company “AZOT” Cherkasy city
T. Dzheria, PhD student
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

COMPLEX STATISTICAL DATA ANALYSIS OF ELECTRIC POWER CONSUMPTION, CONSUMPTION OF ENERGY RESOURCES AND PRODUCTION VOLUMES

Aims of this research are development of a complex statistical analysis algorithm for active electric power consumption data, consumption of energy resources and manufacturing products, implementation of statistical analysis in practice. Proposed parameters and criteria, which can help to technical staff in factories, to provide optimal and economical operating of supply and distribution systems as electricity, water, gas, heat, compressed air, etc. for production facilities, based on the collected active electric power consumption data for previous periods, information about consumption dynamic. It is concluded that the statistical analysis of the data, obtained for each

type of engineering equipments (water supply and sewage, supply systems of compressed air, gas, electricity and steam) and various consumables coefficients (in the proposed algorithm) make possible to identify "weak areas" and to determine the most rational ways to optimize energy usage.

Keywords: power consumption, energy consumption, statistical data analysis.

REFERENCES

1. Antonova I., Chikina N. Application of nonlinear dynamics methods in prepropriate analysis of the morbidity indicators in Ukraine by various skin pathology // Norwegian Journal of development of the International Science, 2018. – №14 (Vol. 1). – P. 48–52.
2. Lezhniuk P., Bondarchuk A., Shullie Iu. Investigation and implementation of the fractal properties of electric load on civilian objects in order to efficiently predict and control electrical consumption // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2019. – №3/5 (99). – P. 6–12.
DOI: 10.15587/1729-4061.2019.168182.
3. Feder E. Fractals. - Moscow: Mir, 1991. - 254 p.
4. Voloshko Anatolii V., Bederak Yaroslav S., Kozlovskiy Oleksandr A. An improved pre-forecasting analysis of electrical loads of a pumping station // Resource-Efficient Technologies, 2019. –№4. - P. 20–29. DOI: 10.18799 / 24056537/2019/4/265.
5. Schulle YA Analysis of graphs of electrical loads of industrial enterprises by the method of normalized scale (R / S-analysis) // Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute, 2015. - (2. - P. 50– 56.
6. Kurskoy Yu.S. Fractal analysis of the results of electrical measurements // Power supply. Energy. Energoaudit, 2014. - №1. - P. 52 - 57.

Надійшла 20.10.2020

Received 20.10.2020

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

УДК 62-833.4

С.В. Зайченко, проф. д-р, ORCID 0000-0002-8446-5408
Р.Д. Куліш, аспірант, ORCID 0000-0003-0647-1578
Д.Г. Дерев'янка, доцент, к.т.н., ORCID 0000-0003-4963-2490
Н.І. Жукова, доцент, к.т.н., ORCID 0000-0002-4215-6981
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОБҐРУНТУВАННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АВТОНОМНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА БАЗІ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ПРИ РОЗРОБЦІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ

В роботі представлено загальну концепцію створення системи діагностування основних структурних елементів і аналізу станів автономних джерел електричної енергії на базі ДВЗ. Проведено аналіз конструктивних особливостей найбільш поширених на ринку України резервних джерел електричної енергії на базі ДВС. Проведений аналіз конструктивних особливостей автономних джерел живлення дозволив розробити логічну модель об'єкта дослідження. Розроблена логічна схема дослідження дозволяє встановити взаємозв'язок між основними структурними елементами системи, а також визначити можливі стани системи. Для визначення кінцевої кількості діагностичних параметрів серед нескінченної кількості можливих комбінацій фізичних параметрів, що характеризують систему, запропоновано інформаційний критерій. У якості інформаційного критерію запропоновано поняття ентропії К. Шеннона. Застосування даного критерію дозволило встановити діагностичні параметри, які з найбільшою ефективністю знижують ступінь невизначеності системи. Діагностичний параметр, який має найменшу остаточно ентропію системи і максимально впливає на стан автономного джерела електричної енергії на базі ДВЗ, визначає технічний стан карбюратора.

Ключові слова: система діагностування, джерело електричної енергії, двигун внутрішнього згорання, генератор

Вступ

Сучасний етап розвитку енергетики характеризується широким застосуванням альтернативних та відновлюваних джерел енергії. Такі системи в цілому є складними за своєю структурою і мають високу питому вартість електричної енергії. Доступність відновлюваних джерел енергії дозволяє використовувати їх як автономні, проте ефективність і надійність повністю залежить від циркадних ритмів і сезону. Вказані особливості суттєво обмежують застосування альтернативних джерел енергії у якості надійного автономного джерела живлення електричною енергією [1,2]. Наявність надійного резервного джерела живлення електричною енергією на сучасному підприємстві є запорукою безпечної і якісної роботи.

Єдиним надійним і економічно ефективним рішенням резервування джерел живлення залишаються енергетичні установки на базі двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ). Використання даного типу обладнання для генерації електричної енергії військовими та судновими енергетичними установками є свідченням його найвищої надійності і безпечності серед можливих варіантів автономного живлення [3-5].

Частота використання резервного джерела живлення залежить від надійності основної системи енергозабезпечення і може коливатись від поодиноких пусків за рік до щоденного використання. При

© С.В. Зайченко, Р.Д. Куліш, Д.Г. Дерев'янка, Н.І. Жукова, 2020

цьому показник готовності обладнання суттєво знижується як в першому випадку за рахунок інтенсивного зношування, так і в другому внаслідок інтенсивного старіння полімерних елементів системи і погіршення якості паливно-мастильних матеріалів, що призводять до відкладень в каналах вузлів живлення ДВЗ, розмагнічування ротора тощо. Вказані процеси, що проходять у автономних джерелах живлення на базі ДВЗ, потребують постійного контролю для можливості використання даного обладнання у якості резервного джерела живлення електричною енергією. Рішенням даної задачі є розробка системи діагностування автономних джерел енергії на базі ДВЗ.

При вирішенні задачі визначення технічного стану автономних джерел енергії на базі ДВЗ дослідники в залежності від поля своєї діяльності приділяють увагу механічній(ДВЗ) або електромеханічній частині(альтернатор) об'єкту[6]. Розглядаючи тільки частину об'єкту, виділяються можливі стани і діагностичні показники, які можуть визначати стан лише окремої складової частини. Таким чином для визначення стану об'єкта необхідно реалізувати цілий комплекс перевірок для окремих складових, що суттєво збільшує час і вартість діагностування. Мінімізувати витрати процесу діагностування можливо при розгляді об'єкта в цілому з визначенням його структури, можливих станів і необхідних перевірок.

Мета і завдання дослідження

Метою даного дослідження є розробка нової системи технічного діагностування на основі визначення основних діагностичних структурних елементів і станів автономних джерел енергії на базі ДВЗ з врахуванням особливостей взаємодії електромеханічної і механічної складових.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувались наступні задачі:

- Розробка структурної схеми джерел енергії на базі ДВЗ з врахуванням особливостей взаємодії електромеханічної і механічної складових, що дозволить встановити взаємні впливи різних частин об'єкту дослідження на його стан;
- Визначення можливих станів автономних джерел енергії на базі ДВЗ;
- Встановлення необхідних перевірок для визначення станів автономних джерел енергії на базі ДВЗ.

Матеріал і результати дослідження

При розробці структурної схеми автономного джерела електричної енергії(АДЕЕ) на базі ДВЗ розглянемо типову конструкцію яка знайшла найбільше застосування на підприємствах і в приватних господарствах. Прототипом більшості станцій, які присутні на ринку України, є бензинові генератори Honda потужністю 2,5-5 КВт. Дана лінійка генераторів використовує чотирьохтактний двигун внутрішнього згорання з повітряним охолодженням серії GX об'ємом від 163 до 389см³. Особливістю даного типу двигунів є відсутність системи змащування під тиском - змащування відбувається розбризкуванням. В основі паливної системи використовується поплавковий карбюратор серії P19. Газорозподільна система містить бокове двоклапанне SOHC управління з нижнім розподільчим валом і постійними фазами. Більшість генераторів використовує у якості альтернатора синхронний електрогенератор з автоматичним регулятором напруги(AVR), який містить обмотки ротора і статора. Частота обертання ротора електрогенератора підтримується за допомогою відцентрового регулятора частоти, пов'язаного з карбюратором. Можливі різні варіації компоновки окремих вузлів, так наприклад, конструкція двигуна дозволяє переобладнання паливної системи на змішану систему: паливо і газ. Система пуску двигуна також може бути різною: ручний пуск, електричний або комбінований. У якості системи запалювання використовується електронна схема з закріпленням на маховику магнітом. Оскільки основним призначенням даних автономних джерел є резервне забезпечення електричної енергією, можлива комплектація блоком автоматичного пуску.

На основі аналізу роботи автономних джерел електричної енергії на базі ДВЗ розроблена логічна модель (рис. 1.). З структури логічної схеми слід відзначити взаємний вплив блоків двигуна і альтернатора, що підтверджує необхідність розглядати систему цілісно.

Для того, щоб діагностична система працювала з максимальною ефективністю, в кожному конкретному випадку необхідно вирішити задачу вибору мінімально достатньої кількості діагностичних параметрів[7]. Одним з головних критеріїв вибору діагностичного параметру системи серед можливих фізичних параметрів, які характеризують технічний стан, є інформативний. Діагностичний параметр, вибраний за інформативним критерієм, дозволяє з найбільшою вірогідністю визначити стан об'єкта, що досліджується.

Для вибору діагностичного параметру скористаємось структурною схемою АДЕЕ на базі ДВЗ (рис. 1). Система, що розглядається, складається з $N=16$ елементів. За можливі стани прийемо відмову кожного елементу. Контроль стану автономного джерела плануємо за кількістю параметрів рівному кількості елементів $k=16$. Слід відмітити, що в загальному випадку кожний з елементів може мати декілька діагностичних параметрів. В результаті дослідження відмов елементів системи створена таблиця станів (табл. 1). Вірогідність відмов кожного елементу для попереднього розгляду прийемо:

$$P(S_i) = 1/N = 1/16. \quad (1)$$

В даному випадку ентропія системи з кінцевою кількістю станів максимальна.

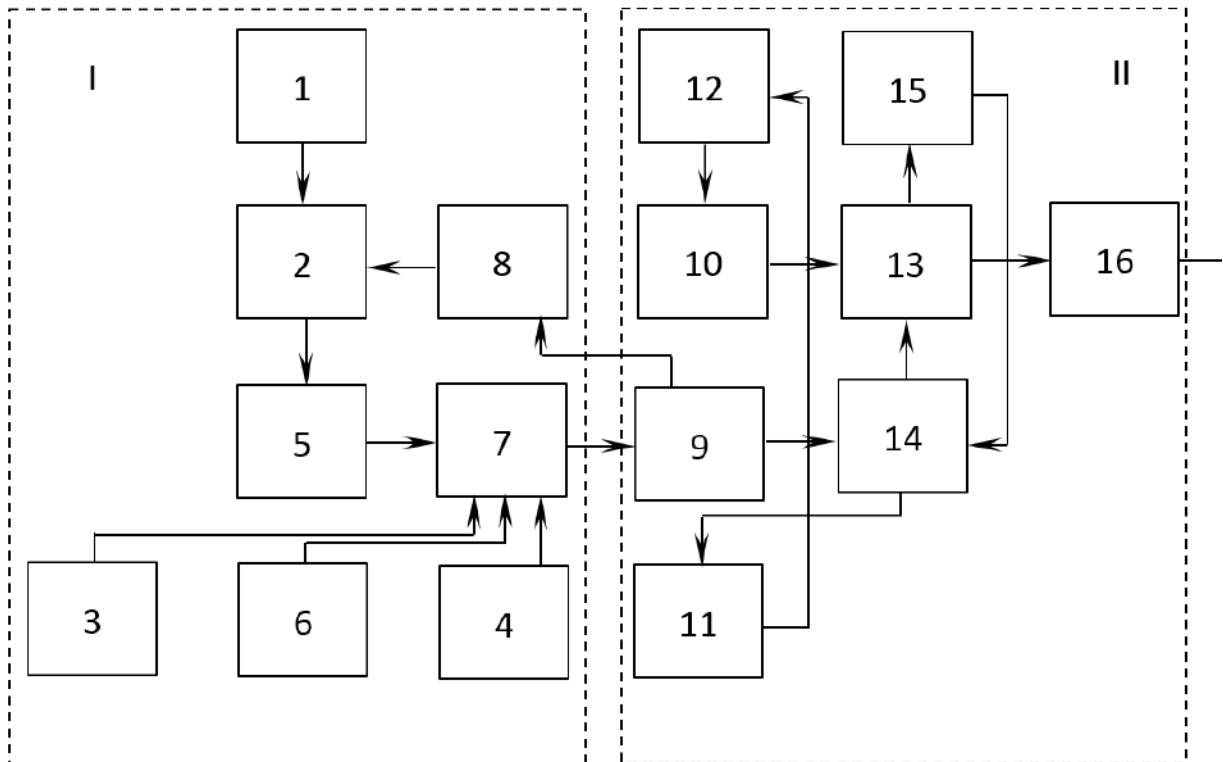


Рис. 1 Логічна модель автономних джерел електричної енергії на базі ДВЗ:

I – ДВС; II – альтернатор; 1 – бак; 2 – карбюратор; 3 – система запалювання; 4 – система пуску; 5 – система газорозподілу; 6 – система мащення двигуна; 7 – шатунно-поршнева група з колінчастим валом; 8 – регулятор частоти; 9 – залізо ротора; 10 – обмотки ротора; 11 – контактні кільця; 12 – щітковий вузол; 13 – основна і додаткова обмотки статора; 14 – обмотка збудження; 15 – автоматичний регулятор напруги; 16 – провідники

Вихідна ентропія системи визначається кількістю можливих станів:

$$H(S_i) = \sum_{i=1}^n P(N_i) \log_2 P(N_i) = -16 \frac{1}{16} \log_2 \frac{1}{16} = 4 \text{ біт}. \quad (2)$$

Позначимо через m_1 - число одиниць в кожному рядку таблиці, m_0 - число нулів в тому ж рядку. Залишкова невизначеність при контролі кожного параметра на першому кроці обчислюється за формулою

$$H\left(\frac{A}{Z_k}\right) = \frac{m_1}{N} \log_2 m_1 + \frac{m_0}{N} \log_2 m_0. \quad (3)$$

Результати розрахунку залишкової ентропії наведені в останньому стовпчику табл. 1.

Дійсно, що елемент системи, який має найменшу залишкову ентропію, дає найбільшу кількість інформації про її стан, і тому він повинен контролюватись у першу чергу. Таким параметром на першому кроці буде Z_2 . Тобто дивлячись на структурну схему АДЕЕ на базі ДВЗ (рис. 1) даний номер відповідає карбюратору. Наступними елементами, які суттєво впливають на ентропію системи, будуть Z_5, Z_7, Z_8, Z_9 . Дані номери відповідають системі газорозподілу, цилінро-поршневій групі, регулятору частоти обертання і залізу ротора.

Для роботи системи діагностування необхідно оперувати фізичними величинами (величиною діагностичних параметрів системи), тому зазначимо наступне.

Стан карбюратора можна визначити за наявністю палива у циліндрі і вихлопі в компресорному режимі.

Таблиця 1. – Таблиця станів

Діагностичний параметр Z_k	Стани																$H\left(\frac{A}{Z_k}\right)$
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{15}	A_{16}	
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,662
2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3
3	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,662
4	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,662
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3,011
6	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,662
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3,011
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3,011
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3,011
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,662
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,662
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,662
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,662
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,662
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3,662
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	∞

На основі розрахунків побудовано діаграму ентропії системи, яка дозволяє встановити інформативну значимість діагностичного параметру.

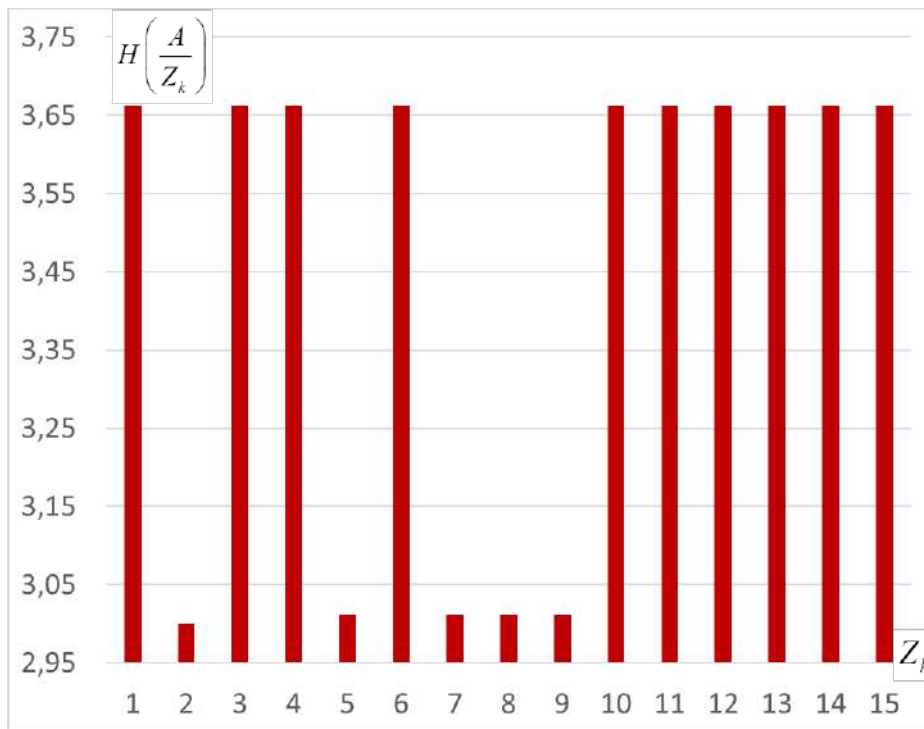


Рис. 2 Діаграма ентропії системи

Роботу системи газорозподілу і циліндро-поршневої групи можна оцінити за величиною струму стартера при роботі двигуна в компресорному режимі.

Справність роботи регулятора частоти обертання можливо оцінити шляхом аналізу кривої генерованої напруги.

Основною причиною несправної роботи заліза ротора є його розмагнічування. Діагностичним параметром відсутності або низького значення напруженості магнітного поля є низьке значення напруги на обмотках статора.

Висновки

1. Розроблена структурна схема автономного джерела енергії на базі ДВЗ з урахуванням особливостей взаємодії електромеханічної та механічної складових, що дозволяє встановити взаємні впливи різних частин об'єкту дослідження на його стан.

2. Створено таблицю можливих станів системи при дефекті одного вузла. У припущенні рівновірогідного виникнення відмов елементів системи, визначено такі, що мають найбільший вплив на невизначеність стану системи. При створенні системи технічного діагностування їх стан має визначатись першочергово (карбюратор, система газорозподілу, циліндро-поршнева група, регулятор частоти обертання, залізо ротора). Проте, для безоператорного діагностування найбільш вірогідно, що кількість таких елементів буде збільшено.

3. На основі критерію інформативності визначено необхідні діагностичні параметри системи і необхідні перевірки, які з максимальною ефективністю зменшать ступінь ентропії системи.

Список використаної літератури

1. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії [Текст] : навч. посіб. / І. О. Сінчук [та ін.] ; під ред. д-ра техн. наук, проф. Сінчука О. М. - Кременчук : Щербатих О. В., 2013. - 192 с. : рис. - Бібліогр.: с. 187-191. - 300 прим. - ISBN 978-617-639-043-5

2. Абрашин В.О., Новіченок С.М. Можливості застосування альтернативних джерел електричної енергії у збройних силах України - Системи озброєння і військова техніка, 2010, № 3(23) – с. 7 - ISSN 1997-9568

3. Гаспарян Т. Г. Двигатель внутреннего сгорания // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2017); URL: https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/4341616

4. Гильмияров Е.Б., Цветков В.В. Многокритериальный подход к выбору судовой энергетической установки. - Вестник МГТУ, том 9, №3, 2006. - с. 12 - URL: http://vestnik.mstu.edu.ru/v09_3_n23/articles/17_gilmi.pdf

5. Правила классификации и постройки морских судов – Российский морской регистр судоходства, том 2, 2003. - с. 618 - ISBN 5-89331-085-3 - URL: http://old.msun.ru/folders/edu_lit/kaf/sv/data/addition/Registr/Registr.pdf

6. Maughan C. V., 2005. 'Root-cause diagnostics of generator service failures'. Electrical Insulation, 1988, Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on (IEEE Int Symp Electr Insul). URL: https://www.researchgate.net/publication/224622606_Root-cause_diagnostics_of_generator_service_failures

7. Четвергов В.А., Овчаренко С.М., Бухтеев В.Ф. Техническая диагностика локомотивов / под ред. В. А. Четвергова. - М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. - 371 с. - ISBN 978-5-89035-752-6.

8. Zaichenko S. et al. Determination of autonomous electrical energy source technical condition based on an internal combustion engine //2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – IEEE, 2020. – С. 305-308.

9. Zaichenko S. et al. Autonomous electric power source energy efficiency improvement by internal combustion engine gases distribution control //2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – IEEE, 2020. – С. 262-265.

10. Zaichenko S. et al. Determination of the Diagnostic System Inertial Parameters for Power Generating Station Combustion Engine //2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – IEEE, 2019. – С. 88-91.

S. Zaichenko, prof. Dr., ORCID 0000-0002-8446-5408

R. Kulish, graduate student, ORCID 0000-0003-0647-1578

D. Derevyanko, Associate Professor, Ph.D., ORCID 0000-0003-4963-2490

N. Zhukova, Associate Professor, Ph.D., ORCID 0000-0002-4215-6981

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

SUBSTANTIATION OF DIAGNOSTIC PARAMETERS OF AUTONOMOUS SOURCES OF ELECTRIC ENERGY ON THE BASIS OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE AT DEVELOPMENT OF SYSTEM OF TECHNICAL DIAGNOSTICS

The paper presents a method for selecting diagnostic parameters for creating a system for diagnosing autonomous sources of electricity based on an internal combustion engine (ICE). A literary search for autonomous sources of electricity was conducted. The expediency of using internal combustion engines as autonomous sources of electric energy is determined. The analysis of design features of the most widespread in the market of Ukraine reserve sources of electric energy on the basis of internal combustion engines is carried out. The analysis of the

design features of autonomous power supplies allowed a developing of a logical model of the object of study. The developed logical scheme of the research allows to establish the relationship between the main structural elements of the system, as well as to determine the possible states of the system. The consequences of the occurrence of a faulty state of each element on the other elements of the system are analyzed, and the results of the analysis are summarized in the table. An informative criterion is proposed to determine the finite number of diagnostic parameters among the infinite number of possible combinations of physical parameters that characterize the system. The concept of information entropy of K. Shannon is offered as an informative criterion. Equally probable cases of exit from the working condition of each of the elements of the system are considered. Applying the concept of Shannon's information entropy, the residual entropies of the system at the faulty state of one of the nodes of the autonomous power supply are determined. The criterion of informativeness is the value of residual entropy. The application of this criterion allowed determine of the elements of the system that most effectively reduce the degree of uncertainty of the system. The element of the system that has the lowest residual entropy has the maximum effect on the state of the autonomous power source based on the internal combustion engine. Based on the values of residual entropy, the nodes of the system are selected, the state of which should be primarily monitored by the diagnostic system. For such elements diagnostic parameters are defined, and ways of their reception are resulted.

Keywords: *diagnostic system, diagnostic parameter, power source, internal combustion engine, generator.*

REFERENCES

1. Netradytisyni ta vidnovlyuvani dzherela energii [Text]: navch. posib. / I. O. Sinchuk [et al.]; pid red. d-ra tekhn. nauk, prof. Sinchuka O.M. – Kremenchuk: Scherbatykh O. V., 2013. - 192 s.: rys. – Bibliogr.: s. 187-191. – 300 prym. – ISBN 978-617-639-043-5
2. Abrashin V.O., Novichonok S.M. Mozhlivosti zastosuvanya alternativnikh dzherel elektrichnoi energii u zbroinikh silah ukrainy – Systemi ozbroynnja i viyskova tekhnika, 2010, № 3(23) – 7 s. - ISSN 1997-9568
3. Gasparyan T. T. Dvygatel vnutrennego sgoraniya // Bolshaya rossiyskaya enciklopediya. Electronnaya versiya (2017); https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/4341616
4. Gimiljarov E.B., Tsvetkov V.V. Mnogokriterialniy podhod k viboru sudovoi energeticheskoi ustanovki. – Vestnik MGTU, tom 9, №3, 2006 г. – 12 s. – URL: http://vestnik.mstu.edu.ru/v09_3_n23/articles/17_gilmi.pdf
5. Pravila klassifikatsii i postroiки morskikh sudov – Rossiyskiy morskoi registr sudohodstva, tom 2, 2003. – 618 s. - ISBN 5-89331-085-3 – URL: http://old.msun.ru/folders/edu_lit/kaf/sv/data/addition/Registr/Registr.pdf
6. Maughan C. V., 2005. ‘Root-cause diagnostics of generator service failures’. Electrical Insulation, 1988, Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on (IEEE Int Symp Electr Insul). URL: https://www.researchgate.net/publication/224622606_Root-cause_diagnostics_of_generator_service_failures.
7. Chetvergov V. A. et al. Technicheskaya diagnostika lokomotivov / Chetvergov V. A., Ovcharenko S. M., Bukhteev V. F. // pod red. V. A. Chetvergova. – M.: FGBOU “Uchebno-metodicheskiiy centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte”, 2014. – 371 s. - ISBN 978-5-89035-752-6.
8. Zaichenko S. et al. Determination of autonomous electrical energy source technical condition based on an internal combustion engine //2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – IEEE, 2020. – C. 305-308.
9. Zaichenko S. et al. Autonomous electric power source energy efficiency improvement by internal combustion engine gases distribution control //2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – IEEE, 2020. – C. 262-265.
10. Zaichenko S. et al. Determination of the Diagnostic System Inertial Parameters for Power Generating Station Combustion Engine //2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – IEEE, 2019. – C. 88-91.

Надійшла 28.10.2020
Received 28.10.2020

В.В. Михайленко, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-0973-4612

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

В.І. Бачинський, студент

Національний технічний університет України

”Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ У ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ОДИНАДЦЯТИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

Метою роботи є використання методу багатопараметричних функцій з використанням пакету MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами. У цій статті проведено аналіз електромагнітних процесів в електричних колах напівпровідниковими з комутаторами. Створено математичну модель для аналізу електромагнітних процесів в напівпровідникових перетворювачах з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги. Наведено графіки, що відображають електромагнітні процеси у електричних колах. Стаття присвячена розвитку метода багатопараметричних функцій шляхом розроблення нових математичних моделей та визначення функцій і алгоритмічних рівнянь для аналізу за підсистемними складовими електромагнітних процесів у розгалужених електричних колах з напівпровідниковими комутаторами і ланками з синусоїдальними, постійними і імпульсними напругами. Напівпровідникові комутатори можуть виконувати високочастотне змінення структури електричних кіл і широтно-імпульсну модуляцію фазних і лінійних напруг трифазної мережі електроживлення, виконуючи регулювання вихідних напруг напівпровідникових перетворювачів параметрів електричної енергії.

Ключові слова: електромагнітні процеси, вихідна напруга та струм, багатопараметричні модулюючі функції, напівпровідникові комутатори, моделювання.

Здобутки у перетворенні енергії, а також розвиток напівпровідникової техніки дозволяють використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою перемикання вентилів значно більшою від частоти змінної напруги промислової мережі. Розвиток напівпровідникової техніки дозволяє використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою перемикання вентилів значно більшою від частоти змінної напруги промислової мережі. В тих випадках, коли за вимогами навантаження необхідно забезпечити його гальванічну розв'язку з енергетичною мережею при багатозонному регулюванні вихідної напруги, в якості проміжних структур доцільно використовувати структури перетворювачів частоти з однократною модуляцією (ПЧ з ОМ). У [1-3] показана доцільність використання структур ПЧ з ОМ в діагностичних комплексах електромеханічних систем для побудови вторинних джерел живлення з різним видом вихідної енергії. У даній роботі проводиться аналіз використання тієї самої структури в якості ланки високої частоти перетворювачів трифазної напруги в постійну при підключенні силових модуляторів (СМ) до лінійних проводів енергетичної мережі і широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) постійної напруги при двадцятичотиризонному керуванні. Таке з'єднання дозволяє покращити форму вхідних струмів перетворювача за рахунок відсутності в них гармонік, які кратні трьом.

Узагальнена структурна схема перетворювача показана на рис. 1. На структурній схемі позначені: СМ_{AB}, СМ_{BC}, СМ_{CA} – силові модулятори відповідних лінійних напруг, сукупність яких представляє собою ланку високої частоти перетворювача, ВВ – високочастотний випрямляч, Н – навантаження. Кожний з СМ складається з N інверторів випрямленої напруги (ІВН), які включені енергетичними входами паралельно і навантажені на узгоджувальні трансформатори (ТВ), сполучені вторинними обмотками послідовно.

При складанні математичної моделі перетворювача використаємо метод багатопараметричних модулюючих функцій [2], який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача. При цьому приймемо такі припущення: вхідна енергетична мережа симетрична і її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди ІВН представляються ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори в кожній з зон регулювання вихідної не мають втрат, а навантаження перетворювача має еквівалентний активно-індуктивний характер.

Дана структура дозволяє реалізувати багатоканальний спосіб перетворення параметрів електромагнітної енергії мережі, при якому в СМ здійснюється розгалужена модуляція миттєвих значень

лінійних напруг трифазної енергетичної мережі, частоти ω_1 , відповідними еквівалентними модулюючими впливами $\psi(\alpha_p, t)$, частоти ω_2 .

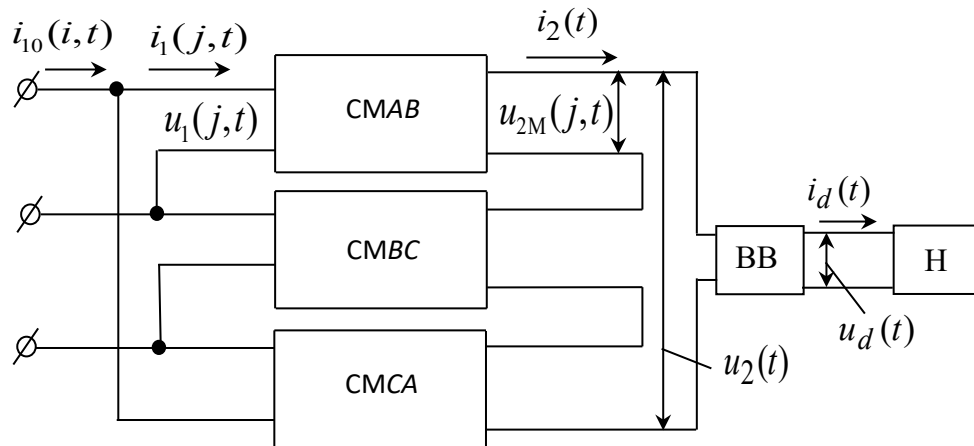


Рис. 1. Структурна схема перетворювача

В результаті такої операції на виході кожного з ІВН формується промодульована напруга

$$u_{2M}(p, j, t) = \frac{1}{k_T} u_1(j, t) \phi(j, t) \psi(\alpha_p, t), \quad (1)$$

де: $j = 1, 2, 3$ – номери лінійних напруг енергетичної мережі, відповідно AB, BC, CA ; k_T – коефіцієнти трансформації узгоджувального трансформатора; $p = 1, 2, 3, \dots, n$ – номер зони регулювання вихідної напруги, збігається з номером інвертора СМ; $\phi(j, t)$ – функції прямокутних синусів, які співпадають за положенням в часовій області з відповідними лінійними напругами мережі:

$$\phi(j, t) = \text{sign} \left\{ \sin \left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6} - \frac{(j-1)2\pi}{3} \right) \right\}; \quad (2)$$

де: $u_1(j, t)$ – миттєві значення лінійних напруг енергетичної мережі:

$$u_1(j, t) = U_{1m} \sin \left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6} - \frac{(j-1)2\pi}{3} \right); \quad (3)$$

U_{1m} – амплітудне значення фазної напруги.

Еквівалентні модулюючі впливи подамо виразом

$$\psi(\alpha_p, t) = \frac{1}{2} \sum_2 \text{sign}(\sin(\omega_2 t \pm \alpha_p(t) - \phi)), \quad (4)$$

де $\alpha_p(t)$ – кути управління, за рахунок зміни яких забезпечується ШПР вихідної напруги перетворювача; ϕ – початкова фаза еквівалентних модулюючих впливів.

При багатозонному регулюванні вихідної напруги перетворювача забезпечується почергово зміна кутів управління в діапазоні від 0 до 90° . Умови зміни кутів управління у окремих зонах подамо у вигляді:

$\alpha_p(t) = 0$, якщо $t < \frac{(p-1)T}{N=11}$; $\alpha_p(t) = 180^\circ$, якщо $t > \frac{pT}{N=11}$, а інакше $\alpha_p(t) = f_\mu(p, 11, t)$, де

$f_\mu(p, 11, t)$ – функція, яка задає закон зміни $\alpha_p(t)$, яка залежить від номера зони p і їх кількості

Вихідну напругу $u_2(t)$ ланки високої частоти перетворювача, згідно з його структурною організацією і з виразом (1), запишемо сумою

$$u_2(t) = \sum_{p=1}^{N=11} \sum_{j=1}^3 \frac{1}{k_T} u_1(j, t) \phi(j, t) \psi(\alpha_p, t), \quad (5)$$

а вихідну напругу перетворювача $u_d(t)$ як випрямлену напругу (6) подамо виразом

$$u_d(t) = \sum_{p=1}^{N=11} \sum_{j=1}^3 \frac{1}{k_T} u_1(j,t) \phi(j,t) \psi(\alpha_p, t) v(t), \quad (6)$$

де: $v(t)$ – функція прямокутного синуса, що співпадає за часом з положенням вихідної напруги $u_2(t)$ ланки високої частоти перетворювача

$$v(t) = \text{sign}(u_2(t)). \quad (7)$$

Часові діаграми вихідних напруг ІВН $u_{2M}(p, j, t)$, ланки високої частоти $u_2(t)$ і перетворювача $u_d(t)$, побудовані за (5) і (6) при зміні величини кута управління α_p по лінійному закону в координатах від часу t , подані на рис. 3.

Для більш детального аналізу вихідної напруги перетворювача в (5) позначимо $u_1(j,t) \phi(j,t) = |u_1(j,t)|$ і, враховуючи (3) та (4), а також те, що в (6) $\psi(\alpha_p, t) v(t) = |\psi(\alpha_p, t)|$, алгоритмічне рівняння перепишемо у вигляді

$$u_d(t) = \frac{1}{2k_T} \sum_{p=1}^{N=11} \left(\sum_{j=1}^3 U_{1m} \sin(\omega_1 t + \frac{\pi}{6} - \frac{(j-1)2\pi}{3}) \left| \sum_2 \sin n(\omega_2 t \pm \alpha_p(t) - \varphi) \right| \right). \quad (8)$$

Струм навантаження знайдемо як реакцію одноконтурного RL -ланцюга на дію напруги (6). Для цього диференціальне рівняння, складене для вихідного контуру перетворювача, представимо у вигляді

$$D(t, y) = \frac{u_d(t)}{L} - \frac{R}{L} y_0, \quad (9)$$

де: y_0 – визначається з початкових умов; R і L – відповідно активний опір та індуктивність навантаження.

Рішення (9) відносно струму навантаження визначимо числовим методом у вигляді матриці

$$i_d(t) = \text{rkfixed}(y, 0, k, s, D), \quad (10)$$

де: y – вектор початкових умов; $0, k$ – часовий інтервал рішень; s – кількість точок на часовому інтервалі рішень; D – вектор функція диференціальних рівнянь.

Часові діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача і вихідного струму ланки високої частоти для двадцятизонного регулювання представлені на рис. 2.

Враховуючи ту обставину, що на інтервалах нульових пауз (7) струм навантаження підтримується в контурі навантаження і діодів ВВ за рахунок енергії, яка запасується в індуктивності за попередні цикли роботи перетворювача і з енергетичної мережі не споживається, то для визначення вихідного струму $i_2(t)$ ланки високої частоти достатньо (10) перемножити на функцію (7), що має одиничну амплітуду і співпадає за часом з (6). Тоді

$$i_2(t) = i_d(t) v(t) \quad (11)$$

Для визначення вхідних струмів інверторів кожної p -ї зони регулювання врахуємо, що $i_2(t)$ протікає в загальному контурі всіх СМ, утвореному послідовно з'єднаними вторинними обмотками узгоджувальних трансформаторів і приймемо до уваги алгоритмічне рівняння (6) і те, що (2), (4) і (7) є функціями одиничної амплітуди.

При цьому у загальному вигляді

$$i_1(n, j, t) = \frac{i_2(t) \psi(\alpha_p, t) \phi(j, t)}{k_T} \quad (12)$$

Для визначення вхідних СМ у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги підсумуємо вхідні струми відповідних ІВН. Враховуючи (12), загальний вираз для вхідних струмів СМ подамо у вигляді

$$i_1(j, t) = \sum_{p=1}^{N=11} i_1(p, j, t), \quad (13)$$

де: $i_1(p, j, t)$ – вхідні струми ІВН.

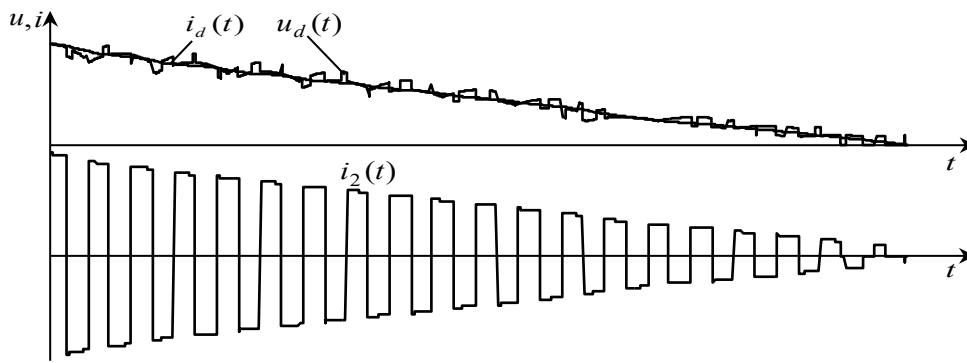


Рис. 2. Часові діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача і вихідного струму ланки високої частоти

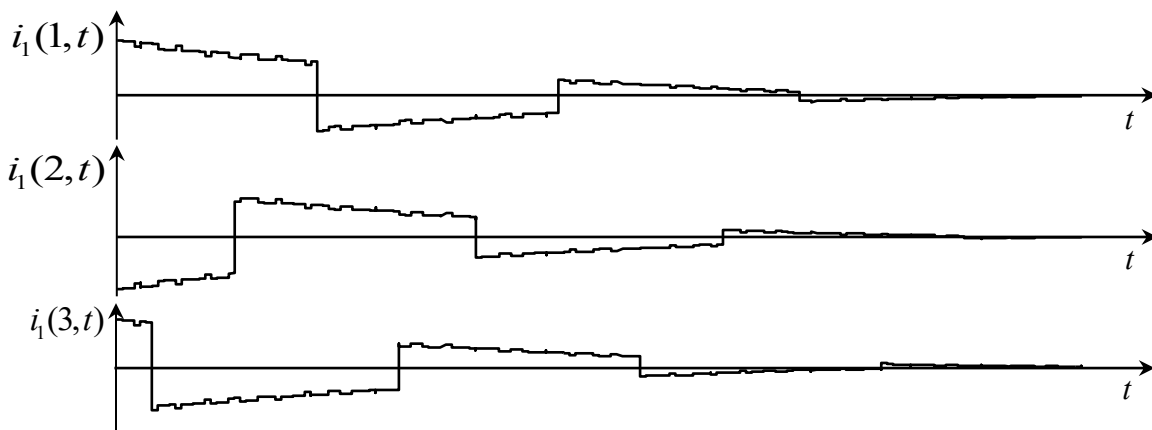


Рис. 3. Часові діаграми вхідних струмів відповідних СМ

Часові діаграми вхідних струмів i -х фаз енергетичної мережі в координатах фазних напруг, побудовані за (14), представлені на рис. 4.

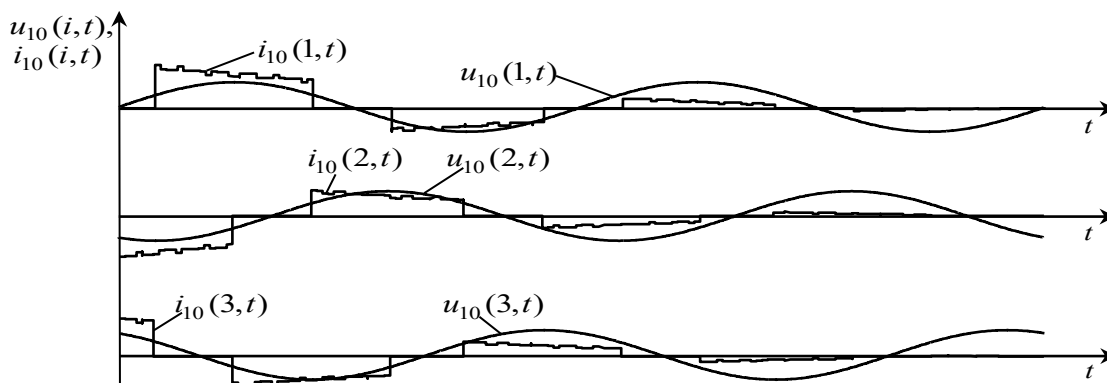


Рис. 4. Часові діаграми вхідних струмів та напруг i -х фаз енергетичної мережі

Часові діаграми вхідних струмів відповідних СМ, побудовані за (13), представлені на рис. 3.

Вхідні струми перетворювача знаходимо зі співвідношень

$$i_{10}(1,t) = i_1(1,t) - i_1(3,t)$$

$$i_{10}(2,t) = i_1(2,t) - i_1(1,t)$$

$$i_{10}(3,t) = i_1(3,t) - i_1(2,t) \quad (14)$$

Таким чином, наведені результати досліджень показують ефективність подання математичної моделі перетворювача відносно напруги навантаження, струму навантаження і струмів, що споживаються з вхідної мережі, узагальнюючими функціями багатопараметричного виду. Узагальнюючі функції багатопараметричного виду ефективні й для інших перетворювачів модуляційного типу.

Дослідження показують ефективність використання багатопараметричних модулюючих функцій для моделювання і розрахунку електромагнітних процесів у розгалужених електричних колах напівпровідникових перетворювачів з багатозонним високочастотним широтноімпульсним регулюванням їх вихідної напруги при живленні RL-навантаження.

Висновки. Підтверджено доцільність використання програмного пакету MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів та оптимізації параметрів напівпровідникових перетворювачів. Такий підхід дозволяє зменшити нестабільність режимів у технологічному навантаженні та режимів споживання електроенергії від мережі електроживлення.

Список використаної літератури

1. Mykhailenko V, Mikhnenko., G., Charnyak O., “Study of the electromagnetic processes in converter with three zoned regulations of the voltage”, Адаптивні системи автоматичного управління, Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, №2, 2019, С. 48-53, doi: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.35.2019.197430>.

2. Розіскулов С. С., Михайленко В. В., Перетятко Ю. В., “Регулювання тривалості перехідних процесів у напівпровідникових формувачах біполярних розрядних імпульсних струмів”, Технічна електродинаміка, Київ: ІЕД НАНУ, № 4, 2016, С. 41 – 43, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.041>.

3. Сенько В. І., Михайленко В. В., Юрченко М. М., Юрченко О. М., Чуняк Ю. М., “Аналіз електромагнітних процесів у колах з напівпровідниковими перетворювачами з сімнадцятизонним регулюванням вихідної напруги”, Технічна електродинаміка, Київ: ІЕД НАНУ, № 5, 2016, С. 23 – 25, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.023>.

V. Mihaylenko, Ph.D. tech. Science, assistant professor, ORCID 0000-0002-0973-4612

J. Chuniyak, assistant teacher, ORCID 0000-0002-4506-912X

V. Bachinskiy, student

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

ANALYSIS OF PROCESSES IN CONVERTER WITH ELEVEN ZONE REGULATION OUTPUT VOLTAGE

Analysis of the electromagnetic processes is organized beside this article in electric circuit with semiconductor commutator. Mathematical model is created for analysis electro-magnetic processes in semiconductor converter with width pulsed regulation of the output voltage. The broughted graphs, which reflect the electromagnetic processes in electric circuit. Method much parametric functions was used when performing calculation. The mathematical model of the converter is created for eleven zoned regulations of the output voltage. Article is devoted to the development of a method of multi-parametric modulating functions by means of working out of new mathematical models and definition of functions and the algorithmic equations for the analysis on subsystem components of electromagnetic processes in electric circuits of variable structure with sinusoidal, direct and pulsing voltage. Introduction of functions with discrete parameters in the algorithmic equations for analysis of processes in circuits with semiconductor commutators simplifies modeling on subsystem components. The mathematical model of steady-state processes and transients in electric circuits of semiconductor converters of modulation type with multi-channel zonal use of phase and line voltages of a three-phase network of power supplies is developed. The mathematical model of electric circuits of thyristor shapers of electro-discharge pulses for the analysis and the matching of capacitors charging modes with decrease several times of electric resistance of technological load is also created. The obtained results have a great value for development theoretical electrical engineering in a direction of simplification of calculations of electromagnetic processes in electric circuits with semi-conductor converters of the electric power. The Electromagnetic processes in electric circuit under width-pulse regulation possible to analyse with use the algorithmic equations multivariable function, which argument are a system parameters semiconductor commutator, signal of control, phases to network of the power supply and time. Introduction multivariable function with discrete parameter in algorithmic equations of the analysis formed and connecting processes in electric circuit of the variable structure allows to reflect change of this structure under system components, simplifying modeling and analysis of such processes to account of the generalization of the got

equations. Except specified correlations and diagrams designed model allows to analyse forms of the output voltages and current of the separate power modules.

Keywords: electromagnetic processes, output voltage and current, multi parametric modulating functions, semi-conductor commutators, modeling.

REFERENCES

1. Mykhailenko V, Mikhnenko, G., Charnyak O., “Study of the electromagnetic processes in converter with three zoned regulations of the voltage”, Adaptive systems of automatic control, Kyiv: KPI them. Igor Sikorsky, №2, 2019, pp. 48-53, doi: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.35.2019.197430>.
2. Roziskulov SS, Mykhaylenko VV, Peretyatko Yu. 43, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.041>.
3. Senko VI, Mykhailenko VV, Yurchenko MM, Yurchenko OM, Chynyak Yu. M., “Analysis of electromagnetic processes in circuits with semiconductor converters with seventeen-zone output voltage regulation”, Technical electrodynamics, Kyiv: IED NASU, № 5, 2016, P. 23 - 25, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.05.023>.

Надійшла 30.10.2020
Received 30.10.2020

В.М. Сліденко, доктор техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-9313-331X
С.П. Шевчук, доктор техн. наук, професор, ORCID 0000-0002-7517-0501
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНА АДАПТИВНА ГІДРОІМПУЛЬСНА СИСТЕМА

Наведено результати досліджень функціонування електрогідролічної адаптивної гідроімпульсної системи з визначенням оптимального діапазону енергії зарядки гідропневмоакумулятора. На основі ряду Тейлора синтезовано диференціально-різницеви перетворення та сформовано і реалізовано на ЕОМ ітераційний цикл для розрахунку руху бойка гідромолота, який характеризується залежностями, що відображають динамічні процеси у відповідності до циклограми функціонування гідромолота. Встановлений діапазон регулювання енергії зарядки в залежності від ходу спряжених бойка і клапана в межах 1,7...3,05 кДж; та об'єму камери пневмоакумулятора 2,6...3,05 кДж. Максимальні значення діапазонів регулювання, відповідно: 1,35 кДж та 0,45 кДж. Для визначення параметрів керування процесом адаптації експериментально, в межах промислових випробувань варіанту гідроімпульсної системи впливу на колектор нафтової свердловини, встановлено, що стабілізація коливань від імпульсної дії, в залежності від умов робочого середовища, досягається за час 10-15 с. Розроблена електрогідролічна адаптивна гідроімпульсна система рекомендується до впровадження у виробництво.

Ключові слова: адаптація, електрогідролічна система, ряд Тейлора, ітерація, пневмоакумулятор, гідроімпульсна система, діапазон регулювання.

Вступ. Підвищення продуктивності електромеханічних комплексів, збільшення надійності й довговічності їхніх вузлів, зниження енерговитрат, необхідних для руйнування породи, досягається в основному за рахунок збільшення потужності машин та підвищення ефективності їх виконавчих органів. Значним фактором підвищення потужності є застосування комплексів з електрогідролічним приводом та імпульсним виконавчим органом, які застосовуються в різноманітних галузях промисловості України: гірничій, будівельній, нафтогазовій та інших. Одним із напрямків розробки нових та вдосконалення існуючих імпульсних виконавчих органів для руйнування гірських порід, вугілля та мерзлих ґрунтів є технології із застосуванням комплексів з електрогідроприводом та виконавчих органів імпульсної дії на робоче середовище. Ефективність таких комплексів досягається поєднанням конструктивних, енергетичних і технологічних параметрів адаптивного електрогідроприводу та імпульсних виконавчих органів з забезпеченням їх функціонування як єдиної гідроімпульсної системи (ГІС) [1-3].

Аналіз результатів промислового застосування показує, що ГІС досить ефективно забезпечують руйнування гірських порід та знеміцнення колекторів нафтових свердловин різної міцності. Важливим фактором, що впливає на ефективність використання ГІС, є ефективність формування ударного імпульсу та передачі енергії одиничного удару в гірський масив. Проблема розподілу енергії в циклі роботи ГІС пов'язана з умовами та засобами керування процесом руйнування гірських порід та адаптації до умов робочого середовища.

Основним виконавчим елементом ГІС є машина ударної дії – гідромолот. Аналіз сучасних систем енергозбереження та адаптації машин ударної дії до умов робочого середовища виявляє, що більшість фірм-виробників ГІС прагнуть вирішити проблему адаптації елементів ГІС з метою енергозбереження та підвищення коефіцієнта корисної дії гідромолотів. Основні фірми, які застосовують засоби та системи адаптації: “Krupp” (Німеччина), “Atlas Copco” (Швеція), “Komatsu” (Японія), “Caterpillar” (США) та інші, розробили системи, які в сукупності спроможні адаптувати гідромолот до робочого середовища.

Так система адаптації *AutoControl* гідромолотів фірми “Krupp” – автоматична система керування частотою й енергією удару залежно від конкретних умов роботи. Система *AutoControl* при кожному ударі “оцінює” твердість породи й перемикає спеціальний гідравлічний клапан між режимами максимальної енергії удару при повному ході поршня (при руйнуванні твердої породи) і максимальної частоти удару при короткому ході (при руйнуванні крихкої породи) [1; 2]. Недоліком зазначеної системи є дискретність регулювання між режимами максимальної енергії удару і, відповідно, не врахування поточних випадкових значень міцності гірських порід, а також відокремленість системи від гідроприводу базової машини в цілому.

Мета та завдання. Метою роботи є вдосконалення структури гідравлічної імпульсної системи (ГІС) з електрогідприводом та оцінка ефективності застосування модулів адаптації до умов робочого середовища при руйнуванні гірського масиву та знеміцнення нафтового колектору.

Для досягнення мети слід встановити принципову можливість адаптивного керування енергією удару в залежності від умов робочого середовища, визначити структуру механізму адаптації та раціональні діапазони розподілу тисків зарядки пневмоакумулятора.

Матеріал і результати досліджень.

В КПІ ім. Ігоря Сікорського розроблена електрогідравлічна система приводу гідромолота з модулями адаптації до умов робочого середовища (руйнування гірських порід (рис.1) та ГІС для знеміцнення колектору гірського масиву при проведенні капітального ремонту нафтових свердловин) [4; 5].

Величина вкорінення інструменту u_1 залежить від міцності гірської породи. При зменшенні

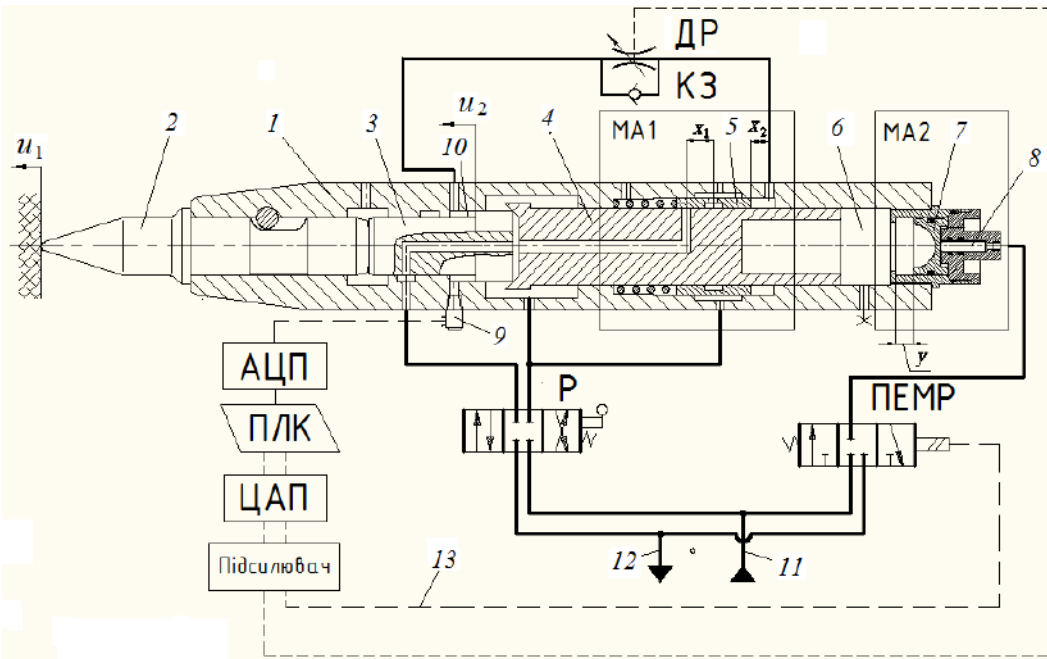


Рис. 1. Електрогідравлічна адаптивна гідроімпульсна система: 1 - корпус, 2- інструмент, 3- бойок, 4- клапан, 5 - втулка, 6- камера акумулятора, 7- поршень блоку адаптації, 8 - шток, 9 - датчик тиску, 10 - камера демфера, 11 – лінія нагнітання, 12 – лінія зливу, 13 – електролінії; ДР – дросель регульований, КЗ – клапан запобіжний, Р – розподілювач, ПЕМР – пілотний електромагнітний розподілювач, АЦП – аналогово-цифровий перетворювач, ПЛК – програмований логічний контролер, ЦАП – цифрово-аналоговий перетворювач, МА1, МА2 – модулі адаптації

міцності, величина u_1 збільшується і відповідно збільшуються робочий хід x_1 бойка та 3 його швидкість в камері демфера 10 з наступною дією частини імпульсу на корпус 1 (рис1).

Це призводить до надмірних енергетичних втрат і динамічного навантаження на корпус і, відповідно, привод.

При збільшенні передударної швидкості в камері демфірування підвищується тиск, який реєструється датчиком тиску. Інформація передається на ПЛК, обробляється, генерується керуючий сигнал і передається на регульований дросель ДР (МА1) та пілотний електромагнітний клапан ПЕМК (МА2). Регульований дросель дозовано пропускає рідину під торець підпружиненого клапана, регулюючи величину ходу зведення спряжених бойка і клапана, впливаючи на величину зарядки пневмоакумулятора 6. В свою чергу ПЕМК перемикає потік з-під торця штока 8 модулю адаптації МА2 на злив. В результаті, поршень під дією газу в акумуляторі переміщується, що призводить до збільшення об'єму камери акумулятора і, відповідно, до зменшення ступеню стиснення в ньому газу, а отже і енергії зарядки акумулятора. Встановлена залежність енергії зарядки пневмоакумулятора від переміщення спряжених бойка і клапана [1], яка залежить від положення втулки 5 і відповідно $x = x_1 + x_2$, а також від положення поршня 7, відповідно у:

$$L(x, y) = \frac{p_{a0} V_{a0}}{n-1} \left(e(x, y)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right), \quad (1)$$

де p_{a0}, V_{a0} - відповідно початкові тиск зарядки та об'єм акумулятора, n - показник політропи, $e(x, y)$ - ступінь стиснення газу в акумуляторі,

$$e(x, y) = p_a(x, y) / p_{a0}, \quad (2)$$

$$p_a(x, y) = p_{a0} \cdot \left(\frac{V_{a0} + S_n \cdot y}{V_{a0} - S_{um} \cdot x + S_n \cdot y} \right)^n, \quad (3)$$

$p_a(x, y)$ – поточне значення тиску в акумуляторі, S_{um}, S_n – площі торців відповідно клапана 4 та поршня 7.

На основі ряду Тейлора синтезовано диференціально-різницеви перетворення та сформовано і реалізовано на ЕОМ (С++) ітераційний цикл для розрахунку руху бойка гідромолота, який характеризується залежностями:

$$x_{i+1} = x_i + dx_{i+1}; \quad (4)$$

$$dx_{i+1} = v_i dt + (4a_i - a_{i-1}) dt^2 / 6; \quad (5)$$

$$t_{i+1} = t_i + dt, \quad (6)$$

де x, dx, v, a, dt – відповідно переміщення, крок переміщення, швидкість та прискорення бойка за час t з кроком dt . З урахуванням залежностей (1 – 6) сформовано обчислювальний ітераційний процес, в якому послідовно реалізуються рекурентні залежності за початковими умовами відповідно для швидкості, прискорення та часу: $v_0 = 0; a_{-1} = 0; t_0 = 0$. На кожній ітерації формуються нові початкові значення за кінцевими значеннями попередньої. В процесі обчислень на ЕОМ передбачено в автоматизованому режимі виведення діагностичних повідомлень в діалоговому режимі.

Моделюванням визначені основні параметри процесу зведення та розгону бойка в залежності від величини робочого ходу бойка. Встановлені раціональні параметри ГПС з гідромолота типу ГПМ виробництв заводів “Атек” та “Борекс” (Україна). Для ГПС з гідромолотом ГПМ 300А вхідні параметри: $V_{a0} = 0,0169 \text{ м}^3; S_n = 0,0227 \text{ м}^2; S_{um} = 0,0272 \text{ м}^2; p_{a0} = 1,0 \text{ МПа}; n = 1,3$. Моделювання процесу зарядки пневмоакумулятора за встановленими залежностями для значень $0 \leq x \leq 0,1 \text{ м}; 0 \leq y \leq 0,082 \text{ м}$ визначені характеристики (рис. 2) та визначені діапазони регулювання енергії удару модулями адаптації М1 та М2 відповідно $1,7 \leq \Delta L_1 \leq 3,05 \text{ кДж}; 2,6 \leq \Delta L_2 \leq 3,05 \text{ кДж}$. Максимальні значення $\Delta L_{1 \max} = 1,35 \text{ кДж}; \Delta L_{2 \max} = 0,45 \text{ кДж}$.

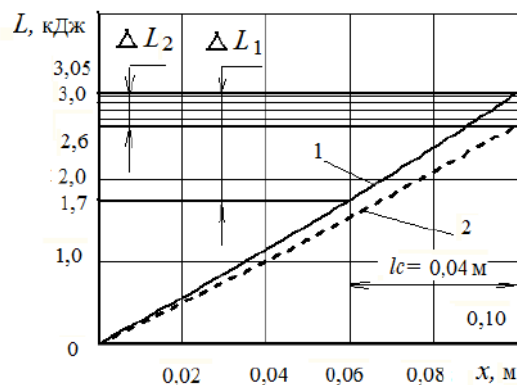


Рис.2. Характеристики зарядки пневмоакумулятора: 1 – без врахування впливу МА2 ($y=0$); з урахуванням впливу МА 2 ($y_{\max} = 0,082 \text{ м}$) та діапазони регулювання $\Delta L_1, \Delta L_2$

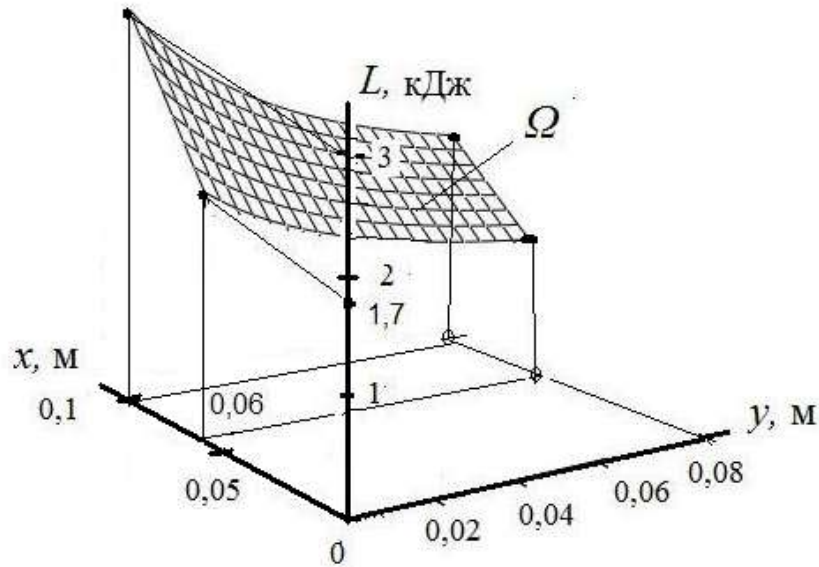


Рис.3. Формування поверхні Ω можливих оптимальних значень енергії удару ГІС для гідромолота ГПМ-300А

Настроювання адаптивної електрогідравлічної системи передбачає попереднє дослідження відгуку робочого середовища на одиночний імпульс з метою ідентифікації його параметрів, аналізу амплітудно-частотних характеристик та програмування параметрів генерації імпульсно-хвильових процесів ГІС.

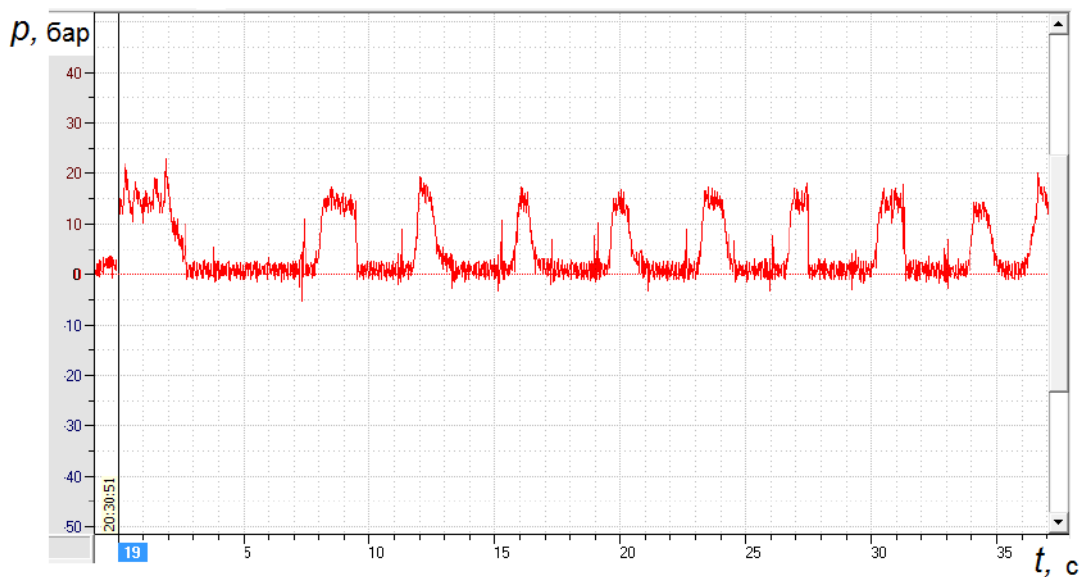


Рис. 4. Осцилограма процесу реакції робочого середовища - пластової системи на імпульсне навантаження

Отже, вплив модуля адаптації М1 з регулюванням ходу зведення ефективніший за вплив регулюванням об'єму камери пневмоакумулятора майже в 3 рази. Комбінуванням взаємодії модулів М2 та М1 можливо досягнення оптимального регулювання. При цьому алгоритм керування ГІС за допомогою електрогідропривода з ПЛК повинен забезпечити максимальний діапазон регулювання енергії удару:

$$L_{onm}(t) = \arg \max_{u \in Q} \tilde{Q}[L/I(t)], \quad (7)$$

де Q - задана область допустимих сигналів датчиків системи керування енергією ударів за співвідношенням величини вкорінення u_1 інструменту в гірський масив та значенням енергії удару; $I(t)$ - наявна в поточний момент часу апостеріорна інформація про характер зміни тиску в камері демпфера (за допомогою датчика тиску) в процесі руйнування гірського масиву в проміжку часу (t_0, t) ; $\tilde{Q}[L/I(t)]$ - прогноз (оцінка) в момент t значення параметрів, з виробленням сигналів ПЛК для керування модулями МА1 та МА2 (рис.1). Поверхня Ω можливих оптимальних значень енергії зарядки, яка відповідає необхідній енергії удару за умови адаптації до міцності робочого середовища, з урахуванням залежностей (1-6) та критерію (7) наведена на рис.3.

Експериментальними дослідженнями, в межах промислових випробувань варіанту ГІС для підвищення дебіту нафтової свердловини з генерацією пробного одиночного імпульсу та з наступним затуханням відбитої хвилі від вибою свердловини, встановлено, що стабілізація коливань від імпульсної дії, в залежності від технологічних умов робочого середовища досягаються за час в межах 10-15 с (рис. 4) [6].

Проведена промислова апробація елементів адаптивної електрогідравлічної системи за умов сервісних компаній "Азгард" (Україна), "УкрКарпатОйл ЛТД" (Україна, США), "Plato" (Індонезія, технологія "Pulse Jet") та "Ренфорс", (Росія) на протязі 2001 – 2013 років підтверджує ефективність системи для свердловин глибиною до 3500 м з проникливістю колекторів не менше 10 мД, густиною флюїдів 600...900 кг/м³, в'язкістю 1...5 мПа. В результаті обробки добувних малодобітних нафтових свердловин, дією ГІС безпосередньо з поверхні, на протязі восьми годин досягалось підвищення продуктивності видобутку на 20...30% [7].

Висновки та рекомендації для подальших досліджень.

Розроблена електрогідравлічна система з модулями адаптації до умов робочого середовища для руйнування гірських порід та ГІС для знеміцнення колектору гірського масиву при проведенні капітального ремонту нафтових свердловин та встановлені їх імпульсні та енергетичні характеристики.

Для адаптивної ГІС з гідромолотом синтезована диференціально-різницева модель функціонування двох модулів адаптації з електрогідроприводом та виявлена необхідність в комплексному керуванні адаптацією за допомогою ПЛК з урахуванням швидкоплинних процесів при роботі основного елемента ГІС – гідромолота.

Моделюванням встановлений діапазон регулювання енергією зарядки від ходу спряжених бойка і клапана в межах 1,7...3,05 кДж; та об'єму камери пневмоакумулятора 2,6...3,05 кДж. Максимальні значення діапазонів регулювання, відповідно: 1,35 кДж та 0,45 кДж.

В межах промислової апробації варіанту електрогідравлічної гідроімпульсної системи для безпосередньої дії з поверхні на пластову систему нафтової свердловини проведено дослідження та встановлений час стабілізації коливань в межах 10-15 с, що важливо для визначення параметрів керування процесом адаптації. В результаті обробки добувних малодобітних нафтових свердловин, дією ГІС безпосередньо з поверхні, на протязі восьми годин досягалось підвищення продуктивності видобутку на 20...30% .

Список використаної літератури

1. Стабілізація функціонування гірничої машини з імпульсним виконавчим органом: монографія/ В.М. Сліденко, С.П. Шевчук. - К.: НТУУ "КПІ", 2010. - 192 с.
2. Сліденко В.М., Шевчук С.П., Замараєва О.В. Лістовщик Л.К. Адаптивне функціонування імпульсних виконавчих органів гірничих машин: монографія. -К.: НТУУ "КПІ", 2013. -180 с.
3. Сліденко В.М. Математичне моделювання ударно-хвильових процесів гідроімпульсних систем гірничих машин: монографія / В.М. Сліденко, О. М. Сліденко – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во "Політехніка", 2017. – 220 с.
4. Шевчук С.П., Сліденко В.М., Лістовщик Л.К. Пристрій для розробки міцного ґрунту або гірських порід. Деклараційний патент на корисну модель. № 13788 . Бюл. № 4, 17.04. 2006 р.
5. Патент 87080 Україна, МПК (2014.01), Е21В 28/00, В06В 1/20. Гідроударний пристрій/ Сліденко В.М., Шевчук С. П., Горна І. А., Калюш М. П.; заявник і власник патенту Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». - № u 201203640; заявл. 26.03.2012; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18.
6. Сліденко В.М., Лістовщик Л.К., Бут В.О. Адаптивна мехатронна система імпульсно-хвильової дії на гірський масив //Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XVI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів (м. Кременчук 12–13 квітня 2018 р.) Кременчук, КрНУ, 2018. С. 27-28.

7. Кононенко П.И., Слиденко В.М., Скачедуб А.А., Квитчук К.К. Результаты промышленных испытаний технологии инфрочастотно- волнового (ИЧВ) воздействия на пласт// Самара: Интервал. -2008.-№6. –С.56-57

V. Slidenko, Doctor of Techn Sciences. Associate Professor, **ORCID** 0000-0001-9313-331X
S. Shevchuk, Doctor of Techn Sciences, Professor, **ORCID** 0000-0002-7517-0501
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ELECTROHYDRAULIC ADAPTIVE HYDROPULSE SYSTEM

The results of researches of functioning of electrohydraulic adaptive hydropulse system with definition of optimum range of energy of charging of the hydropneumatic accumulator are resulted. Based on the Taylor series, differential-difference transformations were synthesized and an iterative cycle was calculated and implemented on a computer to calculate the motion of a hydraulic hammer, which is characterized by dependences that reflect dynamic processes in accordance with the hydrohammer operation cycle. The range of regulation of energy of charging depending on the course of the conjugated boi-ka and the valve within 1,7 ... 3,05 kJ is established; and the volume of the pneumatic accumulator chamber is 2.6 ... 3.05 kJ. Maximum values of control ranges, respectively: 1.35 kJ and 0.45 kJ. To determine the control parameters of the adaptation process experimentally, within the industrial tests of the variant of the hydropulse system of impact on the oil well collector, it was found that the stabilization of oscillations from the pulse action, depending on the working environment, is achieved in 10-15 s. The developed electrohydraulic adaptive hydropulse system is recommended for introduction into production.

Keywords: adaptation, electrohydraulic system, Taylor series, iteration, pneumatic accumulator, hydropulse system, control range.

REFERENCES

1. Stabilizatsiia funktsionuvannia hirnychoi mashyny z impulsnym vykonavchym orhanom: mo-nohrafiia/ V.M. Slidenko, S.P. Shevchuk. - K.: NTUU "KPI", 2010. - 192 s.
2. Slidenko V.M., Shevchuk S.P., Zamaraieva O.V. Listovshchik L.K. Adaptivne funktsionuvannia impulsnykh vykonavchykh orhaniv hirnychykh mashyn: monohrafiia.-K.: NTUU "KPI", 2013.-180 s.
3. Slidenko V.M. Matematychni modeliuvannia udarno-khvylovykh protsesiv hidroimpulsnykh system hirnychykh mashyn: monohrafiia / V.M. Slidenko, O. M. Slidenko – Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, Vyd-vo "Politekhnik", 2017. – 220 s.
4. Shevchuk S.P., Slidenko V.M., Listovshchik L.K. Prystirii dlia rozrobky mitsnoho hrunta abo hirskykh porid. Deklaratsiinyi patent na korysnu model. № 13788 . Biul. № 4, 17.04. 2006 r.
5. Patent 87080 Ukraina, MPK (2014.01), E21V 28/00, V06V 1/20. Hidroudarnyi prystrii/ Slidenko V.M., Shevchuk S. P., Horna I. A., Kaliush M. P.; zaiavnyk i vlasnyk patentu Natsiona-lnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «Kyivskyi politekhnichnyi instytut». - № u 201203640; zaiavl. 26.03.2012; opubl. 25.09.2012, Biul. №18.
6. Slidenko V.M., Listovshchik L.K., But V.O. Adaptivna mekhatronna systema impulsno-khvylovoi dii na hirskyi masyv //Elektromekhanichni ta enerhetychni systemy. Metody modeliuvannia ta optymizatsii. Zbirnyk naukovykh prats KhVI Mizhnarodnoi nauko-tekhnichnoi konfere-ntsii molodykh uchenykh i spetsialistiv (m. Kremenchuk 12–13 kvitnia 2018 r.) Kremenchuk, KrNU, 2018. C. 27-28.
7. Kononenko P.I., Slidenko V.M., Skachedub A.A., Kvitchuk K.K. Rezultaty promyishlennykh is-pyitaniy tehnologi infrochastotno- volnovogo (ICHV) vozdeystviya na plast// Samara: Interval. -2008.-#6. –S.56-57

Надійшла 15.11.2020
Received 15.11.2020

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

V. Nakhodov, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-7643-5965
O. Borychenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-6127-2945
A. Cherniavskiy, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2858-8224
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

THE METHODOLOGICAL ISSUES OF INDUSTRIAL ENERGY MONITORING SYSTEMS IMPLEMENTATION

Statistics show that energy is one of the highest operating costs in a manufacturing enterprise. So, improving energy efficiency can lead to a significant increase in profits and reduce the impact of the enterprise on the environment. To increase the performance of energy efficiency activities, it is necessary to implement an energy management system. One of the components of this system is energy monitoring, which, in turn, is based on the periodic collection and analysis of data to assess the state of the monitoring objects in terms of energy efficiency. In this paper, the role and place of energy monitoring in the energy management system of an industrial enterprise are noted. The paper proposes the concept of creating energy monitoring system in industrial companies, which is based on the combination of a monitoring system based on specific energy consumption, and usage of group energy characteristics of production facilities. Implementing such energy monitoring systems will allow to conduct operational control of energy efficiency of production facilities by creating individual systems for monitoring energy efficiency, as well as successfully carry out such monitoring at the enterprise and its subdivisions over longer periods of time using specific energy consumption indicators. It also provides general guidelines for conducting energy monitoring. These guidelines were formed based on the results of studying various methods and scientific publications in the field of energy monitoring, as well as on the basis of practical experience in the development and implementation of energy management systems. Particular attention is paid to the issues of processing and analysis of information about the objects of energy monitoring of industrial enterprises. The practical application of the concept of creating energy monitoring systems envisages gradual improvement of the existing monitoring system based on the specific energy consumption, which will be further completely replaced with individual energy efficiency monitoring systems.

Keywords: *energy baseline, energy efficiency, energy management system, energy monitoring system, specific energy consumption, specific energy consumption indicator.*

Introduction

One of the main factors that determine the production processes for a lot of industries is the cost of energy flows. It is noted that over 80% of energy needs in the industry are compensated by using fossil fuels. Cost reduction is considered as one of the critical elements in proper energy management, because energy savings reduce production costs and increase profits. Also, energy efficiency represents one of the key elements of sustainable development [1]. Energy conservation technology and facilities/equipment are only part of the approach to improve energy efficiency. Most energy efficiency in industry is achieved through changes in how energy is managed in a facility, rather than through installation of new technologies. Systematic management and the behavior approach have become the core efforts to improve energy efficiency today. That is why, organizations like the European Union (EU) have implemented several policies, strategies, and actions toward achieving a sustainable economy in fields like energy efficiency and renewable resources [2].

The modern reality of Ukraine is such that it has one of the highest specific indicators of environmental pollution and energy consumption per unit of production among the industrially developed countries of the world. So, the problem of energy saving and energy efficiency (EE) is one of the most urgent and its solution should be carried out taking into account the EU-Ukraine Association Agreement, which provides for the implementation of the requirements of Energy efficiency directive (Directive 2012/27 / EU) that established a set of binding measures to help the EU reach its 20% energy efficiency target by 2020 [3]. In 2018, as part of the «Clean energy for all

Europeans package», the new amending Directive on Energy Efficiency (2018/2002) was agreed to update the policy framework to 2030 and beyond. According to Article 8 of this Directive requires to ensure that large enterprises carry out regular energy audits or to implement an energy / environmental management system certified by an independent body according to the relevant European or International Standards [4].

The energy management system (EnMS) suggests a lot of benefits, such as reducing energy costs and the negative impact on the environment, optimizing energy consumption, improving the corporate image of the enterprise, etc. [1]. Efficient energy management requires the identification of where energy is used, where it is wasted and where any energy saving measures will have most effect. The key feature of a successful EnMS is that it is owned and fully integrated as an embedded management process within an organization, energy management implications are considered at all stages of the development process of new projects, and that these implications are part of any change control process [5].

In Ukraine, a set of standards in the field of energy management, in addition to the harmonized international standards mentioned above, also includes the following national standards [6]:

- DSTU 4472:2005 Energy saving. Energy management systems. General requirements;
- DSTU 4715:2007 Energy saving. Energy management systems of the industrial enterprises. The structure and contents of activities according to design and introduce phases;
- DSTU 5077:2008 Energy saving. Energy management systems for the industrial enterprises. Auditing and controlling of the efficiency of functioning;
- DSTU 4713:2007 Energy saving. Energy audit of industrial enterprises. The order of carrying out of and the requirements to the organization of works.

In 2011, the International Organization for Standardization (ISO) adopted the international standard ISO 50001:2011 (E) "Energy management systems - Requirements with guidance for use" and by now we have a set of international standards ISO 50001, ISO 50002, ISO 50006, etc., which are already implemented in Ukraine [6]. These standards provide support to enterprises in all sectors regarding a more efficient energy use, through the management model that contributes to the development and implementation of the energy policy in order to achieve the objectives and action plans, taking into account legal requirements and information resulting from the analysis and management energy consumption data [1].

In 2018, the International Organization for Standardization adopted the second edition of ISO 50001, which are already harmonized in Ukraine as DSTU ISO 50001:2020. The EnMS described in this standard is based on the Plan-Do-Check-Act (PDCA) continual improvement framework and incorporates energy management into existing organizational practices. Effective implementation of the requirements of DSTU ISO 50001:2020 provides a systematic approach to improvement of energy performance that can transform the way organizations manage energy. By integrating energy management into business practice, organizations can establish a process for continual improvement of energy performance. By improving energy performance and associated energy costs, organizations can be more competitive. In addition, implementation can lead organizations to meet overall climate change mitigation goals by reducing their energy-related greenhouse gas emissions [7].

Regardless of what standard the enterprises will be guided by when implementing EnMS for its effective functioning, it is necessary to make a periodically assessment (monitoring) of the energy performance of EnMS. Based on the monitoring results, development and implementation of a set of proactive and corrective measures to improve energy performance of EnMS should be made [6].

One of the essential conditions for achieving significant practical results in terms of energy saving is finding proper solution for quantification, monitoring and analysis of energy efficiency for different facilities (enterprises, organizations, institutions, their subdivisions, individual plants, processes, etc.).

Purpose and objectives. The purpose of the work is to increase the efficiency of energy monitoring of industrial enterprises. To achieve this goal the following tasks were solved:

- determination of the purpose and main tasks of the energy monitoring;
- formation of a complex of information and analytical tools that can be applied in practice for energy monitoring.

Material and research results

Concept of building integrated energy efficiency monitoring.

The increasing demand especially in energy intensive industrial sectors dictates the development of smart EnMS. Industrial customers need to understand their energy consumption for the purpose of reducing energy costs, improving company ecological profile, and suggestive feedback scheduling. For modern industrial company, where digitalization has turned the traditional concept of industry, energy systems should be equally sustainable, efficient and cutting edge [8].

According to works [9-11], energy monitoring is the observation, tracking, analysis and assessment of the performance of an object in the field of energy efficiency (energy management) according to a set of energy efficiency indicators. Moreover, in general, these indicators should be: specific, affordable (the calculation of the

indicator should not require significant costs), easy to understand (it is necessary to understand what the given value of the indicator means), measurable, relevant (capable of accurately reflecting the process or purpose) and associated with a certain period of time.

Among the main requirements of the standard DSTU ISO 50001:2020, we can single out those that relate to the topic of this publication (see Fig. 1).

The monitoring of energy, water and gas usage by dedicated applications, allows to analyze each phase of the production process and plan potential action to improve energy efficiency useful for optimizing costs and business energy consumption. To address this issue, different industrial energy monitoring systems are developed [8]. The most popular of them are: GE Platform Advanced EMS, GE Industrial Energy Management Systems; ABB Industrial energy monitoring and reporting software; "Green Factory – Energy efficiency" software package from Festo; Advantech Factory Energy Management System; PowerMonitor 1000&5000 from Rockwell Automation; VerveTronics Imagineering’s Industrial energy monitoring; Industrial IoT Platform from EPISENSOR and many others.

THE REQUIREMENTS OF THE STANDARD DSTU ISO 50001:2020 THAT ARE RELEVANT TO ENERGY MONITORING		
TOP MANAGEMENT	ORGANIZATION	ENERGY PLANNING
<p>Top management shall demonstrate its commitment and support the EnMS and to continually improve its effectiveness by:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identifying the scope and boundaries to be addressed by the EnMS; • Ensuring that energy performance indicators (EnPIs) are appropriate to the organization; • Considering energy performance in long-term planning; • Ensuring that results are measured and reported at determined intervals 	<p>The organization shall:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ensure that the key characteristics of its operations that determine energy performance are monitored, measured and analyzed at planned intervals; • Ensure that the equipment used in monitoring and measuring of key characteristics provides data which is accurate and repeatable. 	<p>Energy planning shall:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analyze energy use and consumption based on measurement and other data; • Based on the analysis of energy use and consumption, identify the areas of significant energy use; • Identify, prioritize and record opportunities for improving energy performance; • Establish an energy baseline(s) using the information in the initial energy review; • Identify EnPIs appropriate for monitoring and measuring its energy performance

Figure 1 – The main requirements of the standard DSTU ISO 50001:2020 that relate to the topic of the publication

The main benefits of such monitoring systems are:

- reduce costs;
- improve performance;
- identify and explain excessive energy use;
- increase productivity and competitiveness;
- monitoring the consumption via Web or Phone;
- flexible reporting and alerts;
- easy reporting.

With the advantages of these devices, solutions and hardware-software integration - it’s now possible to foster the development of Industry 4.0.

In general, energy monitoring can provide solutions different tasks. These tasks significantly depend on the purpose, the object and the subject of the energy monitoring. Monitoring tasks can include [9]: the monitoring of timeliness and quality of fulfillment of implementation plan of energy saving measures and energy saving programs; the monitoring of the achievement of targets energy efficiency and energy performance indicators; the monitoring of implementation of corrective and preventive actions and so on.

The process of creation and operation of an industrial energy monitoring system (IEMS) at any production facility can be presented in the form of a flowchart shown in Fig. 2.

Traditionally as energy efficiency indicators for monitoring and analysis of energy efficiency for different facilities specific fuel and energy consumption are used. However, we know that monitoring energy efficiency, in particular, electricity efficiency, on the basis of its specific costs, in line with Ukraine’s current regulations, is a

time-consuming process, delivering results that are not sufficiently objective and justified [12, 13]. Therefore, on the basis of determining and monitoring specific energy consumption indicators, it is mostly impossible to carry out quality and effective management of energy efficiency both at the country level, as well as at the level of individual enterprises, organizations or institutions.

On the other hand, we also know that foreign practice uses other approaches to monitoring energy efficiency, which are not based on specific energy costs. One such approach involves building and applying so-called fuel and energy efficiency monitoring systems (EMS) that have shown some positive results [14-18].

However, it should be understood that immediately giving up existing efficiency monitoring system for fuel and energy resources (FER) based on their specific costs is not feasible or appropriate. There are a number of reasons for this. One of them is that building the required amount of EMS at any production facility (at the enterprise or in its subdivision) will take considerable time. This means that the transition from one monitoring system to another can only take place gradually over a long period. And throughout this period, it is important to maintain the capability of monitoring the efficiency of FER used at both individual enterprises and at the state level.

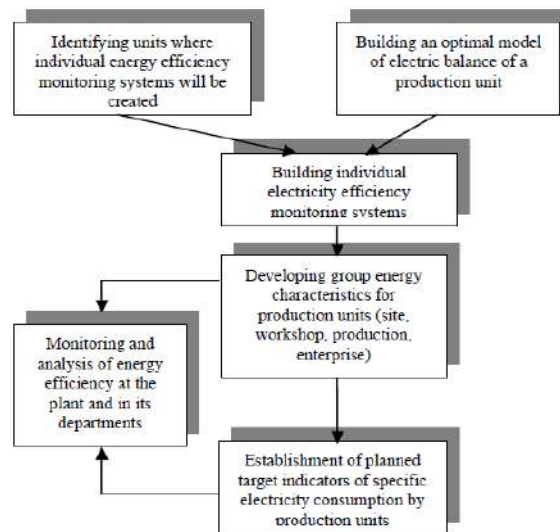


Figure 2 – The process of building and operation of IEMS

Moreover, completely abandoning the specific consumption indicators for fuel and energy in the process of monitoring their efficiency in the near future is unlikely, as, based on the international experience, building and implementing EMS directly for large production facilities is impossible [19, 20].

Therefore, research looking into improving the methods of FER efficiency monitoring systems (and this study, in particular) aims to at least partially eliminate shortcomings in monitoring based on FER specific costs, developing methods for creating and applying EMS, and thereby creating the conditions for a gradual successful transition from the existing system to more accurate and objective means of monitoring energy efficiency. Moreover, such transition should enable operational (e.g. daily, weekly) monitoring of energy efficiency.

Developing and implementation of IEMS implies that, in the beginning, determination of planned and actual specific costs (for electricity) will remain the only means for energy efficiency monitoring at the respective facility. However, instead of using computational analysis for drawing up the balance of electricity consumption at an enterprise, which is traditionally used to determine its planned specific costs, the methodology of building optimal computational models of electric power balances, proposed by the authors of this publication, will be used [21].

The very process of building an IEMS for individual energy-intensive installations, units or processes, as well as for groups of less energy-intensive equipment lies in gradually creating and implementing individual EMS.

Because any sufficiently large production facility (an enterprise or its subdivision) is a group of numerous energy consumers, it will take a long time to build all the necessary individual EMS. Therefore, at the start of the IEMS operation, it will be necessary for some time to apply both of the above approaches to energy efficiency monitoring: at the level of enterprise as a whole and its subdivisions – on the basis of specific costs of electricity, and at the level of technological facilities (individual plants, units, processes or their groups) – offering them individual EMS.

It is clear that those technological facilities that will receive individual EMS at a certain point of time, will enable operational monitoring of energy efficiency (daily, weekly, monthly, etc.).

However, as we know, individual EMS cannot be created directly for large production and economic facilities

(sites, workshops, enterprises as a whole). For this reason, in the process of developing and operation of IEMS for such facilities, setting targets for specific energy consumption for traditional long-term control periods (year, quarter) will remain necessary for quite a while. However, determining target specific consumption of electricity for production and economic facilities in the IEMS can be a more justified way, different from the procedure used in existing methods of calculating the specific energy consumption in public production in Ukraine. Baseline indicators of energy consumption, established in the individual energy efficiency control monitoring systems already developed, can be used for this purpose.

Such baselines are mathematical models of energy consumption that can take into account numerous factors, such as process parameters, its conditions, and the like. Therefore, on the basis of individual baselines of energy consumption for individual plants and technological processes, much more accurate and substantiated amounts of electricity costs for the respective future period can be determined, compared to the corresponding indicators established by the traditional calculation and analytical method.

In addition, it should be noted that the baselines of energy consumption are a kind of individual energy characteristics of the respective technological facilities. Therefore, considering these baselines allows to use them as a basis for building group (cumulative) energy characteristics for individual units and the enterprise as a whole. To build such group characteristics one may apply the known step-by-step method, which involves “adding-up” individual energy characteristics of technological facilities or their groups [22].

On the basis of the group energy characteristics of production and economic facilities thus obtained, as well as the planned values of production volumes, process parameters, external conditions for these facilities, it is possible to determine the planned volumes of energy consumption for an appropriate period. At the same time, it can be stated that the planned electricity costs, determined for production and economic facilities based on their group energy characteristics, as well as the corresponding planned specific energy costs, will be more accurate and justified than the planned energy consumption figures, which are currently determined with computational analysis.

In addition, cumulative energy performance, by analogy with individual EMS, can be considered as group baselines of energy consumption for the enterprise as a whole and its subdivisions, which can also be applied for operational monitoring of electricity efficiency at these facilities.

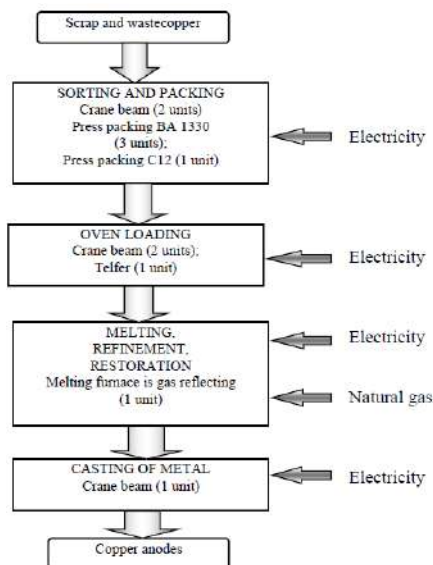


Figure 3 – Diagram of copper anode production process

Therefore, developing and implementing IEMS at industrial sites not only allows this monitoring to be operational at the level of individual units, installations or processes, but also enables, with the gradual increase in the number of individual EMSs built, improve the accuracy and validity of determining target specific costs of electricity, as well as to carry out operational monitoring of energy efficiency at the enterprise level as a whole and its subdivisions.

Thus, applying the concept of developing IEMS, as proposed by the authors of this article, will gradually improve and eventually may fully replace Ukraine’s existing insufficiently correct system of monitoring the electricity efficiency at production and economic facilities, based on the determination of its specific costs, by creating and applying individual systems for monitoring energy efficiency in production.

Moreover, in the course of such gradual replacement, energy efficiency management in public production

will not be affected, as the process will be on-going.

Example of creating and applying IEMS. The process of building and implementation of IEMS can be illustrated by the example of a subdivision of the non-ferrous metallurgy plant. As an object for building an integrated system of monitoring the electricity efficiency at this plant, the department of fire refining of copper, producing the so-called copper anodes, was selected.

Fig. 3 shows a flow diagram of a copper refining process that reflects the sequence of individual operations, the relationship between them, the names and the number of units of the basic equipment where these operations are performed, as well as the energy resources consumed.

In addition, electricity is also used by various auxiliary equipment: the gas purification system, lighting systems for melting and batching stations, various lifting and transport equipment, etc.

Groups of main and auxiliary equipment of smelting and batching stations were selected for building individual systems of monitoring the electricity efficiency in this department (Table 1).

Table 1 – Individual baselines of electricity consumption and group energy characteristics

No. of the facility	Name of the facility	Production factor	Equation of the baseline of electricity consumption (original and reduced), kWh/month
Melting shop			
1	Gas and fume purification system	Volume of metal melting works (Q_1), t/month	$W_{1i} = 1436,401 + 50,245Q_{1i}$ $W_{1r} = 1436,401 + 55,093Q_{1r}$
2	Lighting system of the melting shop	-----	$W_{2i} = 4711,438$
3	Auxiliary equipment of the melting furnace	Running time of the melting furnace (Q_3), h/month	$W_{3i} = 1191,557 + 12,205Q_{3i}$ $W_{3r} = 1191,557 + 15,156Q_{3r}$
4	Lifting and transport equipment	Running time of rail filling device (Q_4), h/month	$W_{4i} = 718,751 + 15,808Q_{4i}$ $W_{4r} = 718,751 + 3,952Q_{4r}$
Copper Batching Site			
5	Main process equipment	Volume of works on batch preparation (Q_5), t/month	$W_{5i} = 1962,711 + 25,7Q_{5i}$ $W_{5r} = 1962,711 + 30,998Q_{5r}$
6	Lighting of the site	-----	$W_{6i} = 4831,707$
Equation of the group energy characteristics of the copper fire refining department			$W_{depi} = 14852,564 + 105,199Q_{i}$

To obtain the data on electricity consumption by each group of equipment required to establish the respective individual baselines of energy consumption, using the method of building optimal computation models of energy balances [22], a number of balances of the department of fire refining of copper were compiled.

In the process of creating an integrated system for monitoring the electricity efficiency in the specified department, individual baselines of electricity consumption were determined for each of the groups of equipment selected as objects for building individual EMS, according to the method developed by the authors of this publication [23]. The summary of established baselines of monthly electricity consumption for the selected groups of equipment is presented in Table 1.

After establishing the above baselines of electricity consumption for each individual group of the main and auxiliary equipment of the copper fire refining department, we now may carry out an operational (monthly) monitoring of the electricity efficiency [24].

As noted above, based on known individual baselines of energy consumption using known operative step-by-step method [22] a group energy characteristic can be built to single out the fire refining of copper as a whole. It should be borne in mind that individual baselines of energy consumption are set depending on different production factors. Therefore, the equation of each individual baseline of electricity consumption must first be made uniform, that is, be brought to the form of dependence on a single factor – the output of the final (finished) products of the department (Q). The results of such an adjustment, which is carried out using appropriate coefficients, are also shown in Table 1.

In order to account for the random nature of the volumes of electricity consumption by the equipment of the specified department, corresponding confidence intervals are built with regard to the obtained group energy

characteristic of the compartment (Fig. 4).

On the basis of the group energy characteristics of the compartment thus built (taking into account the confidence intervals thereto) and the plan of production of the product, specific indicators of the specific consumption of electricity for the department of the fire refining as a whole can be established. For example, for a certain month during which the planned production of refined copper is 748 tones, the planned energy consumption for the copper refining department is given in Table 2.

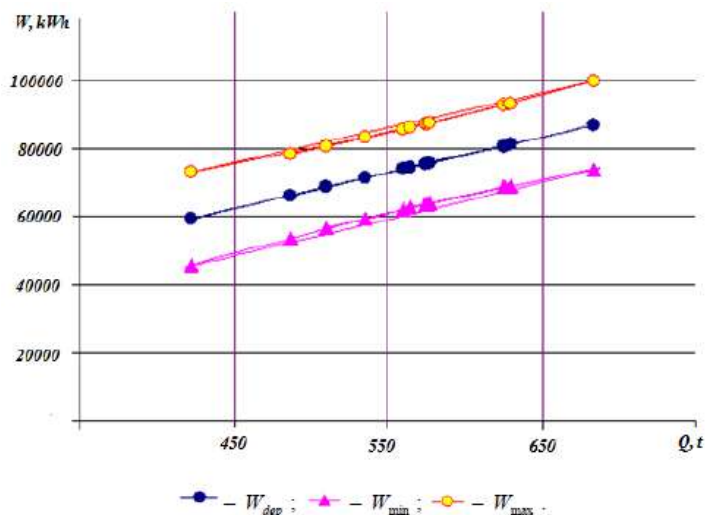


Figure 4 – Group energy characteristics of the copper fire-refining department

Table 2 – Annual production targets and energy consumption for the copper fire-refining department

Q_{pl} , t	$W_{dep,pl}$, MWh	$W_{max,pl}$, MWh	$W_{min,pl}$, MWh	$d_{dep,pl}$, kWh/t	$d_{max,pl}$, kWh/t	$d_{min,pl}$, kWh/t
748	93566.4	107831.3	79301.5	125.09	144.16	106.02

Thus, knowing the planned of production of the product for the department of the enterprise can be defined the planned energy consumption for the respective future periods. In order to account for the random nature building group energy characteristics of the department should determine the minimum and maximum size of the planned power consumption ($W_{min,pl}$ and $W_{max,pl}$), using the equation limits of the confidence interval to energy characteristic (Fig. 3). Similarly (and for the same reason) should establish minimum and maximum amount the planned specific consumption of electricity per unit ($d_{min,pl}$ and $d_{max,pl}$), the use of which allows for more objective monitoring energy efficiency at the department of the enterprise.

Conclusions:

1. Considering the advantages and disadvantages of determining the specific energy costs and building energy efficiency monitoring systems, it can be argued that one of the promising directions for further development of the methodology of such monitoring is the establishment of IEMS at production facilities.
2. When considering individual baselines of energy consumption as individual energy characteristics of process facilities, it is necessary to use them as basis for building group energy characteristics of individual production units and the enterprise as a whole. With such group energy characteristics, more accurate and reasonable target indicators of specific energy consumption for production of products in individual units and at the enterprise as a whole can be set for the respective future periods.
3. Building and implementing IEMS allows for operational control of energy efficiency of process facilities by creating individual systems for monitoring energy efficiency, as well as successfully carry out such monitoring at the enterprise and its subdivisions over longer periods of time using specific energy consumption indicators.
4. Therefore, Ukraine’s existing insufficiently correct system of monitoring the electricity efficiency based on the determination of its specific costs will be gradually improved and eventually may be fully replaced by creating and applying individual systems for monitoring energy efficiency in production.

REFERENCES

1. Rajić MN, Maksimović RM, Milosavljević P, Pavlović D. Energy Management System Application for Sustainable Development in Wood Industry Enterprises. Sustainability. 2020; 12(1):76.

<https://doi.org/10.3390/su12010076>.

2. Nota G, Nota FD, Peluso D, Toro Lazo A. Energy Efficiency in Industry 4.0: The Case of Batch Production Processes. Sustainability. 2020; 12(16):6631. <https://doi.org/10.3390/su12166631>.

3. Rozen V.P. Udoshkonalennia mekhanizmu vprovadzhennia dyrektyvy 2012/27/EU pro enerhoefektyvnist shliakhom adaptatsii mizhnarodnykh standartiv z enerhomenedzhmentu na natsionalnomu rivni / V.P. Rozen, I.S. Sokolovska, Ye.M. Inshekov, I.I. Stoianova // Problemy zahalnoi enerhetyky. - 2015. - Vyp. 4. - pp. 52-57. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PZE_2015_4_9, ISSN 1562-8965.

4. Energy efficiency directive / An official website of the European Union. - Access: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en

5. Eric G.T. Huang, UNDERSTANDING THE REQUIREMENTS OF THE ENERGY MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATION: A discussion about the challenges, impacts and opportunities for energy efficiency, SGS SA, 2011. - P.15. Access: https://www.sgs.com/~/_media/Global/Documents/White%20Papers/sgs-energy-management-whitepaper-en-11.ashx.

6. Rozen V. P., Chernyavskiy A. V. K voprosu o formirovani natsionalnoy modeli standartizatsii vnedreniya i funktsionirovaniya sistemiyi energeticheskogo menedzhmenta. Ekonomichna bezpeka derzhavy i naukovy-tekhnolohichni aspekty yii zabezpechennia (Nedinski chytannia): Pratsi III-ho naukovy-praktychnoho seminaru z mizhnarodnoiu uchastiu, 20–21 zhovtnia 2011 r. – 2011. – pp. 433–448.

7. Energy management systems — Requirements with guidance for use: ISO 50001:2018, IDT — DSTU ISO 50001:2020. — [Valid from 2020-09-15]. — K.: SE "UkrNDNC", 2020. — 34 p. — (National standards of Ukraine).

8. Collins, K., M. Mallick, G. Volpe and W. Morsi. "Smart energy monitoring and management system for industrial applications." 2012 IEEE Electrical Power and Energy Conference (2012): 92-97.

9. Cherniavskiy A.V., Yakobiuk D.V. Informatsiino-analitychni zasoby monitorynhu enerhoefektyvnosti ob'ektiv naftodobuvnoi haluzi // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. 2014. №2. – pp.106-111.

10. Rozen V.P., Cherniavskiy A.V. Energeticheskii monitoring kak sostavlyayuschaya chast sistemiy energeticheskogo menedzhmenta. Ekonomichna bezpeka derzhavy: stratehiia, enerhetyka, informatsiini tekhnolohii: monohrafiia / [Muntiiian V. I., Prokopenko O. V., Petrusenko M. M. ta in.]; za nauk. red. d.t.n., prof. Lukianenko S. O., k.e.n., dots. Karaievoi N. V. – K.: Vydavnytstvo OOO «Iurka Liubchenka», 2014. C.261-270.

11. Cherniavskiy A., Bykovskiy A. Applying of the energy monitoring system for increasing efficiency of energy consumption at the dairy industry enterprises // Norwegian Journal of development of the International Science No 18/2018. – pp.41-45.

12. A.V. Prakhovnyk, V.F. Nakhodov, O.V. Borychenko, "Monitoring energy efficiency is a key issue in energy management", Energy saving, energy, energy audit, 8 (66), pp. 41–54, 2009.

13. V.F. Nakhodov, O.V. Borychenko, K.K. Kochetova, "Analysis of current methods normalization of specific costs of fuel and energy resources in Ukraine", Industrial Electricity and Electrical Engineering, 2, pp. 42-48, 2007.

14. Pooley John, "Quick Start Guide to Energy Monitoring & Targeting (M&T)", Effective Energy Management Guide, p.6, 2005.

15. Monitoring and Targeting in large companies, Energy Efficiency Enquiries Bureau, ETSU, Harwell, Oxfordshire, OX11. Good Practice Guide 112, 2008, p. 45.

16. Jones Phil, "Getting started with Monitoring & Targeting (M&T)", Fundamental Series, 7, pp. 29-32, 2004.

17. International standard ISO 50006:2014 "Energy management systems - Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) - General principles and guidance", p. 33, 2014.

18. A good practice guide to energy monitoring and targeting. Access: <https://www.seai.ie/publications/SEAI-Guide-to-Energy-MT-Final-online.pdf>, 2019, 19 p.

19. Cherniavskiy A.V. Analitychne zabezpechennia enerhetychnoho monitorynhu / A.V. Cherniavskiy, D.V. Yakobiuk, I.V. Yakobiuk // Energoberezhennia. Energetika. Energoaudit. - 2015. - № 2. - pp. 41-45. - Access: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecee_2015_2_7.

20. O. Borichenko, A. Cherniavskiy, "Identification of objects priority for conducting energy monitoring", Technology Audit and Production Reserves, Vol. 3, No. 1 (41), pp. 58-63, 2018.

21. V.F. Nakhodov, O.V. Borychenko, Certificate of registration of copyright for the work "Method of construction optimal calculation models of electricity balances of industrial objects", No. 38503, bul. 25, 2011.

22. V.F. Nakhodov, "Economic and organizational bases of energy saving," Kyiv, 1995, p.150.

23. V.F. Nakhodov, O.V. Borychenko, Certificate of registration of copyright for the work "Methodology of establishing reasonable baseline of electricity consumption and the implementation of objective monitoring of their performance in energy efficiency monitoring systems, No. 38504, bul. 25, 2011.

24. V. Nakhodov, A. Baskys, E. Borichenko, D. Ivanko, "Application of sequential analysis of Wald for

energy efficiency monitoring,” 2016 IEEE 4th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, AIEEE 2016 – 10-12 Nov. 2016 Vilnius, Lithuania, DOI: 10.1109/AIEEE.2016.7821823.

УДК 658.18 + 621.316

В.Ф. Находов, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-7643-5965
О.В. Бориченко, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6127-2945
А.В. Чернявський, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2858-8224
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОДИЧНІ ПИТАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Статистика показує, що витрати на енергію є однією з найбільших складових операційних витрат промислових підприємств. Отже, підвищення енергоефективності може призвести до суттєвого збільшення прибутку підприємства та зменшення його впливу на довкілля. Для підвищення результативності діяльності у сфері енергоефективності на промисловому підприємстві необхідно впровадити систему енергоменеджменту. Одним із компонентів цієї системи є енергомоніторинг, який, у свою чергу, базується на періодичному зборі та аналізі даних для оцінки стану об'єктів моніторингу з точки зору енергоефективності. У цій роботі показано роль енергомоніторингу в системі енергоменеджменту промислового підприємства. У статті пропонується концепція створення системи енергомоніторингу на промислових підприємствах, яка базується на поєднанні системи моніторингу на основі показників питомого споживання енергії та використання групових енергетичних характеристик виробничих потужностей. Впровадження таких систем енергомоніторингу дозволить проводити оперативний контроль енергоефективності виробничих потужностей шляхом створення індивідуальних систем моніторингу енергоефективності, а також успішно проводити такий моніторинг на підприємстві та в його підрозділах протягом більш тривалих періодів часу, з використанням конкретних показників енергоефективності. Тут також містяться загальні вказівки щодо проведення енергетичного моніторингу промислових підприємств. Ці загальні вказівки були сформовані на основі результатів вивчення різних методик та наукових публікацій у сфері енергетичного моніторингу, а також на основі практичного досвіду розробки та впровадження систем енергоменеджменту. Особлива увага приділяється питанням формування набору показників енергоефективності, а також обробки та аналізу інформації про об'єкти енергетичного моніторингу промислових підприємств.

Ключові слова: базовий рівень енергії, енергоефективність, питома споживання енергії, показник питомого споживання енергії, промислове підприємство, система енергоменеджменту, система моніторингу енергії.

Список використаної літератури

1. Rajić MN, Maksimović RM, Milosavljević P, Pavlović D. Energy Management System Application for Sustainable Development in Wood Industry Enterprises. Sustainability. 2020; 12(1):76. <https://doi.org/10.3390/su12010076>.
2. Nota G, Nota FD, Peluso D, Toro Lazo A. Energy Efficiency in Industry 4.0: The Case of Batch Production Processes. Sustainability. 2020; 12(16):6631. <https://doi.org/10.3390/su12166631>.
3. Розен В.П. Удосконалення механізму впровадження директиви 2012/27/EU про енергоефективність шляхом адаптації міжнародних стандартів з енергоменеджменту на національному рівні / В.П. Розен, І.С. Соколовська, Є.М. Іншеков, І.І. Стоянова // Проблеми загальної енергетики. - 2015. - Вип. 4. - С. 52-57. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PZE_2015_4_9, ISSN 1562-8965.
4. Energy efficiency directive / An official website of the European Union. - Режим доступу: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en
5. Eric G.T. Huang, UNDERSTANDING THE REQUIREMENTS OF THE ENERGY MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATION: A discussion about the challenges, impacts and opportunities for energy efficiency, SGS SA, 2011. – P.15. Access: <https://www.sgs.com/~-/media/Global/Documents/White%20Papers/sgs-energy-management-whitepaper-en-11.ashx>.
6. Розен В. П., Чернявський А. В. К вопросу о формировании национальной модели стандартизации внедрения и функционирования системы энергетического менеджмента. *Економічна безпека держави і науково-технологічні аспекти її забезпечення* (Недінські читання): Праці III-го науково-практичного семінару з міжнародною участю, 20–21 жовтня 2011 р. – 2011. – С. 433–448.

7. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання: ISO 50001:2018, IDT — ДСТУ ISO 50001:2020. — [Чинний від 2020-09-15]. — К.: ДП «УкрНДНЦ», 2020. — 34 с. — (Національні стандарти України).
8. Collins, K., M. Mallick, G. Volpe and W. Morsi. "Smart energy monitoring and management system for industrial applications." 2012 IEEE Electrical Power and Energy Conference (2012): 92-97.
9. Чернявський А.В., Якобюк Д.В. Інформаційно-аналітичні засоби моніторингу енергоефективності об'єктів нафтодобувної галузі // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2014. №2. — С.106-111.
10. Розен В.П., Чернявський А.В. Энергетический мониторинг как составляющая часть системы энергетического менеджмента. *Економічна безпека держави: стратегія, енергетика, інформаційні технології*: монографія / [Мунтян В. І., Прокопенко О. В., Петрушенко М. М. та ін.]; за наук. ред. д.т.н., проф. Лук'яненко С. О., к.е.н., доц. Караєвої Н. В. — К.: Видавництво ООО «Юрка Любченка», 2014. С.261-270.
11. Чернявський А., Быковский А. Применение системы энергетического мониторинга для повышения эффективности энергопотребления на предприятиях молочной отрасли // Norwegian Journal of development of the International Science No 18/2018. — С.41-45.
12. Праховник А.В. Контроль ефективності енерговикористання – ключова проблема управління енергозбереженням / А.В. Праховник, В.Ф. Находов, О.В. Бориченко // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. — 2009. — №8(66). — С. 41–54.
13. Находов В.Ф. Аналіз діючих в Україні методик нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко, К.К. Кочетова // «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро : інформ. зб. — 2007. — №2. — С. 42–48.
14. Pooley John, "Quick Start Guide to Energy Monitoring & Targeting (M&T)", Effective Energy Management Guide, p.6, 2005.
15. Monitoring and Targeting in large companies, Energy Efficiency Enquiries Bureau, ETSU, Harwell, Oxfordshire, OX11. Good Practice Guide 112, 2008, p. 45.
16. Jones Phil, "Getting started with Monitoring & Targeting (M&T)", Fundamental Series, 7, pp. 29-32, 2004.
17. Системи енергетичного менеджменту. Вимірювання рівня досягнутої енергоефективності з використанням базових рівнів енергоспоживання та показників енергоефективності. Загальні положення і настанова»: ISO 50006:2014, IDT — ДСТУ ISO 50006:2016. — [Чинний від 2016-04-29]. — К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. — 56 с. — (Національні стандарти України).
18. A good practice guide to energy monitoring and targeting. Access: <https://www.seai.ie/publications/SEAI-Guide-to-Energy-MT-Final-online.pdf>, 2019, 19 p.
19. Чернявський А.В. Аналітичне забезпечення енергетичного моніторингу / А.В. Чернявський, Д.В. Якобюк, І.В. Якобюк // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. - 2015. - № 2. - С. 41-45. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecee_2015_2_7.
20. О. Borichenko, A. Cherniavskiy, "Identification of objects priority for conducting energy monitoring", Technology Audit and Production Reserves, Vol. 3, No. 1 (41), pp. 58-63, 2018. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tatrv_2018_3%281%29_9.
21. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Методика побудови оптимальних розрахункових моделей балансів споживання електричної енергії виробничо-господарських об'єктів» / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко. — № 38503 ; заявл. 14.04.2011 ; зареєстр. 26.05.2011, Бюл. №25.
22. Находов В.Ф. Экономико-организационные основы энергосбережения — К.: Энергетический центр ЕС в Киеве, 1995. — 150 с.
23. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Методика встановлення обґрунтованих «стандартів» споживання електроенергії та здійснення об'єктивного контролю їх виконання в системах статистичного контролю ефективності енерговикористання» / В.Ф. Находов, О.В. Бориченко. — № 38504 ; заявл. 13.05.2011 ; зареєстр. 26.05.2011, Бюл. №25.
24. V. Nakhodov, A. Baskys, E. Borichenko and D. Ivanko, "Application of sequential analysis of Wald for energy efficiency monitoring," 2016 IEEE 4th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), Vilnius, Lithuania, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/AIEEE.2016.7821823..

Надійшла 29.12.2020

Received 29.12.2020

М.М. Шовкалюк, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-1898-3493
Є.О. Микита, магістр, ORCID 0000-0001-6698-7555
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИТЛОВОЇ БУДІВЛІ ТА СЕРТИФІКАЦІЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Зважаючи на енергетичну залежність України, підвищення рівня енергетичної ефективності житлового фонду є надзвичайно актуальним питанням. Найбільший ефект в існуючих багатоквартирних будівлях досягається лише у разі комплексного впровадження енергозберігаючих заходів щодо огорожувальних конструкцій, інженерних мереж та обладнання, а такі проекти потребують залучення значних коштів. Для отримання фінансування від різних інвестиційних фондів та для можливості участі у державних чи місцевих програмах фінансування необхідно виконати енергетичний аудит та обґрунтувати енергозберігаючі заходи, оцінити клас енергоефективності будівлі. З цією метою виконано енергетичне обстеження із застосуванням інструментальних та аналітичних методів, а також здійснене моделювання енергоспоживання у спеціалізованому програмному продукті Auditor OZC. Уточнені геометричні, теплотехнічні та енергетичні характеристики будівлі. Для підвищення рівня енергоефективності запропоновано комплекс заходів, виконано економічний аналіз та вивчено можливості залучення інвестицій для реалізації енергоефективних заходів. За сучасними вимогами розроблено сертифікат енергетичної ефективності та оцінено зміну класу енергоефективності у разі впровадження заходів.

Ключові слова: житлова багатоквартирна будівля, енергоефективність, моделювання енергоспоживання, енергетична сертифікація.

Вступ

В рамках договору про асоціацію України з Європейським Союзом, українським урядом було розроблено план імплементації Директиви Європарламенту щодо енергетичної ефективності будівель (2010/31/ЄС) [1]. На виконання прийнятого Закону України №2118-8 «Про енергетичну ефективність будівель» [2] було розроблено комплекс нормативно-правових актів та методичних документів, зокрема [3, 4], нові стандарти [5], внесено зміни у будівельні норми та [6].

Зважаючи на те, що будівельний фонд України складається в основному із будівель, споруджених за часів масового серійного будівництва, на утримання його витрачається в декілька разів більше енергії, ніж, наприклад, у Польщі чи Німеччині [7]. Комплекс заходів з підвищення енергоефективності в багатоквартирних будівлях потрібно розробляти за результатами виконання детального енергетичного обстеження з виявленням причин неефективного енерговикористання, виконанням ґрунтового аналізу енергоспоживання з урахуванням різних впливових факторів [8] та визначенням очікуваної економії. Енергоаудитор також може запропонувати пакети заходів та пріоритетність в реалізації заходів за умови відсутності необхідних фінансових ресурсів для комплексної реалізації всіх заходів. В Україні для реалізації проєктів енергоефективності використовуються інструменти співфінансування: працює Фонд енергоефективності [9], створено регіональні, місцеві програми [10]. В більшості випадків для отримання фінансування потрібно, щоб в будівлі було створено ОСББ, а рішення про участь у таких програмах приймалося Загальними зборами [11], на яких енергоаудитор має обґрунтувати з технічної та економічної точки зору рішення з підвищення енергоефективності. Крім того, проєктна документація на комплексну термомодернізацію будівель з покращенням теплотехнічних властивостей огорожень та модернізацією інженерних систем і обладнання має містити енергетичний сертифікат будівлі [2], який внесено у офіційну базу даних. Якщо для серійних будівель із низькими значеннями опору теплопередачі огорожувальних конструкцій енергозбереження від утеплення чи заміни застарілого обладнання є суттєвим, то для будівель, які були введені в експлуатацію після 2000-х років, економічну доцільність конкретних заходів потрібно аналізувати детально. Під час виконання енергоаудиту для зменшення трудовитрат на виконання теплотехнічних розрахунків за методикою [5] доцільно застосовувати програмні продукти.

Об'єктом досліджень є житлова багатоквартирна будівля, що введена в експлуатацію у 2012 році. У 2017 році мешканцями будинку було створено ОСББ. У відносинах з підприємствами, що надають житлово-комунальні послуги, ОСББ обрало модель договору «колективний споживач» [12, 13], що передбачає відповідальність за технічне обслуговування та утримання внутрішньобудинкових інженерних

систем за рахунок об'єднання співвласників. Тому питання підвищення енергетичної ефективності даної будівлі і вибір пакету заходів для залучення фінансових ресурсів є надзвичайно актуальним.

Мета та задачі

Метою дослідження є оцінювання енергетичних характеристик і визначення потенціалу енергозбереження житлової багатоквартирної будівлі на основі енергетичного обстеження та моделювання енергоспоживання з виконанням економічного аналізу доцільності впровадження заходів. Для сформованих пакетів енергоефективних заходів визначено, наскільки зміниться клас енергетичної ефективності будівлі відносно існуючого стану.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати наступні **задачі дослідження**:

- провести комплексне енергетичне обстеження житлової будівлі з уточненням геометричних, теплотехнічних та енергетичних характеристик;
- проаналізувати споживання енергетичних ресурсів з виконанням розрахунків базового рівня;
- запропонувати та економічно обґрунтувати заходи для підвищення рівня енергоефективності;
- виконати моделювання енергоспоживання у спеціалізованому програмному продукті;
- розробити енергетичний сертифікат будівлі та оцінити потенційну зміну класу енергоефективності у результаті впровадження рекомендованих пакетів заходів.

Матеріал і результати досліджень

Об'єкт дослідження – односекційний 24-поверховий багатоквартирний житловий будинок у м.Київ, зведений за монолітно-каркасною системою в 2012 році. В будівлі наявні приміщення різного функціонального призначення: перший поверх будинку – нежитлові комерційні приміщення, 2-23 поверхи – квартири, 24 поверх – опалюваний технічний поверх. Всього в будівлі 176 квартир та 6 нежитлових приміщень. Опалювальна площа - 15193,6 м². В будівлі проживає 264 особи.

Конструкція фасадів будівлі монолітно-каркасна, наявні декілька типів зовнішніх стін (таблиця 1):

- залізобетонний каркас із несучих опорних залізобетонних пілонів, товщиною 300 мм з утепленням пінополістиролом 100 мм і упорядженням декоративною штукатуркою;

- заповнення між пілонами з повнотілої керамічної цегли (250 мм), з утепленням пінополістиролом 100мм і упорядженням штукатуркою.

Таблиця 1 – Загальні характеристики зовнішніх стін будівлі

Загальна оцінка існуючого стану	задовільний			
		Керамічна цегла	Залізобетон	
Основний матеріал				
Площа зовнішніх стін	A _{зс}	5708,40	1816,20	м ²
Опір теплопередачі (по основному полю)	R _{зс}	2,497	2,315	м ² К/Вт

За проектом у будинку передбачено металопластикові вікна та балконні двері з двокамерними склопакетами 4-12-4-8-4і. У конструкції даху наявні зенітні ліхтарі з однокамерними склопакетами у ПВХ-профілях. Зовнішні двері входу до будівлі світлопрозорі, з ПВХ-профілю та двокамерним енергоефективним склопакетом 4-12-4-8-4і. Також наявні внутрішні тамбурні двері. Стіни підвалу залізобетонні (0,4 м), частина стін підвалу, що вище рівня ґрунту, теплоізолювана шаром пінополістиролу (0,1 м). Будівля має горизонтальну покрівлю двох типів: над приміщенням технічного поверху та над машинним приміщенням ліфтів (характеристики наведено у таблиці 2).

Таблиця 2 – Загальні характеристики покриття будівлі

Загальна оцінка існуючого стану	задовільний			
		Покриття 1	Покриття 2	
Основний матеріал				
Площа покриттів	A _{пок}	541,00	88,00	м ²
Опір теплопередачі покриттів	R _{пок}	2,452	1,755	м ² К/Вт
Загальна площа покриття	A _{покΣ}	629,00		м ²
Приведений опір теплопередачі	R _{прΣ}	2,323		м ² К/Вт

Проведений аналіз теплотехнічних властивостей огорожень із визначенням приведенного опору теплопередачі показав, що він не відповідає діючим вимогам [6], проте економічна доцільність заходів з утеплення огорожень і оцінка впливу на клас енергоефективності потребує детального вивчення.

Для визначення енергоспоживання та показників енергоефективності за нормативними вимогами [3-6] було сформовано розрахункову модель у програмному середовищі MS Excel. Загальний алгоритм розрахунків наведено на рис. 1.

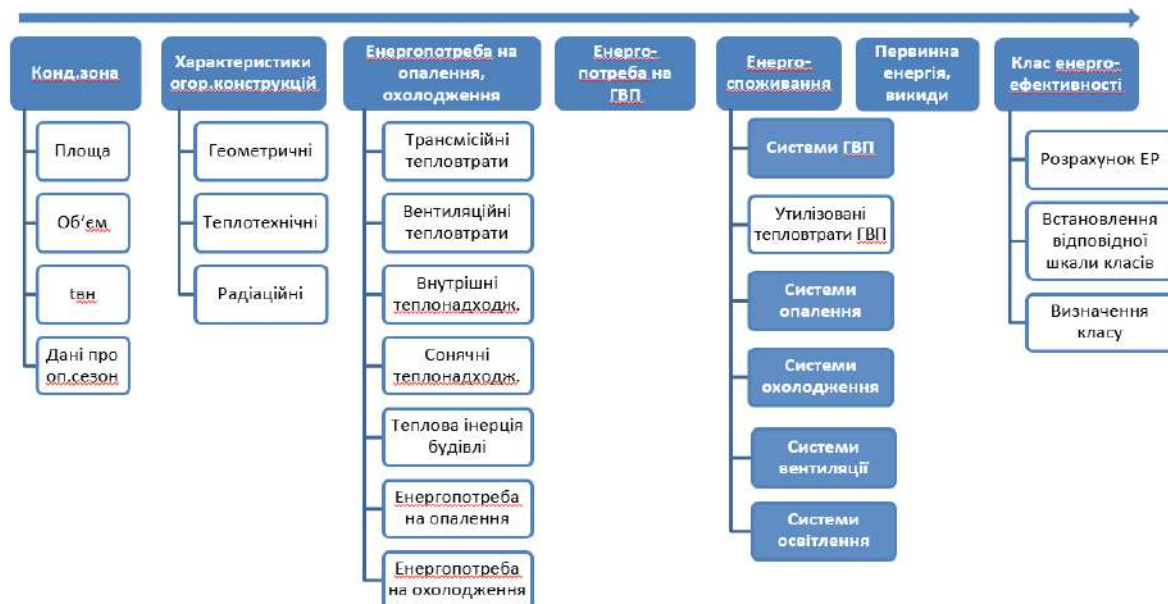


Рисунок 1 – Загальний алгоритм розрахунків

В основі програмного алгоритму лежить квазістаціонарний помісячний метод визначення енергетичних характеристик за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 [5].

Таблиця 3 – Показники енергоефективності будівлі

Назва показника	Існуюче значення, кВт×год/м ² за рік	Мінімальні вимоги, кВт×год/м ² за рік
Питома енергопотреба на опалення, охолодження, ГВП	89,95	70
Питома енергоспоживання при опаленні	79,31	-
Питома енергоспоживання при охолодженні	1,19	-
Питома енергоспоживання при гарячому водопостачанні	67,64	-
Питома енергоспоживання системи вентиляції	0,00	-
Питома енергоспоживання при освітленні	2,55	-
Питома споживання первинної енергії, кВт×год/м ² за рік	199,62	-
Питоми викиди парникових газів, кг/м ² за рік	39,77	-

Таблиця 4 – Фактичне та розрахункове енергоспоживання

Вид	Фактичне споживання за рік		Розрахункове споживання за рік	
	тис. кВт×год	кВт×год/м ² (кВт×год/м ³)	тис. кВт×год	кВт×год/м ² (кВт×год/м ³)
Енергоспоживання систем опалення	866,77	57,05	1204,95	79,31
Енергоспоживання систем вентиляції	0	0	-	-
Енергоспоживання систем ГВП	-	-	1027,63	67,64
Енергоспоживання систем охолодження	0	0	18,09	1,19
Енергоспоживання систем освітлення	0,00	0,00	38,68	2,55
УСЬОГО:	866,77	57,05	2289,34	150,68

Для виконання енергетичного моделювання житлової будівлі застосовано програмний продукт Audytor OZC, так як він враховує методики розрахунків, нормативні дані та кліматологію [14], закладену в українські норми та стандарти [5,6]. Дане програмне забезпечення має ряд можливостей: створення 3D-моделі об'єкту; деталізоване моделювання енергетичних характеристик за окремими зонами та приміщеннями будівлі відповідно до [5]; можливість врахування теплопровідних включень огорожувальних конструкцій; визначення проектного навантаження системи опалення та орієнтовний підбір опалюваних приладів з бази обладнання.

В ході дослідження у внутрішньому просторовому редакторі програмного забезпечення створено 3D-модель об'єкту (рис.2) та розраховано енергопотребу і енергоспоживання системи опалення, гарячого водопостачання, освітлення, та визначено показники енергетичної ефективності.

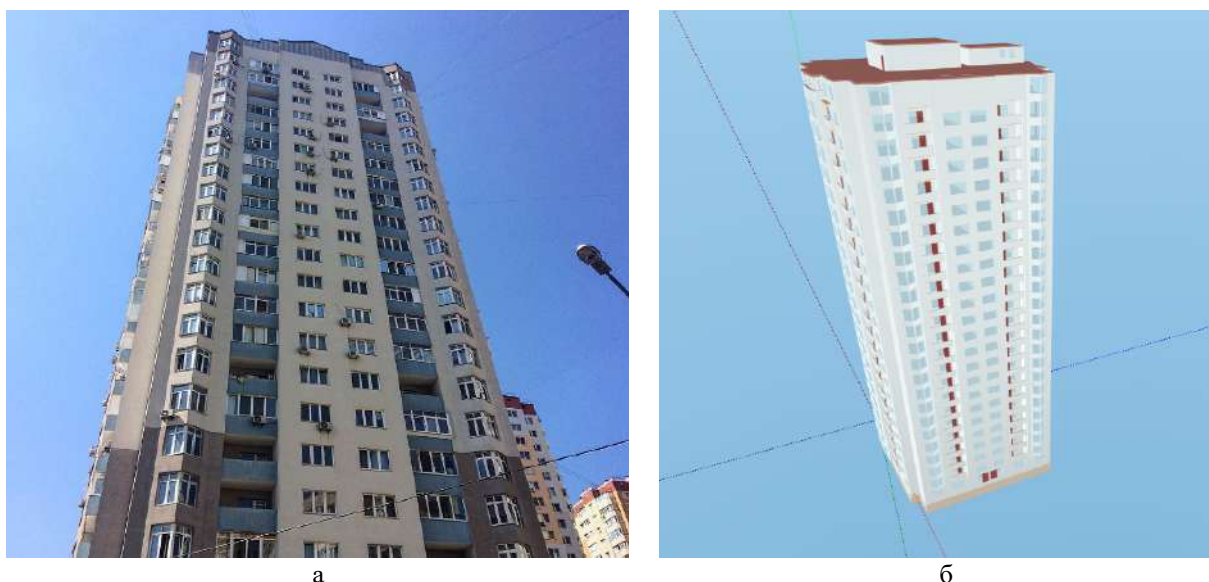


Рисунок 2 – Загальний вигляд будівлі (а - фактичний стан, б - 3D модель в Audytor OZC)

За результатами розрахунку було визначено, що енергопотреба будівлі на опалення, визначена за методикою стандарту [5], становить 841873,56 кВт-год, а енергопотреба будівлі за результатами моделювання у Audytor OZC 861638,89 кВт-год, тобто відхилення в розрахунках становить лише 2,32 %. Фактичне енергоспоживання за показами теплічильників будівлі 893102,59 кВт-год, при чому умови мікроклімату підтримуються на нормативному рівні. Під час розрахунків енергоспоживання будівлі, що розглядається, було враховано енергетичні характеристики підсистем тепловіддачі, розподілення, генерації та акумулювання, включаючи регулювання. Тепловтрати підсистеми розподілення складаються із: тепловтрат трубопроводами; тепловтрат циркуляційним контуром; тепловтрат відпрацьованої води з водовипуску користувачів (для системи ГВП). Для виконання розрахунків уточнювалися діаметри та довжини горизонтальних і вертикальних ділянок трубопроводів, температурний графік теплоносія, режим експлуатації інженерних мереж, визначалися лінійні коефіцієнти теплопередачі та утилізовані тепловтрати. Нижче, у таблиці 5 наведено порівняльний аналіз результатів розрахунків енергоспоживання на різні потреби житлової будівлі. Якщо для системи опалення відмінності у розрахунках становлять близько 5%, то для системи гарячого водопостачання та освітлення відмінності більш суттєві.

Таблиця 5 – Порівняння результатів визначення енергоспоживання

Вид	Розрахункове	Audytor OZC
	кВт×год	кВт×год
Енергоспоживання систем опалення	1204946	1267380
Енергоспоживання систем ГВП	1027625	1496090
Енергоспоживання систем охолодження	18089	Не визначалося
Енергоспоживання систем освітлення	38683	42180

Економічна оцінка ефективності впровадження енергоефективних заходів

Зважаючи на те, що витрати на опалення – основна складова на енергозабезпечення будівлі, були запропоновані технічні заходи для зменшення витрат теплової енергії. В рамках виконання енергетичного

обстеження будівлі виконано економічну оцінку можливостей підвищення рівня енергоефективності будівлі, результати розрахунків економії енергії та витрат наведено у таблиці 6.

Таблиця 6 – Розрахунки економії енергії від впровадження

	Рекомендація	Економія енергії, кВт-год/рік	Грошова економія, грн/рік
1	Встановлення терморегуляторів	56217	79970
2	Балансування системи опалення	29580	42078
3	Теплоізоляція трубопроводів опалення	12213	17373
4	Теплоізоляція трубопроводів ГВП	18791	26731
5	Заміна дверей місць загального користування	25262	35936
6	Теплоізоляція перекриття підвалу	18330	26075
7	Теплоізоляція покриття	21970	31255
8	Теплоізоляція зовнішніх стін	148614	211410
9	Комплексна заміна вікон	41755	59397
10	Вентиляція з рекуперацією	333502	474420

З наведених рекомендацій з підвищення енергоефективності сформовано два пакети – «Мінімальний» та «Максимальний». Пакет «Мінімальний» включає такі рекомендації:

- теплоізоляція трубопроводів опалення в підпіллі,
- встановлення автоматичних балансувальних клапанів на стояки опалення,
- встановлення термоголовок на радіаторні термостатичні клапани,
- теплоізоляція трубопроводів гарячого водопостачання у підпіллі,
- заміна дверей у місцях загального користування.

Для обох пакетів заходів визначалися первинні капітальні інвестиції, грошові потоки та виконувалась інвестиційна оцінка впровадження рекомендацій з підвищення енергоефективності виконують за такими показниками: термін окупності (PB); чиста приведена вартість (NPV), коефіцієнт чистої приведеної вартості (NPVQ) - відношення NPV до загальних інвестицій; внутрішня норма прибутковості (IRR). Показники інвестиційної привабливості пакетів заходів наведено у таблиці 7.

Було визначено, що у пакеті «Максимальний» наявні капіталомісткі рекомендації, термін окупності яких суттєво перевищує строк експлуатації обладнання та конструкцій. Заходи з даного пакету доцільно впроваджувати в рамках планового капітального ремонту будівлі.

Таблиця 7 – Показники інвестиційної привабливості пакетів заходів

Найменування пакету	Інвестиції	Економія	PB	NPV	NPVQ	IRR
	грн.	грн/рік	років	млн. грн		%
«Мінімальний»	1528990	195 280	7,83	0,92	0,601	8,8%
«Максимальний»	41504986	911170	45,55	-29,08	-0,701	-7,0%

Важливим завданням є фінансове планування впровадження заходів з підвищення рівня енергоефективності, пошук можливостей та інструментів залучення зовнішніх інвестицій, програм співфінансування. Для багатоквартирних будинків існує ряд державних та регіональних програм фінансування проектів підвищення енергоефективності. Умови програм, зазвичай базуються на спільному з мешканцями фінансуванні проектів енергомодернізації будівель, або частковому відшкодуванні понесених співвласниками капітальних витрат.

Розглянуто можливості залучення інвестицій за двома програмами:

- конкурсна Програма КМДА «70/30» (співфінансування проектів з впровадження заходів з енергоефективності у житлових будинках в м. Київ, що передбачає розділення інвестицій на дві окремі групи заходів у комплексному проекті за капітальними витратами: до 70% покривається даною програмою, від 30% коштів - забезпечують мешканці будинку);

- Програма підтримки проектів енергомодернізації ОСББ «Енергодім» від Державного Фонду енергоефективності [9], що передбачає поетапне грантове відшкодування частини капітальних витрат на енергоаудит, проєктування, впровадження енергоефективних заходів та верифікацію проєкта за двома пакетами: пакет А (легкий), пакет Б (комплексний).

Для розрахунку співфінансування було обрано заходи пакету «Мінімальний». Результати розрахунків необхідних інвестиційних витрат по програмі «70/30» наведено у таблиці 8. Для програми Фонду енергоефективності виконано розрахунок орієнтовного відшкодування витрат до умов впровадження пакету заходів «А» (Легкий), результати наведено у таблиці 9.

Таблиця 8 – Розрахунок співфінансування за програмою «70/30»

Повна вартість заходів, грн.		1640992,5	100%
Заходи, що фінансуються за рахунок коштів бюджету міста Києва			
Назва заходу	грн.		%
Встановлення терморегуляторів	418600,0		25,5%
Встановлення автоматичних балансувальних клапанів	209000,0		12,7%
Заміна дверей МЗК	461600,0		28,1%
Разом:	1089200,0		66,4%
Заходи, що фінансуються за рахунок співвласників			
Назва заходу	грн.		%
Теплоізоляція трубопроводів опалення	293992,5		17,9%
Теплоізоляція трубопроводів ГВП	257800		15,7%
Разом:	551792,5		33,6%

Таблиця 9 – Розрахунок відшкодування за програмою «Енергодім»

Стаття витрат	Фінансові витрати	% відшкодування*	Орієнтовна сума відшкодування
Енергоаудит	20000,0	70%	14000,0
Супровід проєкту	55000,0	70%	38500,0
Виготовлення проєктно-кошторисної документації	85000,0	70%	59500,0
Будівництво та монтаж	1640992,5	60%	984595,5
Авторський нагляд	8000,0	70%	5600,0
Технічний нагляд	12000,0	70%	8400,0
Верифікаційний енергоаудит	20000,0	70%	14000,0
Обстеження інженерних систем	15000,0	70%	10500,0
Всього:	1855992,5		1135095,5
Орієнтовні фактичні кап. витрати:		720897,0	грн

*Для перших 500 учасників програми "Енергодім" Фонду енергоефективності

За розрахованими показниками було сформовано енергетичний сертифікат будівлі та визначено клас енергоефективності існуючої будівлі – F (на момент розроблення енергетичного сертифікату для даної будівлі нові нормативи [15] не вступили в дію, тому визначення класу виконувалося за методикою [3]). Впровадження пакету заходів «Мінімальний» є економічно доцільним до впровадження, але не впливає на зміну класу енергоефективності будівлі (рис.3).

Шкала класів енергетичної ефективності	До впровадження	"Мінімальний"	"Максимальний"
Високий рівень енергоефективності			
A <math>< 44 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2</math>			
B <math>< 79 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2</math>			
C <math>< 87 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2</math>			
D <math>< 109 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2</math>			D
E <math>< 131 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2</math>			
F <math>< 153 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2</math>	F	F	
G $> 153 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$			
Низький рівень енергоефективності			
Питоме споживання енергії на опалення, гаряче водопостачання, охолодження будівлі, кВт × год/м ²	148,13	139,13	106,64

Рисунок 3 – Клас енергоефективності будівлі до та після впровадження заходів

Також, для покращення системи енергоменеджменту та моніторингу будівлі, було рекомендовано організувати централізований збір даних обліку енергоресурсів за допомогою системи M-Bus; та встановити прилади розподільного обліку споживання теплової енергії.

Висновки

Проведено комплексне енергетичне обстеження житлової будівлі у м.Київ та виконано енергетичне моделювання у спеціалізованому програмному забезпеченні, здійснено аналіз енергоспоживання до та після впровадження енергозберігаючих заходів. Виконано порівняльну оцінку результатів розрахунків за розробленою програмою у середовищі MS Excel відповідно до національної методики і діючих норм та у спеціалізованому програмному продукті для виконання енергетичних аудитів Auditor OZC. Відхилення в розрахунках енергопотребі на опалення становить лише 2,32 %, енергоспоживання на опалення – 5%.

Здійснено економічну оцінку та оцінено існуючі можливості залучення інвестицій для реалізації пакету заходів за міською та загальнодержавною програмами фінансування енергоефективних проєктів. Розроблено енергетичний сертифікат будівлі та визначено клас енергоефективності існуючої будівлі – F. Встановлено, що реалізація комплексу заходів з термомодернізації дозволить підвищити клас до D, проте для діючих тарифів впровадження не є інвестиційно привабливим.

Таким чином, для будівель більш сучасної забудови під час розробки рекомендацій аудитор повинен виконувати більш ґрунтовні економічні розрахунки, причому використання спеціалізованого програмного продукту дозволить скоротити час на виконання теплотехнічних розрахунків.

Список використаної літератури

1. Directive 2010/31/eu of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) // Official Journal of the European Communities. 2010, L153. – p. 13-35.
2. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» №2118-VIII від 22.06.2017. Голос України. 22.07.2017. №134.
3. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. №169. Офіційний вісник України. 2018, № 55. С. 301.
4. Про затвердження Порядку проведення сертифікації енергетичної ефективності та форми енергетичного сертифіката: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. № 172. Офіційний вісник України. 2018, № 55. С. 334.
5. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні [Уведений вперше; чинний від 2015.01.01]. К. Мінрегіонбуд України, 2016. 205 с.
6. ДБН В.2.6-31:2016. Теплова ізоляція будівель. К.: Мінбуд України, 2017. 37 с.
7. Офіційний сайт НКРЕКП (Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг), [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua>
8. Efficiency of using energy in housing sector, under the general editorship of Pavlenko A.M. Politechnika Świętokrzyska. Kielce, 2020, Pp. 155.
9. Закон України «Про Фонд енергоефективності» № 2095-VIII від 01.12.2020. Відомості Верховної Ради, 2017, №32, с.344.
10. Шовкалюк М.М., Леконцева О.Е. Розвиток програм стимулювання підвищення енергоефективності будівель в Україні / Збірник наук. праць V Міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. у м. Києві 17-12.04.2018р., с.116-117.
11. ЗУ «Про особливості здійснення права власності у багатоквартирних будинках» №417-8, від 10.06.2018. Цивільний кодекс України ч. 2 ст. 382 в редакції Закону № 417-8, від 14.05.2015.
12. Закон України «Про житлово-комунальні послуги» № 2189-VIII від 02.04.2020. Відомості Верховної Ради, 2018, №1, с.1.
13. Про затвердження Правил надання послуги з постачання теплової енергії і типових договорів про надання послуги з постачання теплової енергії: Постанова КМУ від 21.08.2019. №830. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/830-2019-%D0%BF#Text/>
14. ДСТУ-Н Б В.1.1-2:2010. Будівельна кліматологія. К.: Мінрегіон України. 2010.
15. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.10.2020. №260. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
16. Про затвердження Змін до Методики визначення енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.10.2020. №261. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1254-20>.

ASSESSMENT OF ENERGY CHARACTERISTICS OF RESIDENTIAL BUILDING AND CERTIFICATION OF ENERGY EFFICIENCY

The cost of maintaining the construction fund in Ukraine is several times higher than in European countries. Given Ukraine's energy dependence, increasing the energy efficiency of housing is an extremely important issue. The greatest effect in the existing apartment buildings is achieved only in the case of integrated implementation of energy saving measures for fencing structures, utilities and equipment, and such projects require significant funds. To obtain funding from various investment funds and to be able to participate in state or local funding programs, it is necessary to perform an energy audit and justify energy saving measures, to assess the energy efficiency class of the building. For this purpose, an energy survey was performed using instrumental and analytical methods, as well as modeling of energy consumption in a specialized software product Audytor OZC. The geometric, thermal and energy characteristics of the building have been specified. To increase the level of energy efficiency, a set of measures is proposed, the possibilities of attracting investments for the implementation of energy efficiency measures are studied. The technical and economic analysis with use of engineering methods of calculation, experimental measurements, modeling is executed. According to modern requirements, a certificate of energy efficiency has been developed and the change of energy efficiency class in case of implementation of measures has been assessed. The result of the implementation of measures will be a reduction in the total consumption of energy resources, as well as the cost of paying for them, improving the conditions of the microclimate. Social aspect: participation in the investment project will allow residents to gain practical experience in implementing various projects in compliance with norms and procedures, increase consumer awareness of improving the condition of the building, energy efficiency and opportunities to reduce environmental impact.

Keywords: residential apartment building, energy efficiency, energy consumption modeling, energy certification.

REFERENCES

1. Directive 2010/31/eu of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast) // Official Journal of the European Communities. 2010, L153. – p. 13-35.
2. Закон України «Про енергетичну ефективність будівел» №2118-VIII від 22.06.2017. Holos Ukrainy. 22.07.2017. №134.
3. Про затвердження Методык визначення енергетичної ефективності будівел: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. №169. Офіційні вісник України. 2018, № 55. p.301.
4. Про затвердження Порядку проведення сертифікації енергетичної ефективності та форми енергетичного сертифіката: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. № 172. Офіційні вісник України. 2018, № 55. p. 334.
5. DSTU B A.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівел. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та hariachomu vodopostachanni [Uvedenyi vpershe; chynnyi vid 2015.01.01]. K. Minrehionbud Ukrainy, 2016. 205 p.
6. DBN V.2.6-31:2016. Konstruksii budynkiv ta sporud. Teplova izoliatsiia budivel. K.: Minbud Ukrainy, 2017. 37 p.
7. Офіційні сайт НКРЕКП (Национальна комісія, щодо здійснення державного регулювання у сфері енергетики та комунальних послуг), [Elektronyi resurs]. - Rezhym dostupu: <http://www.nerc.gov.ua>.
8. Efficiency of using energy in housing sector, under the general editorship of Pavlenko A.M. Politechnika Świętokrzyska. Kielce, 2020, P. 155.
9. Закон України «Про Фонд енергоефективності» № 2095-VIII від 01.12.2020. Vidomosti Verkhovnoi Rady, 2017, №32, p.344.
10. Shovkaliuk M.M., Liekontseva O.E. Rozvytok prohram stymuliuvannya pidvyshchennia enerhoefektyvnosti budivel v Ukraini / Zbirnyk nauk. pratsV Mizhnar. nauk.-tekhn. ta navch.-metod. konf. u m. Kyievi 17-12.04.2018r., p.116-117.
11. ZU «Pro osoblyvosti zdiisnennia prava vlasnosti u bahatokvartyrnykh budynkakh» №417-8, від 10.06.2018, Tsyvilnyi kodeks Ukrainy ch. 2 st. 382 v redaktsii Zakonu № 417-8, від 14.05.2015.
12. Закон України «Про житлово-комунальні послуги» № 2189-VIII від 02.04.2020. Vidomosti Verkhovnoi Rady, 2018, №1, p.1.

13. Pro zatverdzhennia Pravyl nadannia posluhy z postachannia teplovoi enerhii i typovykh dohovoriv pro nadannia posluhy z postachannia teplovoi enerhii: Postanova KМУ vid 21.08.2019. №830. Rezhym dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/830-2019-%D0%BF#Text/>

14. DSTU-N B V.1.1-2:2010. Budivelna klimatolohiia. K.: Minrehion Ukrainy. 2010.

15. Pro zatverdzhennia Minimalnykh vymoh do enerhetychnoi efektyvnosti budivel: Nakaz Ministerstva rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy vid 27.10.2020. №260. Rezhym dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.

16. Pro zatverdzhennia Zmin do Metodyky vyznachennia enerhetychnoi efektyvnosti budivel: Nakaz Ministerstva rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy vid 27.10.2020. №261. Rezhym dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1254-20>.

Надійшла 28.11.2020

Received 28.11.2020

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 621.311.245

О. М. Попович, доктор техн. наук, ORCID 0000-0002-9238-5782
Інститут електродинаміки НАН України
Л.К. Лістовщик, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-3413-1802
А. Крібаа, студент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОМПЛЕКСНЕ КОНСТРУЮВАННЯ БАГАТОМАШИННОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ

Обґрунтовано напрямок модернізації вітроенергетичної установки, який спрямовано на комплексне підвищення енергетичної ефективності та ресурсозбереження. З урахуванням причин руйнування зубців зубчастої передачі запропонована конструктивна схема одноступеневого редуктора з кількома вихідними валами. Така схема дає змогу розподілити вихідну потужність на декілька електричних машин, що, в свою чергу, зменшує механічне напруження в зоні контакту зубців зубчастого колеса і шестерень вихідних валів. За рахунок розділення вихідної потужності на декілька машин також зменшуються масогабаритні показники редуктора. Рівномірність розподілу потужності на вали може порушуватись розбіжністю параметрів зубцевих передач, електромагнітних і механічних параметрів електричних машин. В запропонованій конструктивній схемі рівномірність потоків енергії за валами забезпечується послідовною схемою з'єднання фаз обмоток статорів електричних генераторів.

Ключові слова: вітрогенератор, привод, електричний генератор, зубчата передача, редуктор

Вступ. Використання гефе відновлювальної енергії, зокрема енергії вітру, зменшує використання вугілля, нафти, газу. При цьому не вичерпуються сировинні ресурси, які накопичено протягом минулих епох, зменшуються викиди до атмосфери вуглекислого газу та інших шкідливих продуктів згоряння вуглеводневого палива. Зменшення теплового забруднення навколишнього середовища сприяє зменшенню негативного впливу діяльності людства на кліматичні зміни. Роботи зі створення різноманітних конструкцій вітрогенераторів, обґрунтування їх параметрів в залежності від умов експлуатації проводяться не одне десятиліття [1]. І питома вага використання відновлювальних джерел енергії весь час збільшується [2] із тенденцією практично повного витіснення викопного палива. Зростаючі обсяги виробництва і застосування вітроелектричних станцій [3] створюють запит і умови розробки для них спеціалізованого електромеханічного обладнання підвищеної ефективності.

Вітроелектричні станції являють собою комплекс електромеханічного обладнання: вітрові турбіни, редуктори, електричні генератори, пристрої повороту гондоли з обладнанням на башті вітрогенератора, система зміни кутів установки лопаток вітроколеса, електричні кабелі, електричні трансформатори, джерела реактивної потужності, тощо. Основні елементи вітроелектричної станції наведено на рис. 1 [2, 4].

Ці основні складові вітроелектричних станцій мають тісний взаємний зв'язок, який обумовлює взаємний вплив на режими роботи і ефективність як складових системи, так і результуючі показники всього комплексу. Створення спеціалізованого обладнання за комплексними критеріями ефективності може забезпечити отримання синергетичних ефектів проектування і покращення техніко-економічних характеристик даної системи.

Вітрова турбіна перетворює кінетичну енергію вітру до механічної енергії на вихідному валу, який має порівняно невисокі частоти обертання. Для отримання високих питомих і енергетичних показників електричних генераторів, у переважній більшості випадків, застосовують підвищувальний редуктор [2, 3, 4]. Його встановлення збільшує масу обладнання у гондолі і вартість всієї конструкції, зменшує ККД системи, збільшує силу тертя у трансмісії і величину мінімальної робочої швидкості вітру, що призводить до зменшення річного вироблення електричної енергії, що особливо відчутно у регіонах з невеликими середніми швидкостями вітру.

© О.М. Попович, Л.К. Лістовщик, А. Крібаа, 2020

Потрібне передавальне відношення редуктора вітрогенератора забезпечується наявністю кількох його ступенів [4], що ускладнює конструкцію, збільшує вартість, зменшує надійність. Крім того, енергетичний потік проходить ці ступені послідовно, що зменшує загальну енергетичну ефективність. Використовують наступні конструктивні схеми приводів (рис. 2) [4, 5]:

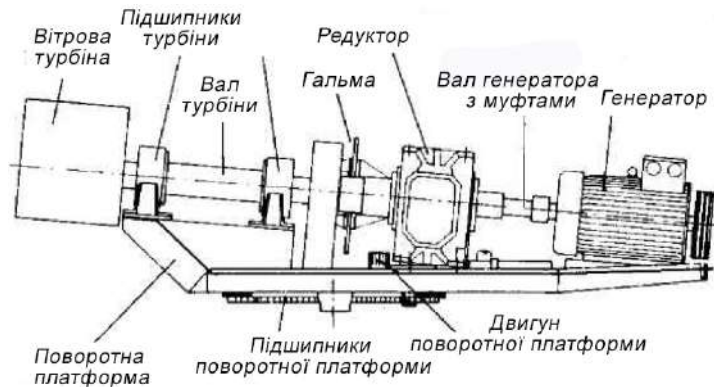


Рисунок 1 – Типова компоновка ВЕС

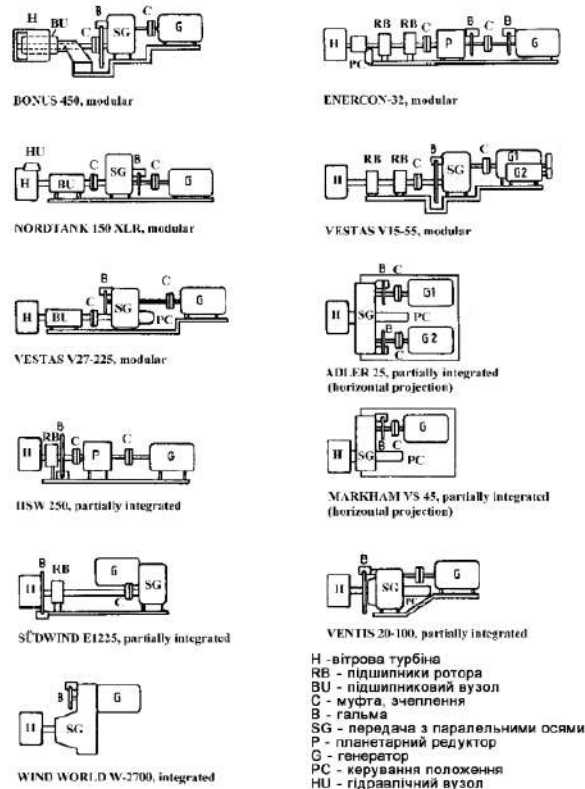


Рисунок 2 – Розповсюджені схеми вітрової установки

Метою роботи є розробка і обґрунтування конструктивних схем обладнання вітрогенераторів, які забезпечать комплексне підвищення енергетичної ефективності та ресурсозбереження.

Матеріали і результати досліджень. Можливості виготовлення одноступеневих редукторів з передавальними відношеннями, прийнятними для вітрогенераторів, обмежуються рядом конструктивних ускладнень [5]. Збільшення передавального відношення однієї ступені редуктора вимагає великої кількості зубців первинної шестерні редуктора. Розміри цих зубців повинні забезпечити їх механічну міцність при зусиллях, які діють на зубці вторинної шестерні. Згідно [6], руйнування зубців поділяють на два види:

- руйнування зубця від згинання в зоні його переходу в обід через високий рівень концентрації напружень;

- деформація або пошкодження поверхні зубця, яке, як правило, починається з утворення раковин та відколювання частинок зубця.

В загальному випадку, схема навантаження зубця має наступний вигляд (рис. 3) [6]:

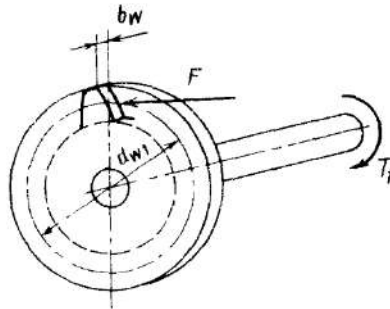


Рисунок 3 – Схема силового навантаження зубця.

T_1 – момент на валу, Нм; d_{w1} – діаметр початкового кола шестерні, мм; F – окружна сила, яка діє на зубець, Н.

Сила F , яка діє на зубець, збільшується зі збільшенням моменту на валу, та зменшується зі збільшенням швидкості обертання валу та міжосьової відстані. Відповідно до величини сили, кількості зубців і властивостей міцності матеріалу визначається робоча ширина зубця. Враховуючи практику розрахунків із величиною конструктивних розмірів у мм, для прямих зубців сила буде дорівнювати:

$$F = 2000 \cdot \frac{T_1}{d_{w1}}$$

При незмінних властивостях матеріалу за міцністю, збільшення потужності установки відповідно збільшує необхідну ширину шестерень, габарити та масу редуктора. Крім того виникають додаткові ускладнення із підвищенням вимог до паралельності валів редуктора, конструктивних особливостей шестерень великої товщини.

Для подолання вказаних недоліків одноступеневих редукторів у роботі розроблено конструктивну схему вітрогенератора з одноступеневим редуктором з кількома вихідними валами і багатомашинним електрогенератором, яка наведена на рис.4.

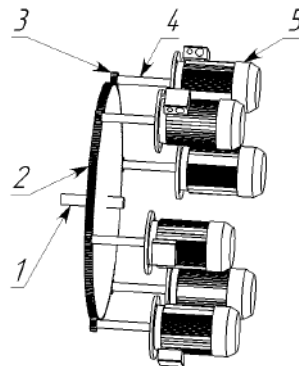


Рисунок 4 – Конструктивна схема одноступеневого редуктора з кількома вихідними валами.

1 – вхідний вал; 2 – зубчате колесо редуктора; 3 – шестерня редуктора; 4 – вихідний вал; 5 – електричний генератор.

Кількість електричних машин може бути різною і залежить від умов використання. За застосування розробленої схеми, порівняно з редуктором з одним вихідним валом, критичне зусилля на один зубець редуктора знижується пропорційно кількості вихідних валів. Це дозволяє зменшити розміри зубця, габарити та масу редуктора.

В загальному випадку, для прямозубих передач, ширина зубчатого колеса b_2 та, відповідно, шестерні b_1 визначається [7]:

$$b_2 = \psi_{ba}(u + 1) \sqrt[3]{\left(\frac{K_a}{[\sigma]_H}\right)^2 \cdot \frac{(T_1/n_B) \cdot K_H}{u^2 \cdot \psi_{ba}}}; \quad b_1 = b_2 + (5 \dots 10)\text{мм},$$

де ψ_{ba} – коефіцієнт ширини колеса по міжцентровій відстані (для прямозубих передач - $\psi_{ba} = 0,125 \dots 0,25$); u – передаточне число зубчатої передачі; T_1 – крутний момент на зубчатому колесі, Н·мм; n_B – кількість

вихідних валів; K_n – коефіцієнт навантаження; $[\sigma]_n$ – граничне контактне напруження зубця, МПа; K_a – синтетичний коефіцієнт.

Відповідно, маса зубчатого колеса визначиться як:

$$m_k = K_k \pi r_k^2 b_2 \rho,$$

де r_k - радіус колеса, м; ρ – щільність матеріалу, кг/м³; K_k – коефіцієнт, який враховує зменшення ваги колеса за рахунок проточок, отворів в тілі колеса.

Маса шестерні:

$$m_{ш} = K_{ш} \pi r_{ш}^2 b_1 \rho,$$

де $r_{ш}$ - радіус шестерні, м; $K_{ш}$ – коефіцієнт, який враховує зменшення ваги шестерні за рахунок проточок, отворів в тілі шестерні.

За використання розробленої конструктивної схеми масогабаритні показники редуктора знаходяться на рівні показників багатоступневих редукторів, а конструктивна простота і енергетична ефективність підвищуються. Підвищення ККД редуктора за розробленою схемою, порівняно з багатоступеневою, пояснюється одноетапною зміною параметрів енергії кількома паралельними її потоками. За умови рівномірного розподілу енергії між потоками, результуючий ККД відповідає ККД однієї зубчатої передачі.

Швидкість обертання вихідного валу:

$$\omega_{вих} = u \cdot \omega_{вх}$$

Момент на кожному з вихідних валів при рівномірному розподілу навантаження між ними:

$$T_2 = \frac{T_1}{n_{в} u}$$

Забезпечення ефективності роботи розробленої системи потребує рівномірного розподілу енергії між вихідними валами редуктора. Ця рівномірність може порушуватись розбіжністю параметрів зубцевих передач, електромагнітних і механічних параметрів електричних машин. В розробленій конструктивній схемі, рис. 5, рівномірність потоків енергії за валами забезпечується послідовною схемою з'єднання фаз обмоток статорів електричних генераторів.

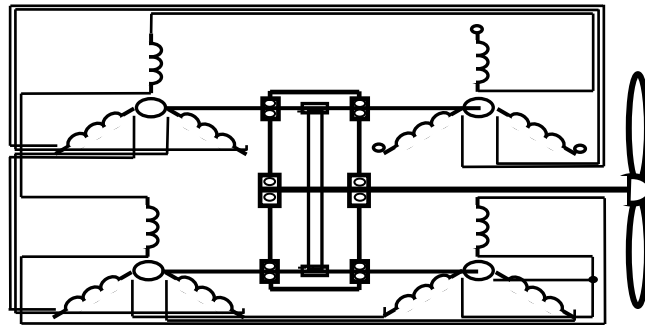


Рисунок 5 – Багатомашинна електромеханічна система вітрогенератора з двома вихідними валами одноступеневого редуктора.

На схемі (рис.5) вал повітряної турбіни закріплено у підшипникових опорах і з'єднано з зубчатим колесом редуктора між ними. На кінцях валів електричних генераторів жорстко закріплено їх ротори, а на середині – шестерні редуктора. Вали, з двох боків вторинних шестерень закріплено у підшипникових опорах, які, разом з опорами валу вітрогенератора, закріплено у підшипникових щитах корпусу редуктора. Вхідні виводи фазних обмоток статора першого генератора приєднано до електричної мережі, їх вихідні виводи з'єднано з вхідними виводами відповідних фазних обмоток статора другого генератора, електричне з'єднання другого і третього, а також третього і четвертого генераторів – аналогічне. Вихідні виводи четвертого генератора електрично з'єднано між собою. Статори генераторів приєднано до підшипникових щитів редуктора.

Висновки. Перевагами наведеної конструктивної схеми є те, що:

- наявність кількох вихідних валів одноступеневого редуктора зменшує його масу і габарити, забезпечує можливість великого передавального відношення;
- електричні генератори і редуктор виконано моноблочно, що мінімізує кількість підшипникових опор і втрати на тертя;
- розміщення двох електричних машин з двох сторін зубчастої передачі розвантажує конструкцію від зусиль перекосу і сприяє зменшенню втрат у редукторі;
- підсумовування потоків енергії через кілька вихідних валів здійснюється електрично на виході генераторів;
- вирівнювання завантаження електрогенераторів забезпечується послідовним з'єднанням фазних обмоток їх статорів;
- послідовне з'єднання статорних обмоток підвищує вихідну напругу, що дозволяє зменшити величину ємності компенсуючи конденсаторів пропорційно квадрату зміни напруги, зменшує втрати потужності в електричній мережі і сприяє отриманню схем вітроелектростанцій без вихідного трансформатора.

До недоліків такої конструктивної схеми слід віднести наявність кількох електричних машин, що зменшує їх габаритні потужності і ККД. Збільшення величини вихідної напруги повинно супроводжуватись підсиленням міцності ізоляції машини.

Знаходження балансу між вказаними перевагами і недоліками потребує оптимального проектування за комплексними критеріями ефективності системи, що забезпечує покращення техніко-економічних показників вітрогенераторів.

Список використаної літератури

1. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.
2. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О.В. Нойбергер, Д. Циленков; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
3. Кашкаров А.П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции. – М: ДМК Пресс, 2011. – 144 с.
4. Wind Power Plants. Fundamentals Design, Construction and Operation. / Robert Gasch, Jochen Tewe. // Second Edition. Springer Heidelberg Dordrecht, London, New York. 2012. 565 p. DOI 10.1007/978-3-642-22938-1
5. Pramod Jain. Wind Energy Engineering./ McGraw-Hill Companies, Inc. 2011. 350 p.
6. Биргер И.А. и др. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
7. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностр. Изд. 7-ое в 3-х томах. – М.: Машиностроение, 1992.

O. Popovych, Dr. Sc. Sciences, **ORCID** 0000-0002-9238-5782

The Institute of Electrodynamics

L. Listovshchyk, Cand. Sc. (Eng.), **ORCID** 0000-0003-3413-1802

A. Kribaa, student

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

COMPLEX DESIGN OF MULTI-MACHINE ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF WIND GENERATORS

The direction of modernization of the wind power plant is substantiated, which is aimed at a comprehensive increase in energy efficiency and resource conservation. Taking into account the reasons for the destruction of the teeth of the gear, a constructive scheme of a single-stage gearbox with several output shafts is proposed. This scheme allows you to distribute the output power to several electric machines, which, in turn, reduces the mechanical stress in the area of contact of the teeth of the gears and gears of the output shafts. Due to the division of the output power into several machines, the mass and dimensions of the gearbox are also reduced. The uniformity of power distribution on the shafts can be violated by the discrepancy between the parameters of gears, electromagnetic and

mechanical parameters of electric machines. In the proposed design scheme, the uniformity of energy flows along the shafts is ensured by a sequential connection of the phases of the stator windings of electric generators.

Keywords: wind generator, drive, electric generator, gear, reducer

REFERENCES

1. Neischerpaemaya e`nergiya. Kn. 1. Vetroe`lektrogeneratory` / V.S. Krivczov, A.M. Olejnikov, A.I. Yakovlev. – Uchebnik. – Khar`kov: Nacz. ae`rokosm. un-t «Khar`k. aviacz. in-t», Sevastopol` : Sevast. nacz. tekhn. un-t, 2003. – 400 s.
2. Osnovy vitroenerhetyky: pidruchnyk / H. Pivniak, F. Shkrabets, O75 N. Noiberher, D. Tsyplenkov; M-vo osvity i nauky Ukrainy, Nats. hirn. un-t. – D.: NHU, 2015. – 335 s.
3. Kashkarov A.P. Vetroheneratory, solnechnye batarey y druhye poleznye konstruksyy. – M: DMK Press, 2011. – 144 s.
4. Wind Power Plants. Fundamentals Design, Construction and Operation. / Robert Gasch, Jochen Twele. // Second Edition. Springer Heidelberg Dordrecht, London, New York. 2012. 565 p. DOI 10.1007/978-3-642-22938-1
5. Pramod Jain. Wind Energy Engineering./ McGraw-Hill Companies, Inc. 2011. 350 p.
6. Byrher Y.A. y dr. Raschet na prochnost detalei mashyn: Spravochnyk / Y.A. Byrher, B.F. Shorr, H.B. Yosylevych. – 4-e yzd., pererab. y dop. – M.: Mashynostroenye, 1993. – 640 s.
7. Anurev V.Y. Spravochnyk konstruktora-mashynostr. Yzd. 7-oe v 3-kh tomakh. – M.: Mashynostroenye, 1992.

Надійшла 30.11.2020
Received 30.11.2020

Л.Д. Третьякова, д-р. техн. наук, професор, ORCID 0000-0002-6909-4864
О.С. Ільчук, канд. техн. наук, ст. викл., ORCID 0000-0001-6352-5320
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АЛГОРИТМ РЕЙТИНГУВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОХОРОНОЮ ПРАЦІ

Запропонована система рейтингування однотипних електроенергетичних підприємств для оцінювання ефективності системи управління охороною праці. Наведено статистичну інформацію стосовно частоти виникнення нещасних випадків та їх наслідки для здоров'я працівників. Розглянуто новітні програми профілактики та усунення потенційних небезпек, які показують доцільність впровадження системи рейтингування. Розроблена методологія оцінки потенційних небезпек на підставі аналізу небезпечних і шкідливих професійних факторів. Розроблено алгоритм рейтингування на основі формальних показників безпеки за узагальненим методом Копленда. Проаналізовано основні причини виникнення нещасних випадків, які призводять до травмування та виникнення професійних захворювань серед працівників атомних електричних станцій. Виконано порівняльну оцінку небезпечних і шкідливих професійних факторів на робочих місцях працівників чотирьох атомних електричних станцій. Наведено результати розрахунків на кожній АЕС показників безпеки: коефіцієнтів виробничого травматизму, профзахворювань, умов праці, небезпечності технологічних процесів та будівель, забезпечення засобами індивідуального захисту, витрат на охорону праці та ризиків настання нещасних випадків. Представлено результати рейтингування чотирьох АЕС.

Ключові слова: *рейтингування; показники безпеки; охорона праці; атомна електрична станція; метод Копленда.*

1. Вступ

Безпека працівників є важливим елементом у системі соціального захисту. Відносини у сфері безпеки та здоров'я працівників регулюються державними законами та галузевими нормативно-правовими актами України. Відбувається реалізація державної політики у цій сфері на всіх рівнях виконавчої влади з використанням механізмів соціального діалогу. Нині в Україні поступово зменшується кількість нещасних випадків та зумовлених ними травм. Інформація, яка наведена у звітних державних документах про стан безпеки праці на виробництві, показує щорічне зменшення кількості загиблих і травмованих працівників. 2013 року кількість загиблих становила 623 особи, кількість травмованих – 9 816 осіб, 2018 року кількість загиблих – 350 осіб, кількість травмованих – 5 286 осіб, 2019 року кількість загиблих – 410 осіб, травмовано – 4 394 осіб, 2020 року кількість загиблих – 422 особи, травмовано – 3 876 осіб [1].

Однак порівняльний аналіз з показниками країн Європейського Союзу (ЄС) свідчить про певні розбіжності у підготовці та оцінюванні умов виникнення нещасних випадків та їх наслідків [2]. Нині розроблено проект нового закону «Про безпеку та здоров'я працівників на роботі», який відповідає чинним міжнародним договорам та Європейським Директивам [3].

2. Постановка (актуальність) проблеми

В Україні керівники підприємств постають перед труднощами в своєму прагненні знизити або усунути професійні ризики через відсутність або небажання вкладання матеріальних ресурсів у основні виробничі фонди. Основними обставинами, внаслідок яких виникли травми або професійні захворювання 2019 року, є: застарілість і зношеність механізмів та робочого інструменту (22,3 % від загальної кількості); недосконалість технологічного процесу (20,9 %); невикористання засобів індивідуального захисту (10,6 %). Майже 61 % нещасних випадків на робочому місці, що призводять до відсутності на роботі більш як три дні, припадає на три галузі: вугільну (гірник очисного забою і прохідник) – 36,7 %; торгівельну (водій автотранспортних засобів) – 15,9 %, будівництво (будівельник) – 8 %. Незадовільні умови праці, робота під впливом небезпечних і шкідливих професійних факторів (НШПФ) є основними причинами виникнення професійних і супутніх до них захворювань [4].

З іншого боку, виробничий травматизм зумовлено низьким рівнем ефективності заходів з виробничої безпеки. Головна спрямованість охорони здоров'я працівників та виробничої безпеки – це запобігання нещасним випадкам на робочому місці через впровадження ефективних заходів безпеки, які доцільно реалізувати за певних умов праці. Управління ризиками є одним з основних заходів, спрямованих на боротьбу з усіма видами професійних травм або захворювань [5].

Комфортні умови праці й фізичне здоров'я співробітників мають важливе значення для виконання своїх професійних обов'язків та розвитку виробництва [6]. З погляду економічних і соціальних витрат, впровадження дієвих заходів із запобігання нещасним випадкам забезпечує суттєву користь [7]. Наслідки від нещасних випадків та професійних захворювань призводять до великих економічних втрат, які пов'язані з втратою працездатності працівниками, із руйнуванням або пошкодженням виробничого устаткування, із зупинкою або затримкою технологічного процесу [8]. У разі нещасних випадків виникають додаткові виробничі витрати, які пов'язані з текучістю кадрів, залученням і навчанням нових працівників, медичними, страховими та юридичними видатками [9]. За оцінками International Labour Organization кожна розвинена країна світу щорічно втрачає через нещасні випадки на виробництві та професійні захворювання до 4 % від загального національного продукту [10].

Стосовно України обсяг витрат від виробничого травматизму та професійних захворювань щорічно з 2014 до 2018 становив до (60...70) млрд грн [11]. Такі витрати зумовлено щорічним припиненням трудової діяльності до 6 тис. працівників, які стали інвалідами, та смертю до 600 осіб. Основні видатки у разі нещасного випадку спричинені виплатами одноразової допомоги та витратами, у разі якщо людина втрачає працездатність і стає інвалідом [12].

В країнах ЄС впроваджено систему, яка передбачає спільну діяльність роботодавця і працівників у визначенні та усвідомлюванні всієї наявної інформації про НШПФ робочого середовища, фактичні умови й характер роботи, взаємодію з іншими ризиками, рекомендації компетентних органів у сфері безпеки та здоров'я працівників на роботі [13].

Для реалізації таких вимог потрібно впроваджувати систему моніторингу та документування ймовірних небезпек на кожному робочому місці [14]. Система моніторингу дає можливість реально оцінити існуючі небезпеки і в подальшому розробити програму профілактики [15]. Програма профілактики задумана як головний інструмент, який можна використовувати для досягнення відповідності із законодавством з безпеки [16]. Програма як мінімум, охоплює такий обсяг інформації: виявлення небезпеки й пов'язані з ними нещасні випадки; оцінки початкового ризику (високий, критичний, допустимий, низький); ідентифіковані заходи щодо зниження ризику; методи щодо вибору заходів і перевірки зменшення ризиків. Мета такої програми полягає в тому, щоб відповідно до зафіксованих НШПФ відстежувати й усувати потенційні небезпеки, пропонуючи певні дії для безпеки та здоров'я працівників.

Невід'ємним етапом зменшення ризику виробничого травматизму та професійних захворювань є процес вибору заходів з усунення виробничих небезпек та прийняття управлінських рішень з охорони праці. Процес прийняття рішень передбачає орієнтацію на кваліфікацію наявного складу працівників, їхню компетенцію, можливі навмисні та ненавмисні помилкові дії, готовність сприймати та дотримуватися встановлених вимог щодо безпеки виконання робіт [17]. Відповідно, порівняльний аналіз управлінських рішень доцільно виконувати на підприємствах в межах окремих галузей. За допомогою порівняльного аналізу можна пояснити наскільки ефективна профілактика, нормативна база, сфера та способи усунення ризиків на кожному конкретному підприємстві.

Головний принцип цієї статті – це вибір стратегії управління безпекою на електроенергетичних підприємствах з великим ризиком. У статті запропоновано рейтингування однотипних підприємств, безпека яких зумовлена особливостями виробничого устаткування. Головним критерієм ефективності методів керування ризиками повинно бути усунення або обмеження НШПФ до допустимого рівня кожному робочому місці.

3. Мета та завдання

Мета статті – розробка формального апарату до оцінки ефективності функціонування системи управління охороною здоров'я та безпеки працівників на електроенергетичних підприємствах з підвищеними ризиками виникнення нещасних випадків з використанням рейтингування за узагальненим методом Копленда. Модифікований до вимог поставлених завдань алгоритм спрямовано на визначення рангової шкали підприємств за стандартизованими показниками безпеки.

4. Матеріал і результати досліджень

Роботи в електроенергетичній галузі віднесено до робіт з підвищеною небезпекою. Під час виконання робіт у діючих електроустановках електротехнічні працівники стикаються з небажаними подіями, вплив яких може становити загрозу для їх життя та здоров'я. Особливу небезпеку становлять роботи під напругою та поблизу електроустановок, що може призвести до: ураження електричним струмом у разі дотику до струмовідних частин; впливу електромагнітного поля промислової частоти; потрапляння під наведену напругу, яка виникає в аварійних режимах або переключеннях у мережах зв'язку, лініях електропередавання низької напруги та металевих конструкціях, які розташовано поблизу діючих електроустановок; потрапляння під дію напруги кроку на поверхні ґрунту; впливу акустичного шуму від трансформаторів,

вітрових електричних станцій і повітряних ліній; виконання робіт на висоті у незручних робочих положеннях.

Інша категорія людей, яка піддається впливу аналогічних НШПФ – це населення, яке проживає поблизу діючих електроустановок зовнішнього розташування. Щорічно фіксують до п'ятдесяти сторонніх осіб, які гинуть у небезпечних зонах поблизу діючих електроустановок.

Аналіз статистичної інформації щодо виникнення нещасних випадків на підприємствах енергетичного комплексу підтверджує високий рівень травмування серед електротехнічних працівників (рис. 1).

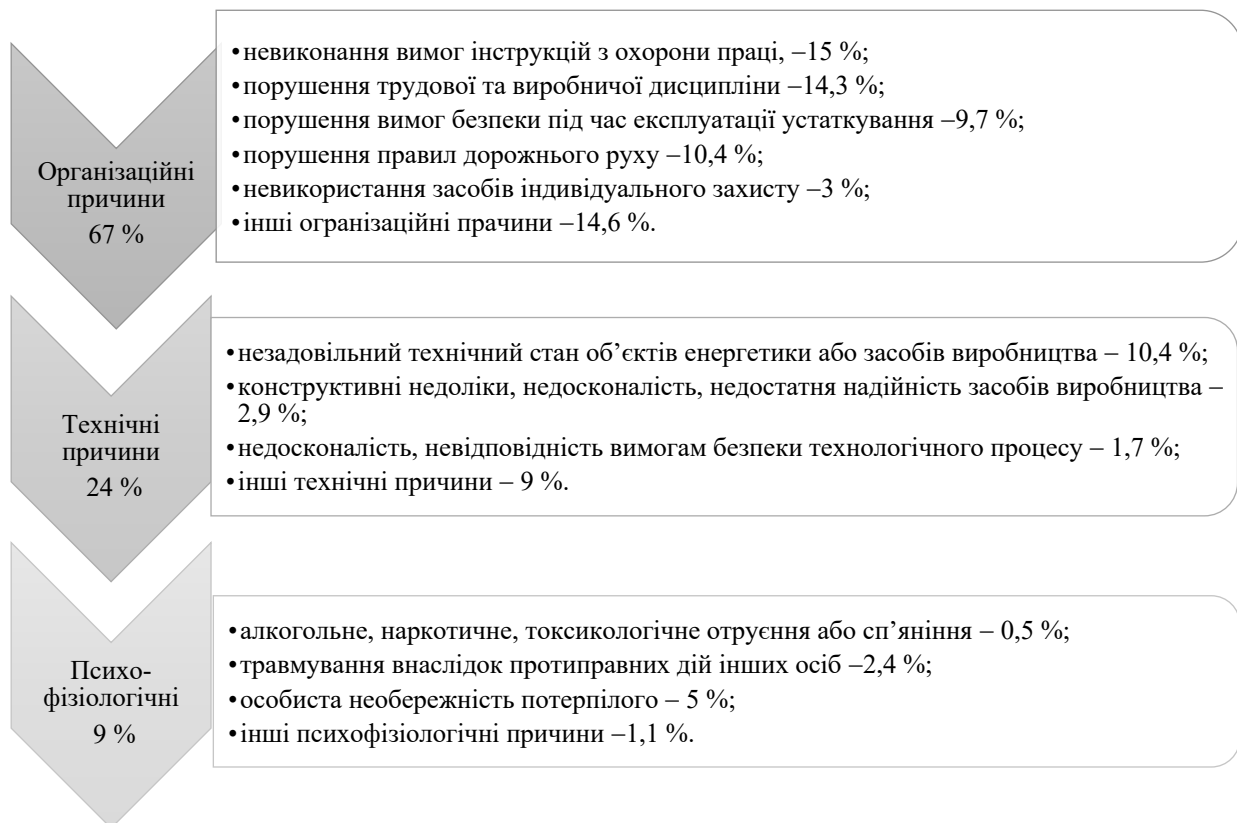


Рисунок 1 – Основні причини виробничого травматизму в галузі електроенергетики

2018 року сталося 85 нещасних випадків, у яких потерпілими були 87 працівників, з них сім – зі смертельним наслідком. У 2017 році зареєстровано 65 нещасних випадків, внаслідок яких травмовано 77 працівників, із них дев'ять – зі смертельним наслідком [18]. 55 % від загальної кількості загиблих припадає на ураження електричним струмом; 30 % – на події, що сталися на транспорті; 10 % – дія температур, пожежі, вибухів, шкідливих і токсичних речовин; 5 % – падіння, обрушення, обвалення предметів, матеріалів, породи, ґрунту. Найбільш травмонебезпечними професіями на підприємствах галузі за останні роки були:

- електромонтер (40 % від загальної кількості загиблих на підприємствах галузі);
- електрослюсар з ремонту обладнання розподільчих пристроїв (25 % від загальної кількості загиблих на підприємствах галузі).

Процес експлуатації електричних станцій, особливо атомних (АЕС), пов'язано зі складними та багатофункціональними виробничими процесами, що створюють небезпеки для працівників і довкілля. Накопичений досвід експлуатації АЕС у світовій практиці свідчить, що навіть найвищі вимоги до якості устаткування не в змозі запобігти виникненню аварійних ситуацій [19]. Зношеність і низький рівень оновлення основних виробничих фондів АЕС України зумовлюють високу аварійність, а застаріла технологічна база призводить до утворення великої кількості НШПФ у ході експлуатації та утилізації радіоактивних відходів [20]. В Україні відповідно до рекомендацій International Atomic Energy Agency ухвалено низку законодавчих документів з промислової безпеки та охорони здоров'я на радіаційно-небезпечних об'єктах [21, 22, 23]. Чинне законодавство визначає основні вимоги до охорони здоров'я працівників від можливої шкоди внаслідок опромінення та ймовірних забруднень довкілля.

У статті запропоновано алгоритм до оцінювання ефективності функціонування системи управління охороною здоров'я і безпеки працівників на прикладі чотирьох діючих АЕС.

4.1. Експериментальна інформація

На АЕС України завдяки впровадженню наявних інженерно-технічних заходів не вдається уникнути впливу НШПФ. На чотирьох АЕС щорічно реєструють високий рівень працюючих в умовах, у яких перевищено гранично допустимі рівні або концентрації НШПФ. Загальна кількість працівників на АЕС налічує більш як 36 тисяч осіб, на допоміжних об'єктах – до 5 тис., жінки становлять до 35 %. Нині більш як 20% персоналу АЕС працює в шкідливих умовах, 40% – в особливо шкідливих умовах, для 69% умови праці на робочому місці не відповідають санітарно-гігієнічним нормативам. На робочих місцях працівники підпадають під вплив одночасно двох і більше НШПФ, серед яких: шкідливі хімічні речовини (10%); пил й аерозолі (23%); пил та аерозолі з радіонуклідами (16%); вібрація (3%); шум, інфразвук, ультразвук (32%); іонізуючі випромінювання (36 %); неіонізуючі випромінювання (0,9%). Кількість працівників, які перебувають під впливом іонізуючого випромінювання, практично не змінюється [24]. Щорічно через хвороби втрачається 1 600 ... 1 750 робочих днів на 100 працівників, а на всіх АЕС досягає до 40 тисяч днів.

Аналіз умов праці на кожній з чотирьох АЕС виявив певні особливості, про що свідчить статистична інформація за 2015 рік (табл. 1).

Таблиця 1. Інформація про наявність НШПФ

Вид НШПФ	Кількість працюючих в шкідливих умовах, % загальної кількості			
	Хмельницька АЕС	Запорізька АЕС	Рівненська АЕС	Південно-Українська АЕС
Шкідливі хімічні речовини	9,7	9,5	3,2	11,2
Пил і аерозолі фіброгенної дії	23	8,7	27	18
Пил і аерозолі з радіонуклідами	15	18	12	20
Вібрація	1,9	9,1	0,15	0,2
Шум, інфразвук, ультразвук	22,2	42,1	40,8	23,3
Іонізуючі випромінювання	38,5	34,4	40,7	33,1
Неіонізуючі випромінювання	1,1	0,6	1,1	0,35
Рідкі радіоактивні відходи	16,3	33,9	33,5	58,8
Біологічні чинники	2,5	-	-	-

Робота на АЕС характеризується високим рівнем важкості та напруженості: до 27,5 % працівників мають третій рівень важкості праці; 31,3 % – підвищений рівень напруженості (табл. 2).

Таблиця 2. Інформація про умови праці персоналу АЕС

Вид робіт	Кількість працюючих з підвищеним рівнем важкості і напруженості, % загальної кількості			
	Хмельницька АЕС	Запорізька АЕС	Рівненська АЕС	Південно-Українська АЕС
Підвищена важкість праці	9,7	9,5	3,2	11,2
Незручні робочі пози	23	8,7	27	18
Підвищена напруженість праці	30	31	28	35

Окрім впливу НШПФ 70 % працівників АЕС зазнають електростатичні ризики через наявність статичної електрики на робочих місцях і 22 % працівників – теплові ризики, які спричинено роботою за підвищених температур (40...60) °С з високим рівнем важкості (табл. 3).

Таблиця 3. Інформація про мікрокліматичні умови праці персоналу АЕС

Характеристика показників	Кількість працюючих під впливом електростатичних і теплових полів, % загальної кількості			
	Хмельницька АЕС	Запорізька АЕС	Рівненська АЕС	Південно-Українська АЕС
Незадовільні умови мікроклімату	9,7	9,5	3,2	11,2
Підвищена температура назовні	23,1	8,7	27,2	18,1
Наявність статичної електрики на робочому місці	68,1	64,3	72,0	76,0

За роботу в шкідливих і важких умовах працівникам надають пільги, додаткові оплати та пільгові пенсійне забезпечення. Інформація щодо пільг та компенсацій за важку роботу в шкідливих умовах на прикладі Хмельницької АЕС наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Перелік пільг і компенсацій для працівників АЕС

Пільги та компенсації за роботу в шкідливих умовах	Кількість працівників, які отримують пільги, %	Щорічні витрати	
		Загальні, тис. грн	Середні на особу, грн
Додаткові дні до відпустки за роботу в шкідливих умовах	23	4 549	3 855
Додаткові дні до відпустки за важку і напружену роботу	47	11 067	4 230
Скорочений робочий тиждень	37	7 507	3 910
Доплати за шкідливі умови праці	64	12 822	3 855
Додаткові харчові продукти	27	2 002	1 430
Лікувально-профілактичне харчування	37	693	361
Отримання пенсії за пільгових умов	5	1 067	5 091

На Хмельницькій АЕС планують і фінансують заходи з охорони праці: атестація робочих місць; навчання працівників безпечним способам виконання робіт; придбання засобів дезактивації, гігієни та засобів індивідуального захисту тощо. Щорічно на такі заходи витрачають до 6 500 тис. грн. Як свідчить наведена інформація, затрати на впровадження заходів безпеки порівняно з виплатами пільг і компенсацій за роботу у шкідливих умовах (39 707 грн) становлять до 17 %. Це підтверджує висновки інших авторів про неефективність заходів з охорони праці, які не забезпечують допустимих умов праці [25].

4.2. Методи досліджень

Невід'ємним етапом зменшення ризику виробничого травматизму та професійних захворювань є впровадження ефективних управлінських рішень з охорони праці. Вирішення завдань планування та управління найчастіше здійснюють в умовах недостатності або невизначеності потрібної формальної інформації [26]. Окрім числових статистичних даних, інформація може охоплювати інші, неформальні величини, які не підпадають безпосередньому виміру. Оцінювання ризиків виникнення нещасних випадків у майбутньому тільки на підставі статистичних даних з минулого, без урахування технічного та технологічного розвитку виробництва, підвищення компетенцій працівників і культури безпеки, завжди вимагають неформальних припущень, заснованих на певних гіпотезах. Наявність інформації та коректність математичних моделей великою мірою зумовлюють раціональність вибраних рішень.

Виконані дослідження показали, що використання математичних моделей і правил ранжування дає можливість запровадити рейтингову систему за формальними показниками. Встановлення рейтингу серед однотипних підприємств дає змогу комплексно оцінити ефективність функціонування системи управління охороною праці на кожному підприємстві [27]. Рейтинг ілюструє конкурентні переваги одних підприємств над іншими, мотивуючи керівництво до здійснення дій з поліпшення безпеки праці. Доцільність таких щорічних рейтингових оцінок очевидна для об'єктів державної власності. Наприклад, на покращення умов

праці на АЕС щорічно виділяють великі інвестиції, однак, як показує аналіз статистичної інформації за п'ять років, кількість працівників, котрі підпадають під вплив НШПФ та працюють в умовах, які не відповідають санітарно-гігієнічним вимогам, практично не змінюється. Відповідно до діючого законодавства, такі працівники отримають додаткові пільги (див. табл. 4), які вимагають великих грошових ресурсів. Рівень ефективності системи управління охороною праці потрібно контролюватися системно та комплексно, інакше інвестиції будуть витрачені даремно. Рейтингування можна вважати одним із ефективних способів діагностики рівня ефективності управління та планування – комплексною складовою аналізу. Процес оцінювання рівня безпеки через рейтингову оцінку передбачає виконання трьох етапів (рис. 2).

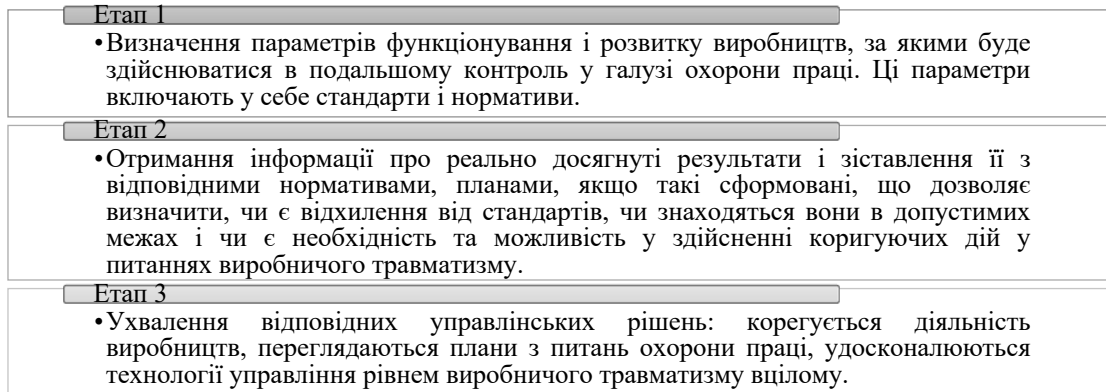


Рисунок 2 – Послідовність рейтингового оцінювання

Ухвалення рішення у ході рейтингування можна розглянути як окремий випадок завдання багатокритеріального вибору на кінцевій безлічі альтернатив $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$.

Запропоновано для рейтингової оцінки використати загальні показники, які відображають рівень безпеки праці. Завдання прийняття рішень під час рейтингування підприємств з однотипними показниками, які визначають рівень безпеки та обмежують НШПФ, можна сформулювати у такий спосіб:

Задано A підприємств, кожне з яких має критерій $F_i(x)$

$$F_i(x) : X \rightarrow \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

і потрібно встановити послідовність розташування $F_i(x)$ в порядку зменшення переваг щодо показників безпеки та обмеження ризиків.

Найбільшою проблемою для формування рейтингу та ранжування є приховування фактів щодо виникнення нещасних випадків та їх наслідків. Неповнота інформації призводить до відсутності лінійного упорядкування всіх елементів, які відображають якісно однакові показники та розміщуються в одній ієрархії. Утворена математична модель за неповної інформації не надає достовірних оцінок до подальшого вирішення. Поповнення інформації здійснюється через парні порівняння з урахуванням відсутніх значень, які можна замінити середніми величинами із загальної сукупності [28]. У такий спосіб отримуємо таблицю парних порівнянь, яка містить поповнену інформацію та придатна до визначення рейтингів різними методами [29]. Вирішення такого завдання у статті реалізовано за узагальненим правилом Коупленда.

Адаптований алгоритм має таку послідовність.

1. Аналізується щорічна статистична інформація щодо показників виробничого травматизму, профзахворювань, умов праці й небезпеки виробничого обладнання та технологічних процесів. Додаткова надається інформація про загальну кількість працівників, кількість нещасних випадків та профзахворювань, імовірності виникнення нещасних випадків, можливі збитки у разі їх виникнення. Виявляються наявні небезпеки та ризики.

2. Розраховуються показники для кожного підприємства A_i .

3. Формується матриця спостережень, яка має вигляд:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1i} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{j1} & \dots & x_{ji} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де x_{ji} – j -й показник A_i -го підприємства.

4. Оцінюється парне домінування між кожним підприємством (A_{i-1}, A_i) за всіма показниками. За правилом Копленда надаються оцінки: оцінка (+1), якщо показник x_{ji} менший за значенням; оцінка (-1), якщо показник x_{ji} більший; оцінка (0) за однакових значень показників.

5. Підсумовуючи бали, які отримано у ході парних порівнянь, визначимо оцінку Копленда до кожного показника.

6. Обчислюється коефіцієнт Копленда для кожного підприємства за формулою:

$$K(A_i) = |B(A_i) - W(A_i)|, i = \overline{1, m}, \quad (2)$$

де A_i – умовне позначення i -го підприємства; $B(A_i)$ – кількість підприємств, які мають кращі показники ніж те, яке розглядається; $W(A_i)$ – кількість підприємств, які мають гірші показники ніж те, яке розглядається; m – загальна кількість підприємств у рейтингуванні.

Отриманий у такий спосіб рейтинг кожного підприємства дорівнює різниці між кількістю підприємств з кращими та гіршими показниками.

7. Найвищий рейтинг надається підприємству з найбільшим значенням коефіцієнту Копленда $K(A_i)$.

8. Послідовність розташування підприємств упорядковуються в порядку зменшення $K(A_i)$.

4.3 Результати дослідження

Запропонований алгоритм використано до рейтингування показників з охорони праці на чотирьох АЕС. Оцінки показників отримано зі звітної документації Рівненської АЕС (A_1), Хмельницької АЕС (A_2), Запорізької АЕС (A_3), Південно-Української АЕС (A_4) за 2011–2015 роки. Відповідна інформація наведена у формах № 1-ПВ (Звіт про стан умов праці, пільги та компенсації за роботу із шкідливими умовами праці) і № 1-УБ (Звіт про стан, умови та безпеку праці), затверджених наказом Держкомстату України від 17.07.2007 р. N 223.

Ранжування здійснено за такими показниками: виробничого травматизму, профзахворювань, умов праці, небезпечності технологічних процесів, забезпечення засобами індивідуального захисту, небезпеки будівель та споруд, витрат на охорону праці та ризику настання нещасного випадку (табл. 5).

Таблиця 5. Статистичні показники

Позначення показників	Найменування показника	Формула	Пояснення до формули
$k_{\text{тп}}$	Коефіцієнт виробничого травматизму	$k_{\text{тп}} = \frac{y_1}{N} \cdot 1000$	y_1 – кількість потерпілих у результаті нещасного випадку; N – загальна кількість працівників
$k_{\text{пз}}$	Коефіцієнт профзахворювань	$k_{\text{пз}} = \frac{y_2}{N} \cdot 1000$	y_2 – кількість зареєстрованих профзахворювань.
$k_{\text{уп}}$	Коефіцієнт умов праці	$k_{\text{уп}} = \frac{y_3}{N}$	y_3 – кількість працюючих у незадовільних умовах праці.
$k_{\text{зз}}$	Коефіцієнт забезпечення засобами індивідуального захисту	$k_{\text{зз}} = 1 - \frac{y_4}{y_5}$	y_4, y_5 – реальна і потрібна кількість засобів індивідуального захисту.
$k_{\text{нбс}}$	Коефіцієнт небезпеки будівель та споруд	$k_{\text{нбс}} = \frac{y_6}{y_7}$	y_6 – кількість аварійних будівель та споруд; y_7 – загальна кількість будівель та споруд.
$k_{\text{витр}}$	Коефіцієнт витрат на охорону праці	$k_{\text{витр}} = \frac{C}{C_3}$	C – витрати відшкодування потерпілим від нещасних випадків та профзахворювань, на розслідування і ліквідацію нещасних випадків, на виплату штрафів, затрати на пільги; C_3 – загальний обсяг витрат на заходи з охорони праці
$R_{\text{н}}$	Ризик настання нещасного випадку	$R_{\text{н}} = P_{\text{н}} \cdot K$	$P_{\text{н}}$ – ймовірність настання нещасного випадку протягом року; K – коефіцієнт втрати працездатності

Відповідно до наведених формул (табл. 5) обчислено середні значення показників (табл. 6).

Таблиця 6 – Середні значення показників

Показники	Номер показника	Рівненська АЕС	Хмельницька АЕС	Запорізька АЕС	Південно-Українська АЕС
$K_{тр}$	1	0,12	0,26	0,35	0,14
$K_{пз}$	2	0,12	0,09	0,17	0,14
$K_{уп}$	3	0,13	0,09	0,08	0,78
$K_{зіз}$	4	0,06	0,03	0,05	0,08
$K_{нбе}$	5	0,005	0,002	0,0025	0,004
$K_{витр}$	6	0,078	0,05	0,06	0,69
R_n	7	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$

За результатами розрахунків побудовано таблицю з парними порівняннями (табл. 7).

Таблиця 7. Таблиця парних багатокритеріальних порівнянь

	Показники	Рівненська АЕС	Хмельницька АЕС	Запорізька АЕС	Південно-Українська АЕС
Рівненська АЕС	$K_{тр}$		0	-1	-1
	$K_{пз}$		1	-1	-1
	$K_{уп}$		1	1	1
	$K_{зіз}$	×	1	1	1
	$K_{нбе}$		1	1	1
	$K_{витр}$		1	1	1
	R_n		1	1	-1
Хмельницька АЕС	$K_{тр}$	1		-1	1
	$K_{пз}$	0		-1	-1
	$K_{уп}$	0		1	1
	$K_{зіз}$	0	×	-1	-1
	$K_{нбе}$	0		-1	-1
	$K_{витр}$	0		-1	-1
	R_n	0		-1	-1
Запорізька АЕС	$K_{тр}$	1	1		1
	$K_{пз}$	1	1		1
	$K_{уп}$	-1	-1		1
	$K_{зіз}$	-1	1	×	-1
	$K_{нбе}$	-1	1		-1
	$K_{витр}$	-1	1		-1
	R_n	-1	1		-1
Південно-Українська АЕС	$K_{тр}$	1	-1	-1	
	$K_{пз}$	1	1	-1	
	$K_{уп}$	-1	-1	-1	
	$K_{зіз}$	1	1	1	×
	$K_{нбе}$	-1	1	1	
	$K_{витр}$	-1	1	1	
	R_n	1	1	1	

Відповідно до розробленого алгоритму (ф. 2) визначено коефіцієнт Коупленда (табл. 8).

Таблиця 8. Сумарні значення оцінок парних порівнянь за всіма показниками

	Рівненська АЕС	Хмельницька АЕС	Запорізька АЕС	Південно-Українська АЕС
Рівненська АЕС	×	6	3	1
Хмельницька АЕС	1	×	-6	-5
Запорізька АЕС	-5	6	×	-1
Південно-Українська АЕС	1	5	1	×
Сума оцінок	-3	17	-2	-5

На закінчення розрахунків визначаємо зважену оцінку кожного з альтернативних гіпотез за коефіцієнтом Коупленда та здійснюємо їх ранжування (табл. 9).

Таблиця 9. Ранжування за коефіцієнтом Копленда

АЕС	W	B	$K(A_i)$	Ранг
Рівненська АЕС	1	2	-1	3
Хмельницька АЕС	3	0	3	1
Запорізька АЕС	2	1	1	2
Південно-Українська АЕС	0	3	-3	4

Графічна інтерпретація результатів розрахунків (табл. 9) інтегральних оцінок серед усіх альтернатив з визначенням їх пріоритетів представлена на (рис. 3)

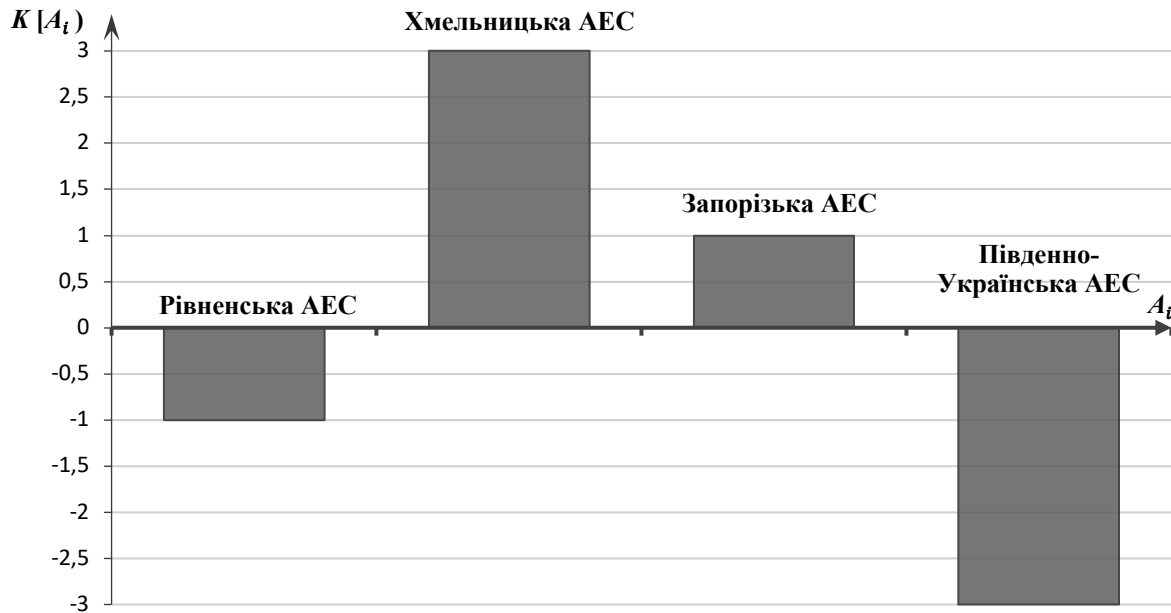


Рисунок 3 – Рейтингова оцінка АЕС

Отримані результати засвідчили, що АЕС, які належать до одного керівного органу НАЕК «Енергоатом» України та отримують щорічно відповідні матеріальні та грошові ресурси на реалізацію безпечних умов праці, мають різні рейтинги за умовами безпеки. Рейтингування дає змогу констатувати, що відповідно до щорічної звітної документації, найбільш ефективно функціонує система управління охороною праці на Хмельницькій АЕС.

Висновки

Результати досліджень, які представлено у статті, дали можливість обґрунтувати доцільність впровадження системи рейтингування однотипних підприємств з метою оцінювання ефективності функціонування системи управління охороною праці.

Запропоновано здійснити рейтингування через побудову таблиці парних порівнянь на основі формальних статистичних показників, які відображають рівень безпеки праці. Таблиця містить такі показники: коефіцієнти виробничого травматизму, профзахворювань, умов праці, небезпечності технологічних процесів і будівель, забезпечення засобами індивідуального захисту, витрат на охорону праці та ризик настання нещасного випадку. Вирішення завдання рейтингування у статті реалізовано за узагальненим методом Копленда. Розроблено алгоритм до вирішення поставленого завдання, який містить такі кроки: визначення показників безпеки за щорічною статистичною інформацією для усіх підприємств; формування матриці спостережень з відповідними значеннями показників; оцінювання парного порівняння між підприємствами за правилом Копленда; підсумування балів за всіма показниками; визначення коефіцієнту Копленда для кожного підприємства. Найвищий рейтинг надається підприємству з найбільшим значенням коефіцієнту Копленда. У статті представлено приклад рейтингування чотирьох АЕС. Щорічна система рейтингування дасть змогу оцінити ефективність функціонування системи охорони праці на підприємстві та запобігти нераціональному витрачання матеріальних і грошових ресурсів.

Список використаної літератури

1. Травматизм на виробництві в Україні у 2020 році, статистичний збірник. URL: www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2018/zb/05/zb_tv_2017.pdf
2. Таирова Т.М. Проблемні питання охорони праці в Україні. *Проблеми охорони праці*. 2016. № 32. С. 3–15.
3. Проект Закону України «Про безпеку та здоров'я працівників на роботі» URL: <https://www.me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&isSpecial=True&id=2aef0adc-3565-4b0c-a018-df258017427a&title=ProektZakonuUkrainiproBezpekuTaZdoroviaPratsivnikivNaRoboti>.
4. Sheezen Oah, Rudia Na, Kwangsu Moon. The Influence of Safety Climate, Safety Leadership, Workload, and Accident Experiences on Risk Perception: A Study of Korean Manufacturing Workers. *Safety and Health at Work*. 2018, No. 9. P. 427–433.
5. Badri A., Nadeau S., Gbodossou A. Proposal of a risk-factor-based analytical approach for integrating occupational health and safety into project risk evaluation. *Accident Analysis and Prevention: Construction and Engineering*. 2012. Vol. 48. P. 223–234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.05.009>
6. Sabourin G. L'efficacité des programmes de Mieux-Être au travail, ça se mesure! Prévention au Travail, Reportage. Institut universitaire en déficience intellectuelle et en trouble du spectre de l'autisme, Québec, 2016. 64 p. URL: http://institutditsa.ca/file/etmi_app_positive_rapport.pdf
7. Tremblay A., Badri A. Assessment of occupational health and safety performance evaluation tools: State of the art and challenges for small and medium-sized enterprises. *Safety Science*. 2018. Vol. 101. P. 260-267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.09.016>.
8. Pillay M. Resilience Engineering: An Integrative Review of Fundamental Concepts and Directions for Future Research in Safety Management. *Open Journal of Safety Science and Technology*. 2017. Vol. 7. P. 129-160. DOI : <https://doi.org/10.4236/ojsst.2017.74012>.
9. Huizinga N.C., Davis J.A., Gerr F., Fethke N.B. Association between Occupational Injury and Subsequent Employment Termination among Newly Hired Manufacturing Workers. *International Journal Environmental research and public health*. 2019. Vol. 16, No. 3: 433. DOI : <https://doi.org/10.3390/ijerph16030433>.
10. Safety and Health at Work. *International Labour Organization*. URL: <http://www.ilo.org/global/topics/safety-and-health-at-work/lang--en/index.htm>
11. Профілактика виробничого травматизму. *Звіти фонду соціального страхування України*. URL: <http://www.fssu.gov.ua/fse/control/main/uk/index>.
12. Форостянина Н.С., Малахін О.В. Про страхову оцінку виробничого травматизму. *Проблеми охорони праці*. 2014. Вип. 28. С. 86–101.
13. Bignon Ch., Badri A. A Comparative Analysis of the Two Main Documents Used in Small and Medium-Sized Enterprises in France and Québec as a Framework for Improving Occupational Health and Safety. *Open Journal of Safety Science and Technology*. 2019. Vol. 9, No. 1. P. 22–36. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojsst.2019.91003>
14. Kruzhilko O., Polukarov O., Kalinchyk V., Tkalych I. Improvement of the workplace environmental physical factors values monitoring by determining the optimal interval for their control. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 99. P. 42–49.
15. Bochkovskiy A. Actualization of the scientific principles elaboration on evaluating the risks of occupational danger occurrence. *Науковий вестник Національного Горного Університета*. 2018. No. 6. С.96–103. DOI : <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018/14>.
16. Joseph A. Dean. A probability risk assessment to support a defensible and quantitative safety assessment of the assault amphibious vehicle. Monterey, CA; Naval Postgraduate School, 2018. 95 p.
17. Kruzhilko O., Maystrenko V. Management decision-making algorithm development for planning activities that reduce the production risk level. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 2019. Vol. 93. P. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.4141>
18. Виробничий травматизм. Міністерство енергетики України. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=202151
19. Ващенко В. Н., Кордуба И. Б., Кризская Ю. М. Сравнительный анализ и радиационно-экологические последствия тяжелых аварий на ЧАЭС и Фукусима-1. *Вісник Криворізького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2017. Вип. 3. С. 114–123. URL: http://www.kdu.edu.ua/PUBL/statti/2017_3_114-123_3-2017-1.pdf
20. Деренговський В. В., Носовський А. В. Стан проблеми щодо проведення багатокритеріального аналізу безпеки об'єктів із радіаційно-ядерними технологіями. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2018, Вип. 30. С. 31-39. DOI : <https://doi.org/10.31717/1813-3598.18.30.4>
21. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. Київ. 1998.

22. Норми радіаційної безпеки України, доповнення: Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000). Київ. 2000.
23. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України (ОСПУ-2005). Київ. 2005.
24. Третьякова Л.Д., Селіверстов А.Є. Новітні рішення проблеми індивідуального захисту працівників атомних електричних станцій : монографія. Київ: Основа, 2016. 197 с.
25. Исламов Т., Деревянкин А. А., Жуков И. В., Берберова М. А., Дядюра С. С., Мардашова Ю. А., Кальметьев Р. Ш. Оценка риска для атомных электростанций с реакторами типа РБМК и ВВЭРР. *ТРУДЫ Московского физико-технологического института*. 2014. Том 6, № 1. С. 146–153. URL: <https://mipt.ru/upload/medialibrary/6f1/146-153.pdf>.
26. Попов В.А., Романюк Р.А. Учет неопределенности информации при многокритериальной оценке альтернативных вариантов применения распределенной генерации. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017. № 1. С. 30–36.
27. Скитович В. Математические методы и модели исследования социальных процессов. Київ. 2005. 122 с. URL: https://socis.ucoz.ru/_ld/0/14_.pdf
28. Коваль Л. В., Смирнов С. А. Варіанти методу парних порівнянь за неповного профілю переваг. *XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики»*, (м. Київ, 25–27 трав. 2017 р.). Київ, 2017. С. 37–39. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/20720>
29. Козин И.В. Правила принятия решений на основе отношения парнодоминантности. *Вісник Запорізького національного університету*. 2008. Вип. 1. С. 97–104. URL: https://web.znu.edu.ua/herald/issues/2008/ped_2008_1/797.ukr.html

L. Tretiakova, Dr. Eng. Sc., Prof. ORCID 0000-0002-6909-4864

O. Ilchuk, Cand. Sc., Assis. Prof. ORCID 0000-0001-6352-5320

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

RATING ALGORITHM DEVELOPMENT FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF THE OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY MANAGEMENT

Purpose. *The purpose of the article is development of a rating algorithm to assess the effectiveness of the occupational health and safety management system at electricity companies. The algorithm aims to determine the ranking scale of enterprises according to standardised safety indicators.*

Methodology. *There is a certain level of uncertainty on the existing methods for providing and analysing statistical information on accidents, occupational hazards, occupational injuries and occupational diseases. Planning and management tasks are most often carried out when the necessary formal information is insufficient or uncertain. In addition to numerical statistics, information may include other, informal quantities that cannot be measured. Therefore, logical calculations with multivalued logic or ranking rules and investigate the invariance of selection rules for groups of transformations on a finite set of alternatives can be used to handle such knowledge. The formalisation of the ranking problem based on the Copeland method involves the construction of pairwise comparison tables for all formal safety indicators.*

Obtaining an assessment of the situation occurs with the use of a computer system and a decision support system, which increases the efficiency and accuracy of the assessment of the situation.

Results. *A formal apparatus for rating single-type enterprises to assess the effectiveness of the enterprise occupational health and safety management system in the have been developed using intelligent information technologies.*

Originality. *Based on the Copeland method and the paired comparison method, a safety rating algorithm has been developed, the implementation of which makes it possible to assess the performance of the occupational safety and health system. The results have illustrated the competitive advantage of some enterprises over others and motivate management to take action to improve workplace safety.*

Practical value. *Formalisation of information on hazardous and harmful occupational factors makes it possible to treat the subject area as a complex dynamic system, consisting of objects of a different nature, the totality of which determines the safety level. The developed rating method allows transferring the obtained results to decision-making support systems, illustrating competitive advantages of some enterprises over others, motivating management to take actions to improve occupational safety.*

Keywords: *rating; safety indicators; occupational safety; nuclear power plant; Copeland method.*

REFERENCES

1. Occupational Injuries in Ukraine in 2020, Statistical Compendium. [Online]. Available: www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2018/zb/05/zb_tv_2017.pdf
2. T.M. Tairova, "Problematic issues of labor protection in Ukraine", *Occupational health and safety issues in Ukraine*, no. 32, pp. 3–15, 2016.
3. Draft law of Ukraine "Safety and health of employees at work», 2021. [Online]. Available: <https://www.me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&isSpecial=True&id=2aef0adc-3565-4b0c-a018-df258017427a&title=ProektZakonuUkrainiproBezpekuTaZdoroviaPratsivnikivNaRoboti>.
4. Oah Shezeen, Na Rudia, Moon Kwangsu, "The Influence of Safety Climate, Safety Leadership, Workload, and Accident Experiences on Risk Perception: A Study of Korean Manufacturing Workers", *Safety and Health at Work*, no. 9, pp. 427–433, 2018.
5. A. Badri, S. Nadeau, A. Gbodossou, "Proposal of a risk-factor-based analytical approach for integrating occupational health and safety into project risk evaluation", *Accident Analysis and Prevention: Construction and Engineering*, vol. 48, pp. 223–234, 2012.
6. G. Sabourin, "The effectiveness of workplace wellness programs is measured! Prevention at work, reporting", *University Institute of intellectual disability and autism spectrum disorder*, 2016. [Online]. Available: http://institutditsa.ca/file/etmi_app_positive_rapport.pdf
7. A. Tremblay, A. Badri, "Assessment of occupational health and safety performance evaluation tools: State of the art and challenges for small and medium-sized enterprises", *Safety Science*, vol. 101, pp. 260–267, 2018.
8. M. Pillay, "Resilience Engineering: An Integrative Review of Fundamental Concepts and Directions for Future Research in Safety Management", *Open Journal of Safety Science and Technology*, vol. 7, pp. 129–160, 2017.
9. N.C. Huizinga, J.A. Davis, F. Gerr, N.B. Fethke, "Association between Occupational Injury and Subsequent Employment Termination among Newly Hired Manufacturing Workers", *International Journal Environmental research and public health*, vol. 16, no. 3: 433, 2019.
10. Safety and Health at Work. International Labour Organization, 2017. [Online]. Available: <http://www.ilo.org/global/topics/safety-and-health-at-work/lang--en/index.htm>
11. Prevention of Occupational Injuries. *Reports of the Social Insurance Fund of Ukraine*. [Online]. Available: <http://www.fssu.gov.ua/fse/control/main/uk/index>.
12. O. Forostyana, O. Malykhin, "On the assessment of occupational injuries insurance", *Occupational health and safety issues in Ukraine*, vol. 28, pp. 86–101, 2014.
13. Ch. Bignon, A. Badri, "A Comparative Analysis of the Two Main Documents Used in Small and Medium-Sized Enterprises in France and Québec as a Framework for Improving Occupational Health and Safety", *Open Journal of Safety Science and Technology*, vol. 9, no.1, pp. 22-36, 2019.
14. O. Kruzhilko, O. Polukarov, V. Kalinchyk, I. Tkalych, "Improvement of the workplace environmental physical factors values monitoring by determining the optimal interval for their control", *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 99, pp. 42–49, 2019.
15. A. Bochkovskiy, "Actualization of the scientific principles elaboration on evaluating the risks of occupational danger occurrence", *Науковий вестник Національного Горного Університета*, no. 6. pp. 96–103, 2018.
16. A. Joseph, Dean, *A probability risk assessment to support a defendable and quantitative safety assessment of the assault amphibious vehicle*. Monterey, CA; Naval Postgraduate School, 2018.
17. O. Kruzhilko, V. Maystrenko, "Management decision-making algorithm development for planning activities that reduce the production risk level", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 93, pp. 41–49, 2019.
18. Industrial injuries. The Ministry of Energy of Ukraine. [Online]. Available: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=202151
19. Radiation safety standards of Ukraine (NRBU-97). State hygienic standards, 1988. [Online]. Available: <https://rpi.kiev.ua/results/documents/nrbu-ospu/>
20. Radiation Protection from Potential Exposure Sources (NRBU-97 / D-2000), 2000. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text>
21. Basic Sanitary Rules for Radiation Safety of Ukraine (OSPU-2005), 2005. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0552-05#Text>

22. V. Vashchenko, I. Korduba, Yu. Kryzaska, "Analysis and radiation ecological consequences of heavy emergencies at Chernobyl and Fukushima 1", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiyi national university*, vol. 3, pp. 114–123, 2017.

23. V.V. Derengovsky, A.V. Nosovsky, "State of the problem concerning multicriterial analysis of safety of facilities with radiation-nuclear technologies", *Problems of nuclear power plans and of Chornobyl*, vol. 3, pp. 31–39, 2018.

24. L. Tretiakova, A. Seleverstov, *Modern solutions to the problem of personal protection of nuclear power plant workers*, Kyiv: Osnova, 2016.

25. T. Islamov, A. A. Derevyankin, I. V. Zhukov, M. A. Berberova, S. C. Dyadyura, Yu. A. Mardashova, R. Sh. Kalmetev, "Risk Assessment for NPPs with RBMK and VVER-type", *Reactors Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 146–153, 2014.

26. V. Popov, R. Romaniuk "Taking into account of the information uncertainty in the multicriteria evaluation of alternatives of distributed generation integration", *Energy: Economics, technology, ecology*, no. 1, pp. 30–36, 2017.

27. V. Skitovich, *Mathematical methods and models for the study of social processes*, 2005. [Online]. Available: https://socis.ucoz.ru/_ld/0/14.pdf

28. L. Koval, S. Smirnov, "Variants of the paired comparison method with an incomplete advantage profile", *XV International scientific-practical conference of students, postgraduate students and young scientists "Theoretical and applied problems of physics, mathematics and informatics"*, 2017. [Online]. Available: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/20720>

29. I.V. Kozin, "Decision-making rules based on pairdomination relation", *Bulletin of Zaporizhzhia National University*, no. 1, pp. 97–104, 2008.

Надійшла 15.12.2020

Received 15.12.2020

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

УДК 553.981.2

О.М. Терентьев, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-2523-2804
М.І. Сергієнко, викладач, ORCID 0000-0001-8284-9072
В.Г. Смоляр, інженер, ORCID 0000-0002-0355-0353
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ПРОМИСЛОВОГО АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

В статті розглянуто вплив промислового автомобільного транспорту на навколишнє середовище, а саме: викидів забруднюючих речовин у атмосферу в залежності від виду палива та їх негативного впливу на здоров'я людини. Різке зростання парку автомобілів спричинює значну шкоду у вигляді небезпечних викидів із систем згоряння двигунів, з якими не справляються штатні системи очищення автомобіля. Становище погіршується ще й тим, що автомобільні викиди концентруються в приземному шарі повітря — саме в зоні дихання людини. До нинішнього часу застосовується низькоякісний бензин, який забруднює довкілля. У вихлопних газах міститься значна кількість CO₂, сажі, тощо. У відпрацьованих газах, що їх викидають автомобілі, виявлено близько 280 шкідливих речовин, серед яких особливу небезпеку становлять канцерогенні бензопірени, оксиди азоту, свинець, ртуть, альдегіди, оксиди вуглецю, сажа, вуглеводні тощо. В роботі проведений аналіз існуючих та перспективних видів палива і зниження техногенного впливу автомобільного транспорту на навколишнє середовище в Україні.

Ключові слова: автомобільний транспорт, якість повітря, викиди, забруднення повітря, оксид вуглецю, вплив викидів на довкілля, перспективні види палива.

Вступ. Актуальність впливу промислового автомобільного транспорту на навколишнє середовище набуває все більшого значення. Тому Законом України “Про охорону навколишнього природного середовища” (Введений в дію Постановою ВР № 1268-ХІІ від 26.06.91, ВВР, 1991, № 41, ст.547) зі змінами, внесеними згідно із Законами № 554-ІХ від 13.04.2020, ВВР, 2020, № 37, ст.277 – вводиться в дію з 1 січня 2021 року). У статті [1] розглянуто основні принципи охорони довкілля і гарантування екологічно безпечного середовища для життя і здоров'я людей. У статті [2] наведені роль і необхідність моніторингу навколишнього природного середовища, спостереження і вимірювання стану довкілля та інші параметри екосистем. В статті [3] говориться про «управління якістю атмосферного повітря, у тому числі атмосферні опади, викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря». Ступінь важливості питань убезпечення негативного впливу промислового автомобільного транспорту на навколишнє середовище не викликає ніяких сумнівів. Результати досліджень щодо зменшення шкідливості викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря очікуються для застосування в промисловості.

З моменту появи автомобільних двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) та до сих пір для них використовуються продукти нафтопереробки: бензин або дизельне паливо. Вони являють собою суміш вуглеводнів з присадками. Використання вуглеводневого палива привело до загострення проблем загазованості повітря довкілля автотранспортом та погіршення здоров'я населення. Автомобільний транспорт є одним з основних забруднювачів довкілля.

Розглянувши актуальність проблеми було підтверджено перспективність та необхідність впровадження інших видів палива, що може суттєво покращити ситуацію.

Обґрунтування напрямку досліджень. Необхідність зниження викидів від автотранспорту є чи не найголовнішою проблемою в Україні. При спалюванні палива в ДВЗ витрачається атмосферний кисень і утворюється багато шкідливих речовин, що забруднюють атмосферу, а також негативно впливають на здоров'я людей.

Мета досліджень - дослідити та проаналізувати шкідливий вплив викидів автотранспорту на довкілля, та показати основні напрямки вирішення проблеми зменшення загазованості повітря.

© О.М. Терентьев, М.І.Сергієнко, В.Г. Смоляр, 2020

Виклад основного матеріалу. Високі темпи автомобілізації призвели до прояву неочікуваності

суспільства до подальшого розвитку автотранспортного комплексу. Такими вадами є:

- нерозвиненість вулично-дорожньої мережі та об'єктів транспортної інфраструктури;
- висока частка автомобільного парку з великим терміном експлуатації та низькими екологічними показниками;
- відставання у розвитку громадського пасажирського транспорту.

Це призвело до різкого загострення негативних чинників, а саме:

- зростання щільності потоку автотранспорту, особливо в піковий час;
- перевантаження вулично-дорожньої мережі та збільшення числа заторів;
- використання низькосортних видів рідкого палива;
- висока концентрація автотранспортних підприємств і гаражних боксів в районах житлової забудови;

Види авто-транспорту	Вид палива	Оксид вуглецю	Вуглеводні	Оксиди азоту	Сажа	Діоксид сірки	Свинець
Вантажівки	Бензин	225,7	54,8	17,46	-	0,6	0,23
	Диз. паливо	40,4	6,8	30,0	3,85	5,0	-
Пасажирські Автобуси	Бензин	233,0	56,9	16,37	-	0,6	0,23
	Диз. паливо	41,5	6,93	29,6	3,85	5,0	-
Пасажирський Легковий транспорт	Бензин	225,7	32,3	17,46	-	0,6	0,5
	Диз. паливо	40,4	6,8	30,0	3,85	5,0	-

- низька якість дорожнього покриття тощо.

Частка викидів шкідливих речовин від автотранспорту становить близько 89,3% від сумарної маси викидів транспортними підприємствами або 20% від загальної маси викидів в атмосферу [4]. В табл. 1 представлені дані щодо викидів у залежності від видів автотранспорту та видів палива [5].

Таблиця 1 – Середні питомі викиди автотранспорту

Найбільш поширеними забруднюючими речовинами у викидах автомобільного транспорту є оксид вуглецю та вуглеводні. Частка вказаних компонентів різко зростає при роботі двигуна на малих обертах, при старті або збільшенні швидкості. Виявлені також сполуки свинцю, які використовуються в якості домішок бензину; оксиди азоту. У дизельному двигуні відбувається більш повне згоряння палива, менше окислюється вуглець і утворюється менше неспалених вуглеводнів. Але, разом з цим, за рахунок нестачі повітря в дизелі утворюється більша кількість оксиду азоту. Дизельні двигуни, крім того, викидають сажу. Проблема загазованості повітря автотранспортом постала особливо гостро останнім часом. У зв'язку з цим були затверджені Євростандарти [6] щодо токсичності вихлопів автомобілів (табл.2).

Таблиця 2 – Євро стандарти до максимальних викидів двигунів внутрішнього згоряння

Стандарт	Рік введення стандарту	Вміст викидів у вихлопних газах							
		Одиниці виміру	Бензинові двигуни				Дизельні двигуни		
			CO	CH	NOx	Тверді частки	CO	CH+NOx	Тверді частки
Євро-0	1988	г/км	2,7	0,55	0,45	0,56	2,5	1,5	0,4
Євро-1	1993	г/км	2,5	0,4	0,35	0,56	1,5	1,1	0,25
Євро-2	1996	г/км	2,2	0,5	0,25	0,2	0,1	0,8	0,1
Євро-3	1999	г/км	2,3	0,2	0,15	0,15	0,64	0,56	0,05
Євро-4	2005	г/км	1,0	0,1	0,08	0,1	0,5	0,3	0,025
Євро-5	2008	г/км	1,0	0,075	0,08	0,005	0,5	0,2	0,005
Євро-6	2015	г/км	1,0	0,07	0,060	0,005	0,5	0,17	0,005

*CO - оксид вуглецю; CH - вуглеводні; NOx – оксиди азоту

На діаграмах рис. 1 наглядно показані викиди від автотранспорту, відповідно, з бензиновим (а) та дизельним (б) паливом. Взяті середні арифметичні дані з табл. 1.

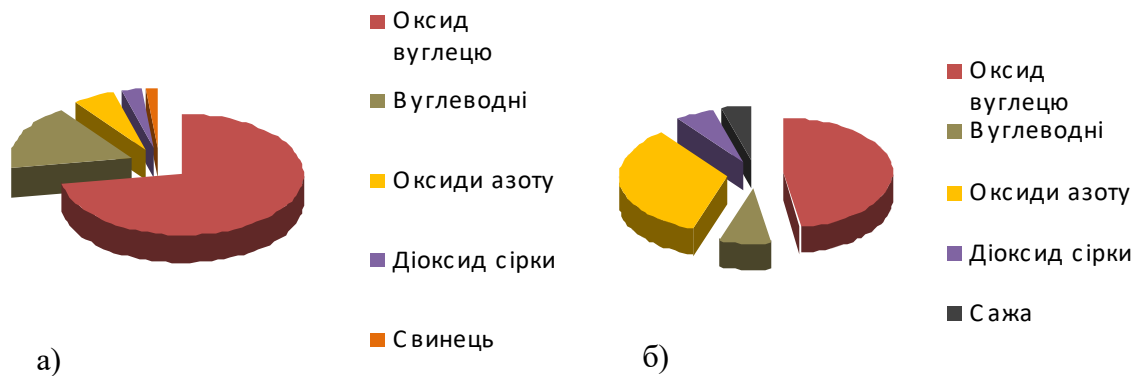


Рисунок 1 – Діаграма викидів від автотранспорту, що використовує: а) бензин як паливне, %; б) дизельне паливне, %.

З діаграм видно, що більшу кількість викидів становить оксид вуглецю. Оксид вуглецю (CO) є безбарвний, без запаху і смаку, отруйний газ, що виділяється в неповному спалюванні вуглецю в тому числі газу, нафти, деревини і вугілля [7].

На графіку рис.2 показана залежність викидів оксиду вуглецю автотранспортом з бензиновим та дизельним паливом від величини пробігу.

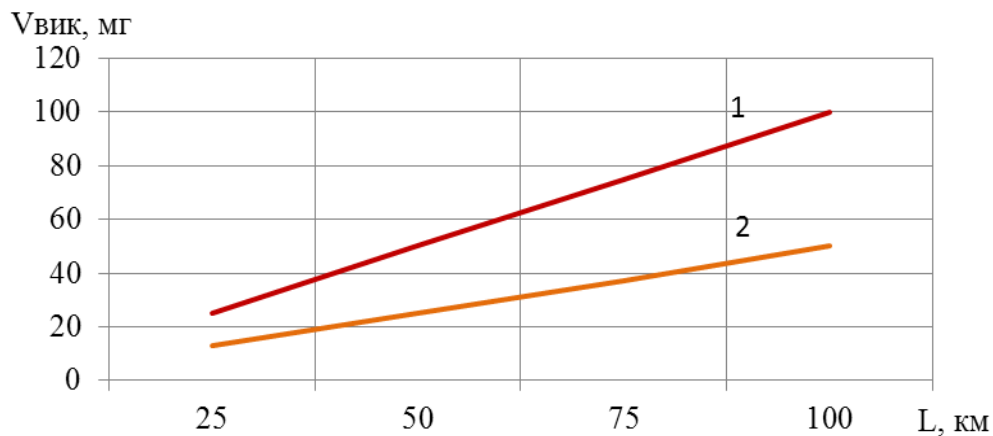


Рисунок 2 – Графік викидів оксиду вуглецю двигунів автомобілів : 1 – бензин; 2 – дизельне паливне

З графіку видно, що використовувати дизельне паливне більш доцільно з точки зору екології, адже викидів CO у атмосферу значно менше.

Для автомагістралей з інтенсивним рухом автотранспорту при оцінюванні токсичності викидів автомобільних двигунів рекомендується визначити кількість шкідливих речовин, M (кг) при спалюванні 1-го кг палива за формулою (1):

$$M = K' \cdot \sigma , \quad (1)$$

де σ – маса спаленого палива, кг; K' – коефіцієнт, який враховує тип двигуна внутрішнього згорання.

На кафедрі автоматизації управління електротехнічними комплексами розроблений універсальний електронний прилад, що дозволяє вимірювати викиди оксиду вуглецю, вуглеводню та оксиди азоту

промисловим автомобільним транспортом як в стаціонарних умовах, безпосередньо в умовах роботи, на трасі переміщення промислового автотранспорту, так і при лабораторних дослідженнях. На прилад подана Заявка на Патент на КМ України.

Результати розрахунків і отримані значення коефіцієнтів К наведені в табл.3.

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів К для визначення кількості шкідливих речовин при спалюванні 1 кг палива

Тип двигуна	CO	CH	NO ₂
Бензиновий	0,6	0,1	0,04
Дизельний	0,1	0,03	0,04

Джерелом великої кількості чадного газу виступають викиди автотранспортних засобів в навколишнє середовище. Але шкідливість чадного газу для людини полягає в тому, що він міститься і в самому автотранспорті, і в першу чергу в кабінах (салонах) легкових, вантажних автомобілів, автобусів, містяться всі шкідливі речовини CO, NO_x, CH_x, ТЧ і т.д.[8].

Таким чином, проблема забруднення повітря кабіні всіх перерахованих видів транспорту стоїть дуже гостро. Наднормативне забруднення повітря в салонах і кабінах автотранспорту призводить до погіршення самопочуття, головного болю, втрати слуху, зниження реакції, сонливості, зниження продуктивності праці і збільшення кількості дорожньо-транспортних пригод.

Викиди автомобіля таких токсичних речовин як вуглекислий газ, оксид вуглецю, оксид азоту, сажа, окис свинцю, вуглеводні, негативно впливають на здоров'я людини, викликаючи такі порушення організму, як підвищення артеріального тиску, запаморочення, зниження працездатності, захворювання легенів, бронхіт тощо [9] (табл. 4)

Таблиця 4 – Дія токсичних речовин на організм людини

Викиди в газах автомобіля	Бензинові двигуни, %	Дизельні двигуни, %	Вплив на організм людини
Вуглекислий газ	5,0-16,0	1,0-10	Органи дихання, кровоносну систему
Оксид вуглецю	0,1-5,0	0,01-0,3	Порушення органів дихання, головна біль, підвищення артеріального тиску, серцебиття
Оксид азоту	0-0,8	0,005-0,2	Захворювання легенів, бронхіт, Пневмонія
Сажа	0-100	0-2000	Органи дихання
Окис свинцю	10-60	-	Сонливість, послаблення, сповільнення рефлексів, зниження працездатності
Вуглеводні	0,2-3,0	0,04-0,5	Впливає на організм в цілому

Альтернативою традиційним видам палива є використання природного газу. Основну частину природного газу складає метан (CH₄) — до 98 %. Метан (стиснений природний газ, СПГ, compressed natural gas, CNG) - горючий газ, який є основним компонентом природного газу. Метан практично не залишає шкідливих продуктів згорання [10]. Природний газ в якості автомобільного палива використовується вже понад півстоліття.

Головний плюс, звичайно, екологічність газового палива. У вихлопі повністю відсутні сполуки свинцю, рівень CO на порядок нижче, ніж при використанні бензину. Ресурс двигуна, особливо його поршневої-шатунної групи, збільшується, оскільки ніколи не буває детонації (октанове число газу 100-120 одиниць), двигун працює рівномірніше і м'якше. Газ практично не утворює нагару на сідлах клапанів і на поршнях. Зменшується витрата масла і забруднення їх продуктами горіння, та зменшенню викидів в атмосферу. На рис.3 показана ефективність використання різних видів палива в автомобільних двигунах.

З метою безпеки для виявлення наявності газу в навколишньому середовищі при його витокі із системи паливободачі автомобіля в газове паливо вводяться спеціальні речовини (одорант). Також можливо перейти з дизельного палива або бензину на біопаливо [11]. Біопаливо — це паливо з біологічної сировини, одержуване, як правило, в результаті переробки біологічних відходів. Розрізняють рідке біопаливо (для двигунів внутрішнього згорання, наприклад, етанол, метанол, біодизель), тверде біопаливо (дрова, брикети, паливні гранули, тріска, солома, лушпиння) і газоподібне (біогаз, водень) [12]. Для двигунів автомобілів в основному використовують біопаливо на основі етанолу та біодизель.

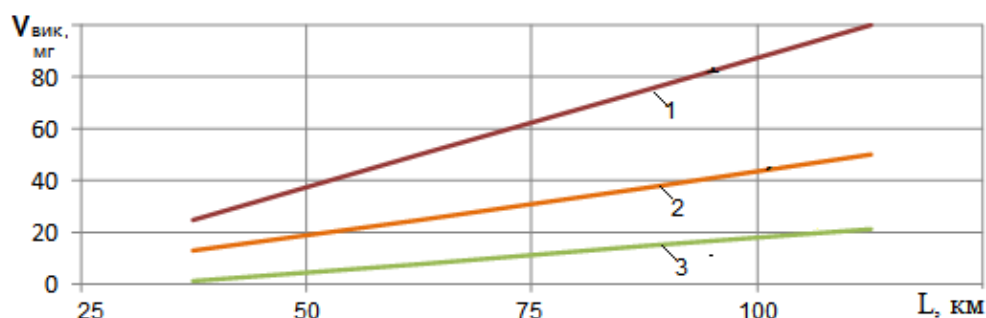


Рисунок 3 - Ефективність використання видів палива: 1 – бензин; 2 - дизельне паливо; 3 – природний газ

Відкрито перші в Україні спеціалізовані автозаправні станції в Одеській, Київській, Чернівецькій і Дніпропетровській областях які реалізують біопаливо. Зараз на АЗС реалізуються два види моторного палива - БІО-100 і біодизель, традиційного бензину і дизеля тут немає. Літр моторного палива БІО-100, який складається з суміші біоетанолу (спирту) і бензину, наприклад, на новій АЗС коштує 25,55 гривні, що на 4 гривні дешевше, ніж звичайний 95-й бензин. БІО-100 є аналогом високооктанового палива, рослинна основа в ньому становить 60 відсотків. Паливо менше заподіює шкоди навколишньому середовищу і має більш привабливу ціну. До того ж автомобілю таке паливо абсолютно не шкодить, адже воно відповідає стандарту "Євро-5". Як відомо, Україна є найбільшим виробником зернових і спирту - біоетанолу, а також олійних культур, зокрема, рапсу, з якого виготовляють біодизель [13].

Переваги біопалива: нижча вартість, зменшується зношення двигуна, екологічність, може використовуватися на двигунах практично будь-якого ступеня стиснення, не засмічується паливна система. Недоліки біопалива: мала на сьогоднішній день кількість заправок. Перед початком використання біопалива потрібно прочистити всю паливну систему, може збільшитися споживання палива. Не всі інжекторні системи можуть підлаштуватися до роботи на біопаливі, карбюраторні системи вимагають більш точного налаштування з можливим збільшенням споживання палива [14].

Висновки. Викиди забруднюючих речовин від автотранспорту з року в рік зростають та негативно впливають на стан забруднення атмосферного повітря і здоров'я людини. Виходячи з проведених досліджень, для вирішення проблеми забруднення навколишнього середовища автомобілями, необхідно запровадити:

- 1) Використання природного газу або біопалива замість дизельного палива або бензину, адже це більш безпечно з точки зору екології.
- 2) Жорсткий контроль за якістю пального, що постачається і реалізується автозаправними станціями, його відповідності державним та останнім Євростандартам.
- 3) Контроль над експлуатацією машин старих зразків.
- 4) Використання на автотранспорті спеціальних моторних мастил, а також палива з додаванням присадок, каталітичних перетворювачів палива та ін., що призведе до зменшення витрат пального, зниження викидів забруднюючих речовин та збільшення моторесурсу двигунів.
- 5) Перехід та використання автотранспорту з електричними тяговими двигунами.

Список використаної літератури

1. Петрук В.Г. Природоохоронні технології. Захист атмосфери: навч. посіб./ В.Г. Петрук, Л.І. Северин, І.В. Васильківський, І.І. Безвозюк // Вінниця: "Універсум-Вінниця", 2010. – 215 с.
2. The International Center for Technology Assessment. Report. In-Car Air Pollution // Washington: DC, 2000. — July. — S. 41
3. Фомин Г.С., Фомина О.Н. Воздух. Контроль загрязнений по международным стандартам: справочник./ Г.С. Фомин, О.Н. Фомина. — М.: Протектор, 2002.- 432 с.
4. Гутаревич Ю.Ф. Екологія та автомобільний транспорт: навч. посібник / Ю.Ф. Гутаревич, Д.В. Зеркалов, А.Г. Говорун, А.О. Корпач. – К.: Арістей, 2016. – 292 с
5. Русіло П. О. Вплив на довкілля автомобільного транспорту на всіх стадіях його життєвого циклу / П. О. Русіло, В. В. Костюк, В. М. Афонін // Науковий вісник НЛТУ України. — 2008. — № 18(3). — С. 85—89. — ISSN 5-7763-2435-1.
6. https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6-VI_briefing_jun2016.pdf
7. Степанчук І. М. Автомобільний транспорт і екологічні проблеми міст / І. М. Степанчук, О. В. Степанчук // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. — 2004. — № 6. — С. 88—93.
8. Шевчук В.Я. Екологічне управління: Підручник / В.Я. Шевчук, Ю.М. Саталкін, Г.О. Білявський.— К.: Либідь, 2004.—278 с.

9. Тимченко О. І. Загрози для здоров'я населення від впливу антропогенних чинників та можливості їх попередження / О. І. Тимченко. — Київ : ІГМЕ АМН України, 2005. — 265 с.
10. David McKeown. Air pollution burden of illness from traffic in Toronto / Dr. David McKeown. — Toronto : Toronto Public Health, November 2007. — 57.
11. Калетнік Г.М. Біопаливо: ефективність його виробництва та споживання в АПК України: навч. посіб. / Г. М. Калетнік, В. М. Пришляк. — К. : Хай-Тек Прес, 2011. — 312 с.
12. Максимів Ю.В. Комплексне використання сировини для виробництва твердого біопалива деревообробними підприємствами: монографія / Ю. В. Максимів ; ДВНЗ «Прикарпат. нац. ун-т ім. Василя Стефаника». — Івано-Франківськ: Друкарня Фоліант, 2015. — 186 с.
13. Клименко В. В. Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів : монографія / Клименко В. В. – Центральноукр. нац. техн. ун-т. — Кропивницький : Ексклюзив-Систем, 2017. — 161 с.
14. O. Terentiev, N. Sergienko, A. Guzan. Use of innovative systems for efficient drilling of wells in the quarry of Ukraine / Energetyka: ekonomika, tehnologii, ekologiya: Scientific Journal, no.2, pp. 73-82, 2020. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2020.220713>

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

M. Sergienko, Assos. Prof. **ORCID** 0000-0001-8284-9072

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

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ENVIRONMENTAL IMPACT OF INDUSTRIAL TRANSPORT

The article discusses topical issues and problems of the impact of industrial road transport on the environment, namely: emissions of pollutants into the atmosphere depending on the type of fuel and their negative impact on human health. The significant increase in the vehicle fleet is causing great harm in the form of harmful emissions from fuel combustion systems, which cannot be dealt with standard car cleaning systems. The situation is aggravated by the fact that car emissions are concentrated in the surface air layer - precisely in the zone of our breathing. Low-quality gasoline is still used, polluting the environment. About 280 harmful substances were found in the exhaust gases of cars, including carcinogenic benzopyrenes, nitrogen oxides, lead, mercury, aldehydes, carbon oxides, soot, hydrocarbons. These emissions increase significantly when starting off or increasing speed. Diesel engine emissions are different from gasoline engine emissions. A diesel engine burns fuel more completely, oxidizes less carbon and produces less non-combustible hydrocarbons. But, at the same time, due to the lack of air in the diesel engine, more nitrogen oxide is formed. Diesel engines also emit soot. Gas emissions from transport into the atmosphere are exposed to sunlight, which leads to photochemical reactions leading to the formation of NO₂, O₃, peroxides, benzopyrene (C₂₂H₁₄) and other compounds. In addition, each vehicle emits rubber dust into the atmosphere when its tires are abraded and worn out. Accordingly, the scale of damage caused by transport to the environment and people is also increasing. The article analyzes the existing and promising types of fuel and the reduction of the technogenic impact of industrial road transport on the environment in Ukraine.

Keywords: industrial road transport, air quality, emissions, air pollution, carbon monoxide, the impact of emissions on the environment, promising fuels.

REFERENCES

1. Petruk V.G. Prirodoohoronnii tehnologii. Zahyst atmosfery: navch. posib./ V.G. Petruk, L.I. Severin, I.V. Vasylykivskiy, I.I. Bezvozhuk.//Vinnitsa: "Universum-Vinnitsa", 2010. — 215 с.
2. The International Center for Technology Assessment. Report. In-Car Air Pollution // Washington: DC, 2000. — July. — S. 41
3. Fomin G.S. Воздух. Контроль загрязнений по международным стандартам: справочник./ G.S. Fomin, O.H. Fomina. — М.: Protektor, 2002.- 432 с.
4. Gutarevich Yu. F. Ekologia ta avtomobilnyj transport: navch.posib./Yu. F. Gutarevich, D.V. Zerkalov, A.G. Govorun, A.O. Korpach.// K.: Aristey, 2016. — 292 с
5. Pusilo P.O. Vplyv na dovkillia avtomobilnogo transportu na vsih stadijah zhyttievogo zyklu./P.O. Pusilo, V.V. Kostuk, V.M. Afonin.// Naukovyj visnyk NLTU Ukrainy. — 2008. — № 18(3). — pp. 85—89.
6. https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6-VI_briefing_jun2016.pdf
7. Stepanchuk I.M. Avtomobilny transport i ekologichni problem mist./ I. M. Stepanchuk, O.V. Stepanchuk // Ekologiya dovkillia ta bezpeka zhittediyalnosti. — 2004. — № 6. — p. 88—93.

8. Shevchuk V.Y. Ekologichne upravlinnja:pidruchnyk./ V.Y. Shevchuk, Yu. M. Shevchuk, Yu..M. Satalkin, G.O. Biljavsky.– K.: Lybid, 2004.–278 p.
9. Tymchenko O.I. Zagrozy dlja zdorovja naselenna vid vplyvu antropogennysh chynnykiv na vozhlivosti ih poperedgennja./ O. I. Tymchenko. — Kyiv : IGME AMN UKRAINY,– 2005. — 265s.
10. David McKeown. Air pollution burden of illness from traffic in Toronto / Dr. David McKeown. — Toronto : Toronto Public Health, November 2007. — 57.
11. Kaletnik G.M. Biopalyvo: Efektyvnist yogo vyrobnitstva ta spozhivannja v APK Ukrainy:navch. posib./ G.M. Kaletnik, V.M. Prishljak//. — K. : Haj-Tek-Pres, 2011. — 312 s.
12. Maksymiv Yu.V. Kompleksne vykorystannja syrovyny dlja vyrobnytva tverdogo biopalyva derevoobrobnymy pidpryemstvavy :monografija./ Yu.V.Maksymiv.– DVNZ «Prykarpatnac. Nac. un-t im. Vasylja Stefanyka. — Ivano-Frankivsk: Drukarnja Foliant, 2015. — 186 с.
13. Klymenko V.V.Technologichni osnovy vygotovlennja biopalyvaz roslynnyh vidhodivta ish kompozytiv:monografia./Klimenko V.V.–Centralnoukr. nac. techn.un-t. — Kropivnyckyj : Eksqluziv-System.– 2017. — 161 s.
14. O. Terentiev, N. Sergienko, A. Guzan. Use of innovative systems for efficient drilling of wells in the quarry of Ukraine / Energetyka: ekonomika,tehnologii, ekologiya: Scientific Journal, no.2, pp. 73-82, 2020.

Надійшла 28.12.2020
Received 28.12.2020

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для подання рукопису до журналу автори повинні дотримуватись всіх встановлених вимог, які вказані нижче.

У разі невідповідності поданих матеріалів статті пунктам цих вимог, а також якщо вони не відповідають тематиці наукового журналу, редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання!

Обсяг статті

Загальний обсяг статті – від 6 до 10 сторінок формату А4. Сторінки повністю заповнені текстом. Схеми, рисунки, таблиці й формули повинні бути пронумеровані та розміщені в тексті після посилань на них. Матеріал має бути викладений стисло, без повторювань даних таблиць і рисунків у тексті. Неприпустимо використовувати елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонтитули.

Стаття має бути ретельно перевірена авторами та відповідати всім пунктам вимог до оформлення!!!!

Текстовий редактор

Стаття набирається в текстовому редакторі Microsoft Word (версії 2007 та вище) і зберігається з розширенням *.doc або *.docx.

Обов'язково надсилається стаття, збережена у форматі *.pdf !!!

Загальне оформлення:

1) Мова. Статті приймаються до друку трьома мовами: українською, російською, англійською.

2) Параметри сторінки:

- Поля: зліва, справа, зверху, знизу – 2,5 см.
- Вирівнювання основного тексту – за шириною.
- Перші рядки всіх абзаців – з відступом 1,0 см!!!
- Шрифт – Times New Roman, кегль 10, міжрядковий інтервал 1.
- Назва статті друкується великими (Caps Lock) напівжирними літерами (Ж) – кегль 14.
- Заголовки елементів основного тексту (Вступ, Мета та завдання тощо) виділяються напівжирним шрифтом (Ж).

3) Структура статті:

- **номер УДК** (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом кегль 10)
- **прізвища авторів** (приклад: І.І. Петренко (укр.), И.И. Петренко (рос.) I. Petrenko (англ)) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання); **індекс ORCID – обов'язково;**
- (Порядок оформлення наукових ступенів та вчених звань описано нижче в цьому ж документі в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і наукових ступенів»).
- **повна назва організації** (навчального закладу, установи) – **вирівнювання за правим краєм;**
- **реферат обсягом від 1000 до 1100 знаків** повинен відображати короткий зміст статті, не повторювати назву, не містити загальних фраз та бути структурованим (мета дослідження, методика реалізації, результати дослідження, висновки). В англійській версії статті наводиться реферат обсягом 1700-2000 знаків,
- **ключові слова:** (6–8 слів), словосполучення «Ключові слова» – напівжирним + курсив.

Відповідно до постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003р. до друку приймаються наукові статті, що мають такі елементи:

Основний текст статті

Вступ (постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується зазначена стаття);

Мета та завдання (формулювання цілей статті, постановка завдання);

Матеріал і результати досліджень (виклад основного матеріалу дослідження, з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, з можливим поділом на частини з відповідними назвами);

Рисунки (діаграми, фото тощо) подаються у **чорно-білому зображенні** разом із текстом, після посилань на них. **Вимога до графічних матеріалів: будь-яка ілюстрація повинна бути єдиним нерозривним графічним об'єктом.** Рекомендується застосування растрових форматів з роздільною здатністю **не менше 300 dpi.** Рисунок має бути розташований у центрі, без обтікання текстом. Підписи до рисунків повинні містити нумерацію в порядку розміщення в тексті та пояснювальний підпис. Неприпустимо включати підписи до самого рисунка. **Рисунок не повинен займати всю площу аркуша!!!**

Крапки після назви структурних частин статті не ставити.

Графіки повинні містити підписи усіх осей на самому рисунку. Будь-який інший вигляд підпису розглядатись та виправлятись не буде!

Таблиці. При заповненні слід користуватись шрифтом 10 кеглю. Кожна таблиця повинна мати порядковий номер та назву і розташовуватись після посилання на неї у тексті статті. Якщо таблиця не вміщується на сторінці або виходить на іншу, слід використати позначення «Продовження табл.».

Формули повинні бути набрані за допомогою редактора формул **Math Type (версія 6.8 і вище)** або внутрішній редактор формул у Microsoft Word з **розмірами: звичайного символу – 11, великого індексу – 10, малого індексу – 9.** Кириличні та грецькі символи мають бути набрані прямим шрифтом, латинські літери – похилим. Виняток становлять символи операторів і стандартних функцій, які набираються прямим шрифтом. Нумерація формул, на які є посилання в тексті, – справа в дужках. Цілі частини від десяткових відокремлюються комою **Одиниці розмірності можна набирати окремо від формул, або у формулах, з обов'язковим використанням проміжку.**

Висновки:(навести основні висновки з дослідження та перспективи його подальшого розвитку в цьому напрямку).

Список використаної літератури наводиться в порядку посилань у тексті, відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках.

Список використаних **літературних джерел подається двічі:** мовою оригіналу відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр, рос) і англійською, відповідно до вимог IEEE style

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

Для надання відомостей про авторів англійською, або російською мовами, слід використовувати загальноприйнятну лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

Англійська анотація за обсягом рекомендується більшою за українську (російську) 1700-2000 знаків, оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:

(Анкети подаються **3 мовами (укр., англ. та рос.)**. Вказується повна назва організації або установки, вказати місце де працює автор. Якщо всі автори статті працюють або навчаються в одній установі, можна не вказувати місце роботи кожного автора окремо.)

Прізвище, ім'я, по-батькові автора (повністю, без скорочень)	
Вчений ступінь, вчене звання, посада	
Місце роботи кожного автора в називному відмінку (повна назва без скорочень)	
Поштова адреса місця роботи, з поштовим індексом	
Контактний телефон	
Електронна адреса	
ORCID	

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку статей.

Редакція журналу здійснює перевірку на плагіат за допомогою спеціального програмного забезпечення!!!

Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" та не пройшли перевірку на плагіат, будуть повернуті на доопрацювання.

Увага!!! На електронну адресу журналу надсилається:

- стаття версія в форматі *.doc або *.docx;
- стаття версія в форматі *.pdf (**ОБОВ'ЯЗКОВО**);
- анкета відомостей про авторів;
- акт експертизи про можливість оприлюднення матеріалів у засобах масової інформації.

Контакти:

- тел.: +38(044) 204-82-37;
- сайт: <http://energy.kpi.ua>;
- e-mail: kravkpi@ukr.net